



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OPTİK FİLTRE ENTEGRASYONU İLE GELİŞTİRİLMİŞ
YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK TERMAL BİR SİSTEMİN
TERMAL VE ELEKTRİKSEL PERFORMANSININ DENEYSEL
İNCELENMESİ**

TAYFUN ALTIÖK

DANIŞMAN

DOÇ. DR. ABİD USTAOĞLU

BARTIN-2025



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**OPTİK FİLTRE ENTEGRASYONU İLE GELİŞTİRİLMİŞ YOĞUNLAŞTIRICI
FOTOVOLTAİK TERMAL BİR SİSTEMİN TERMAL VE ELEKTRİKSEL
PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tayfun ALTIOK

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Doç. Dr. Abid USTAOĞLU
Üye : Prof. Dr. Alper ERGÜN
Üye : Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU

BARTIN-2025

KABUL VE ONAY

Tayfun ALTIOK tarafından hazırlanan “OPTİK FİLTRE ENTEGRASYONU İLE GELİŞTİRİLMİŞ YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK TERMAL BİR SİSTEMİN TERMAL VE ELEKTRİKSEL PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 28.11.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Abid USTAOĞLU

Üye : Prof. Dr. Alper ERGÜN

Üye : Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer CEYLAN

Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Abid Ustaoglu danışmanlığında hazırlamış olduğum “ OPTİK FİLTRE ENTEGRASYONU İLE GELİŞTİRİLMİŞ YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK TERMAL BİR SİSTEMİN TERMAL VE ELEKTRİKSEL PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

28.11.2025

Tayfun ALTIOK

YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN BEYAN

☐ Tez yazım sürecinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faydalanmadım**.

☒ Tez yazım sürecinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faydalandım**. Bu kapsamda, yapay zekâ destekli araçların kullanımına ilişkin aşağıdaki hususları beyan ederim:

1. Bu çalışmada, yalnızca bilimsel üretim sürecini desteklemek amacıyla yapay zekâ tabanlı araçlardan yararlanılmış olup; kullanılan araçların işlevi, katkı düzeyi ve sınırları açık biçimde eklerde belirtilmiştir. Bu kapsamda kullanılan yapay zekânın kapsamı hipotez geliştirme, teorik tartışma ve yorumlama gibi üst düzey beceri, deneyim ve uzmanlık gerektiren aşamaları içermemektedir.
2. Yapay zekâ kullanımı, çalışmanın özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmayacak biçimde gerçekleştirilmiştir.
3. Usulsüz yapay zekâ kullanımı (örneğin: kaynak göstermeksizin metin üretimi, otomatik içerik üretiminin özgün eser gibi sunulması, yanıltıcı kaynak gösterimi vb.) tarafımdan kesinlikle yapılmamıştır.
4. Çalışmanın hazırlanmasında kullanılan yapay zekâ araçları ve işlevleri ekte sunulan tabloda ayrıntılı olarak belirtilmiş olup bu kullanım danışman öğretim üyesinin bilgisi dahilinde gerçekleştirilmiştir.
5. Yukarıda yer alan beyanımın gerçeğe aykırı olduğunun tespiti hâlinde, yükseköğretim mevzuatı, ilgili etik kurallar ve Bartın Üniversitesi disiplin mevzuatı çerçevesinde hakkımda yaptırım uygulanabileceğini bildiğimi ve bu sonuçları kabul ettiğimi taahhüt ederim.

28.11.2025

Tayfun ALTIOK

ÖN SÖZ

Bilimin ilerlemesi için alışkanlıklar sorgulanmalı, iyi olanın daha iyi olabilmesi için çaba sarf edilmelidir. Bugün önemli yarın daha da önemli hale gelecek olan yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine katkı sağlamak amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının hazırlanma sürecinde akademik anlamda ufkumu genişleten, farkındalık katıp bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak yol gösteren, değerli danışmanım Doç. Dr. Abid USTAOĞLU'na bu süreçteki katkılarından dolayı en derin teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarının yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Hakan BÜYÜKPATPAT' a ve deneysel çalışmaların yürütülmesinde her daim teknik destek veren Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU' ya minnettarım.

Tez çalışmamı destekleyen ve bu değerlere her zaman sahip çıkıp destek olan Mescier Demir Çelik A.Ş.' ye teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca tüm tez sürecinde moral ve motivasyon desteğini her zaman yanımda hissettiğim aileme, sabırları ve sevgileri için şükranlarımı sunarım.

Tayfun ALTIOK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTİK FİLTRE ENTEGRASYONU İLE GELİŞTİRİLMİŞ YOĞUNLAŞTIRICI FOTOVOLTAİK TERMAL BİR SİSTEMİN TERMAL VE ELEKTRİKSEL PERFORMANSININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Tayfun ALTIOK

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abid USTAOĞLU

Bartın-2025, sayfa: 108

Silikon tabanlı fotovoltaik (PV) hücreler yalnızca 370 nm ile 1180 nm dalga boyu aralığındaki güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştürebilme kapasitesine sahiptir. Bu dalga boyu aralığı dışındaki ışınım, özellikle kızılötesi bölgede yer alan termal bileşenler, PV yüzeyinde aşırı ısınmaya neden olarak hücre verimliliğini düşürmekte, uzun vadede hücre ömrünü kısaltmakta ve sistemin genel performansını olumsuz yönde etkilemektedir. PV-T ve CPVT sistemlerde bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla PV arka yüzeyine entegre edilen soğutma sıvıları kullanılarak termal yük azaltılmaya çalışılmaktadır. Ancak bu yöntem, PV hücrelerinde termal gerilme oluşturarak mikro çatlaklara yol açabilmekte ve uzun vadede hücre dayanımını azaltabilmektedir. Bu çalışmada önerilen alternatif yaklaşım ise, spektral ayrıştırma (spectral splitting) olarak bilinen bir yöntemle, güneşten gelen ışınımın PV yüzeyine ulaşmadan önce optik olarak filtrelenmesidir. Bu yöntemde, PV hücrelerin spektral yanıt aralığına karşılık gelen yararlı ışınım geçirgen bir optik ortam aracılığıyla doğrudan hücreye ulaştırılırken, ısıya neden olan termal bileşenler sistemin termal kısmı tarafından absorbe edilerek ısı geri kazanımı sağlanmaktadır. Bu sayede PV hücre sıcaklığı düşürülmekte ve hem elektriksel hem de termal verim artırılabilir. Çalışmada özgün bir görüntüsüz yoğunlaştırıcı (non-imaging concentrator) yapısı ve entegre optik filtre kanalına sahip bir CPVT sistemi tasarlanmakta ve performansı deneysel olarak değerlendirilmektedir. Görüntüsüz yoğunlaştırıcılar, geniş kabul açıları, hem doğrudan hem

de yayılı güneş ışınlamını toplayabilmeleri, takip sistemi gerektirmemeleri ve üniform ışınlam dağılımı sağlamaları gibi avantajlar sunmaktadır. Bu yönüyle sistem, geleneksel parabolik oluklu ya da Fresnel tipi yoğunlaştırıcılara kıyasla daha basit, düşük maliyetli ve uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Önerilen sistemde PV yüzeyine entegre edilen özgün bir optik filtre kanalı aracılığıyla akışkanlar test edilecek; bu akışkanların hem optik geçirgenlikleri hem de termofiziksel özellikleri PV hücrelerin spektral duyarlılığına göre optimize edilecektir. Amaç, sadece yüksek verim sağlamak değil, aynı zamanda maliyeti düşük ve sahada uygulanabilir sistem bileşenleri belirlemektir. Çalışma dört temel adımdan oluşmaktadır: Yoğunlaştırıcı PV/T sistemin ve optik filtre kanalının tasarımı ile ışın izleme analizleri ve optik-termal özelliklerinin belirlenmesi, deneysel sistemin üretimi ve açık alanda gerçek güneş ışınlamı altında performans değerlendirmesi şeklindedir.

Anahtar Kelimeler: Görüntüsüz yoğunlaştırıcı, Güneş enerji sistemleri, optik filtre, spektral ayrıştırma, yoğunlaştırıcı termal fotovoltaik (CPVT)

Bilim Alanı Kodu: 91441

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL AND ELECTRICAL PERFORMANCE OF A CONCENTRATING PHOTOVOLTAIC THERMAL SYSTEM ENHANCED WITH OPTICAL FILTER INTEGRATION

Tayfun ALTIOK

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abid USTAOĞLU

Bartın-2025, pp: 108

Silicon-based photovoltaic (PV) cells can only convert solar radiation within the wavelength range of 370 nm to 1180 nm into electrical energy. Radiation outside this wavelength range, especially the thermal components in the infrared region, causes excessive heating on the PV surface, leading to a decrease in cell efficiency, shortening the long-term cell lifespan, and negatively affecting the overall system performance. In PV-T and CPVT systems, cooling fluids integrated into the rear surface of the PV are used to mitigate this problem by reducing the thermal load. However, this method can create thermal stress in PV cells, leading to micro-cracks and potentially reducing long-term cell durability. The alternative approach proposed in this study is the optical filtering of incoming solar radiation before it reaches the PV surface, a method known as spectral splitting. In this method, beneficial radiation corresponding to the spectral response range of the PV cells is directly transmitted to the cell through a transparent optical medium, while heat-generating thermal components are absorbed by the thermal part of the system, enabling heat recovery. This reduces the PV cell temperature and increases both electrical and thermal efficiency. In this study, a novel non-imaging concentrator structure and a CPVT system with an integrated optical filter channel are designed, and their performance is evaluated experimentally. Non-imaging concentrators offer advantages such as wide acceptance angles, the ability to collect both direct and diffuse solar radiation, no requirement for tracking systems, and uniform radiation

distribution. In this respect, the system offers a simpler, lower-cost, and more applicable solution compared to traditional parabolic trough or Fresnel-type concentrators. In the proposed system, fluids will be tested through a unique optical filter channel integrated into the PV surface; the optical transmittance and thermophysical properties of these fluids will be optimized according to the spectral sensitivity of the PV cells. The aim is not only to achieve high efficiency but also to identify low-cost and field-applicable system components. The study consists of four main steps: design of the concentrating PV/T system and the optical filter channel with ray-tracing analyses and determination of their optical-thermal properties, fabrication of the experimental system, and performance evaluation under real solar irradiation in an outdoor environment.

Keywords: Concentrated photovoltaic thermal (CPVT), non-imaging concentrator, optical filter, solar energy systems, spectral splitting,

Scientific Field Code: 91441

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME.....	iii
YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN BEYAN.....	iv
ÖZET	i
ABSTRACT.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	iii
EKLER DİZİNİ.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	1
1.2. Çalışmanın Önemi.....	4
1.3. Problem Tanımı.....	6
1.4. Çalışmanın Kapsamı ve Sınırları.....	7
1.5. Tez Kapsamında Yapılan Yenilikler.....	8
1.6. Tezin Organizasyonu.....	10
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	12
2.1 Türkiye’de Enerji Üretimi.....	12
2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	14
2.2.1 Güneş Enerjisi.....	15
2.2.2 Güneşin Rolü ve Önemi.....	15
2.2.3 Güneş Enerjisinin Öne Çıkan Üstünlükleri.....	15
2.2.4 Güneş Enerjisinin Ekonomik Potansiyeli.....	16
2.2.5 İklim Politikaları ve Çevre Koruma Bağlamında Güneş Enerjisi.....	16
2.2.6 Güneş Enerjisi Potansiyelimiz (GEPA).....	16
2.3 Fotovoltaik Sistemler.....	19
2.4 Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Termal (CPVT) Sistemler ve Performans Analizi..	22
2.4.1 Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Termal sistemlerin sınıflandırılması.....	23
2.5 Optik Filtreler ve Kullanım Alanları.....	28
2.6 Soğutma Sistemleri ve Termal Yönetim.....	31
2.6.1. PVT ve CPVT Sistemlerinde Soğutma Yöntemlerinin Karşılaştırılması..	32

2.7 Literatürdeki Benzer Çalışmalar ve Boşluklar.....	34
2.8 Araştırma Boşlukları ve Bu Çalışmanın Katkısı.....	35
3. MATERYAL VE METOT.....	37
3.1. Deneyel Sistem Tasarımı ve Bileşenleri.....	37
3.1.1 Deney Sisteminde Kullanılan Cihazların Teknik Bilgisi.....	40
3.2. Optik Filtre Özellikleri.....	44
3.3. Ölçüm Sistemleri ve Kalibrasyonu.....	45
3.3.1 Elektriksel Ölçümler.....	45
3.3.2 Termal Ölçümler.....	46
3.3.3 Güneş Işınımı Ölçümleri.....	46
3.3.4 Veri Toplama ve Kalibrasyon.....	46
3.4. Deney Koşulları ve Prosedürü.....	46
3.5. Kullanılan Akışkanlar ve Termofiziksel Özellikleri.....	48
3.6. Veri Toplama ve Analiz Yöntemi.....	48
3.7. Hata Analizi ve Ölçüm Belirsizliği.....	54
4. BULGULAR.....	56
4.1. Deney Günlerine Ait Meteorolojik Veriler.....	56
4.2. PV Hücre Yüzey Sıcaklıklarının Analizi.....	56
4.3. Elektriksel Performans Analizi.....	57
4.4. Termal Performans Analizi.....	58
4.5. Toplam Sistem Verimliliği.....	59
4.6. Zaman Serisi Analizi ve Günlük Performans.....	60
4.7. İstatistiksel Değerlendirme.....	61
4.8. Optik Filtre Sıcaklığının Elektriksel Performansa Etkisi.....	61
5. TARTIŞMA.....	91
5.1. Elektriksel Performansın Literatür ile Karşılaştırılması.....	91
5.2. Termal Performansın Literatür ile Karşılaştırılması.....	91
5.3. Optik Filtre Tasarımının Etkileri.....	92
5.4. Bulguların Fiziksel Yorumu.....	93
5.5. Sistem Avantajları.....	94
5.6. Sınırlamalar.....	94
5.7. Uygulama Potansiyeli ve Geliştirme Önerileri.....	95
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	97
6.1. Çalışmadan Elde Edilen Temel Bulgular ve Çıkarımlar	97
6.2. Bilimsel ve Endüstriyel Katkıları.....	98

6.3. Gelecek Çalışmalar için Öneriler.....	98
6.4. Sonuç.....	100
KAYNAKLAR.....	102
EKLER.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	107



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı.....	2
1.2: Hibrit (PV/T) güneş paneli.....	3
1.3: Yoğunlaştırıcı fotovoltaiik-termal sistem deney düzeneği.....	4
1.4: Kapalı devre termal bir CPVT sistemin deney düzeneği.....	9
1.5: Deney düzeneğinin termal kamera görüntüsü.....	9
2.1: Sektörlere göre dünya toplam enerji tüketiminin dağılımı ve modern yenilenebilir enerjinin (YE) ilgi sektör içindeki oranları.....	12
2.2: 2024 yıl sonu itibarıyla Türkiye elektrik üretimi.....	13
2.3: Yenilenebilir enerji kaynakları.....	14
2.4: Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m ² -gün).....	17
2.5: Türkiye güneşlenme süreleri (saat).....	17
2.6: Türkiye PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (kWh-yıl).....	18
2.7: Güneş enerjisi potansiyel atlası.....	18
2.8: Fotovoltaiik pilin genel gösterimi ve çalışma ilkesi.....	19
2.9: Fotovoltaiik hücre, modül ve diziler.....	20
2.10: Fotovoltaiik Hücre Üzerinde Sıcaklığın Etkisi.....	22
2.11: Yoğunlaştırıcı güneş toplayıcıları.....	23
2.12: Yoğunlaştırmalı fotovoltaiik termal (CPVT) sistemlerin sınıflandırılması.....	26
2.13: Basit(tipik) CPVT sistem bileşenleri.....	27
2.14: Solar fotovoltaiik (PV) toplam kapasitesi (GW) grafiği ile yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemleri toplam kapasitesi (GW)'nin yıllara göre değişimi.....	28
2.15: Optik filtrelerin dalga boyu geçirgenlik aralıkları.....	29
2.16: Spektrum dalga boyu ve güneş hücresi çalışma aralığı gösterimi.....	31
3.1: Kapalı çevrim termal sistem PV yatağı bileşenleri.....	38
3.2: Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik diyagramı.....	39
3.3: PV-PVT-CPVT sistem deney düzeneği gerçek görünümü.....	40
3.4: Kullanılan PV panel görseli.....	41
3.5: Peristaltik pompa görseli.....	41
3.6: Piranometre Cihazı.....	42
3.7: Veri kaydedici.....	43
3.8: Ölçüm Devre Kutusu.....	43

3.9: Termokupl (Pt100).....	44
4.1: PVT ve PV sistem deneyinin şematik diyagramı.....	63
4.2: PVT ve PV sistem dış ortam deney fotoğrafı.....	64
4.3: Deneyde kullanılan saf suyun güneş spektrumu (280-2500 nm) içindeki dalga boyuna bağlı geçirgenlik (transmisivite) değerleri.....	65
4.4: Global, direkt ve difüz ışıınım değerleri (a), giriş, çıkış ve çevre sıcaklıkları (b), PVT sistemin akışkan çıkış ve giriş sıcaklıkları arasındaki fark (c) ile PVT sistemin termal performansı (d).....	67
4.5: PV ve PVT sistemlerine ait kısa devre akımı (a) ve açık devre gerilimi (b), akım (c), gerilim (d), elektriksel güç üretimi (e) ve elektriksel verimlilik (f).....	69
4.6: PV ve PVT sistemlerin toplam verimleri.....	70
4.7: İkinci modelimiz olan deneysel düzeneğin şematik diyagramı.....	72
4.8: İkinci modelimiz olan deneysel düzeneğin fotoğrafı.....	74
4.9: Küresel, direkt ve yayınlık güneş ışıınımı.....	75
4.10: Kısa devre akımı (I_{sc}) (a), açık devre gerilimi (V_{oc}) (b) ve I_{sc} ile V_{oc} esas alınarak hesaplanan maksimum güç üretimi (c).....	76
4.11: CPVT, PVT ve PV sistemlerinin Q_{th} (a) ve toplam güç üretimi (b).....	76
4.12: Deney düzeneğinin şematik diyagramı (a) ve PVT ile CPVT modüllerinin kesit görünümü (b).....	80
4.13: Deneysel düzeneğin ve ölçüm değerleri ekran fotoğrafı.....	81
4.14: 150 ml/dak için CPC-PVT ve PVT sistemlerinin küresel, doğrudan ve dağınık radyasyonu (a), giriş, çıkış ve ortam sıcaklıkları (b), faydalı termal gücü (c) ve termal verimliliği (d).....	81
4.15: 150 ml/dak debi durumunda CPC-PVT ve PVT sistemlerinin kısa devre koşulundaki akımı (a), açık devre koşulundaki gerilimi (b), akımı (c), gerilimi (d), güç üretimi (e) ve elektriksel verimliliği (f).....	85
4.16: CPC-PVT ve PVT sistemlerin toplam verimliliği.....	87
4.17: CPC-PVT ve PVT sistemlerin basit geri ödeme süreleri.....	88
4.18: CPC-PVT ve PVT sistemlerin toplam sahip olma maliyeti.....	88
4.19: CPC-PVT ve optik filtreli PVT'nin elektrik, termal ve toplam güç üretimi (kWh)....	89

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
2.1: Türkiye'nin aylık bazda ortalama Global radyasyon değerleri (kWh/m ² gün).....	19
2.2: Farklı Fotovoltaik Hücre Türlerinin Yapısal Görünümü ve Özellik Karşılaştırması.....	21
2.3: Soğutma yöntemlerinin karşılaştırılması.....	33
2.4: CPVT Sistemlerinin Klasik PV ve PVT Sistemlerine Göre Karşılaştırması.....	35
3.1: PV Panel Teknik Özellik Tablosu.....	41
3.2: Peristaltik pompa özellik tablosu.....	42
3.3: Ölçüm Cihazları ve Belirsizlik Değerleri.....	54
4.1: Filtreli ve filtresiz CPVT sistemlerde gün ortası (12:00-13:00) anlık elektriksel güç ve pv hücre sıcaklığı karşılaştırması.....	58
4.2: Termal performans karşılaştırması.....	59
4.3: Toplam sistem verimliliği karşılaştırması.....	60

EKLER DİZİNİ

Ek	Sayfa
No	No
Ek 1. Yapay zekâ kullanım tablosu.....	106



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\dot{m}$	: Kütlesel debi (kg/s)
C_p	: Akışkanın özgül ısısı (J/kg·K)
T_{out}	: Çıkış sıcaklığı (°C veya K)
T_{int}	: Giriş sıcaklığı (°C veya K)
A	: Azimut açısı
A_a	: Yoğunlaştırıcının alıcı kısmı
A_c	: Yoğunlaştırıcının açıklık kısmı
C	: Yoğunlaşma oranı
C_{tr}	: V-oluk tipi yoğunlaştırıcının yoğunlaştırma oranı
E_J	: Eksa joule
eV	: Elektronvolt
IR	: Kızılötesi ışın
H	: Reflektörün yüksekliği
h	: Reflektörün eğik yüksekliği
$\dot{V}_f$	: Hacimsel debi
I_g	: Güneş hücresi akımı
I_{maxP}	: Maksimum güç noktası akımı
ISC	: Kısa devre akımı
η_{th}	: Termal Verimlilik
η	: Verim
λ	: Dalga boyu
P_{maxP}	: Maksimum güç değeri
r	: Güneş ışını vektörü
s	: Kollektör düzleminin yatayla yaptığı eğim açısı
V_{maxP}	: Maksimum güç noktası gerilimi
VOC	: Açık devre gerilimi
W_{abs}	: Yoğunlaştırıcının yutucu düzleminin genişliği
W_{ape}	: Yoğunlaştırıcının açıklık düzleminin genişliği
Z	: Başucu yüksekliği
α	: Güneş ışınlarının yatay düzlemle yaptığı açı
Q_{th}	: Isıl Güç

KISALTMALAR

CPC	: Birleşik Parabolik Yoğunlaştırıcı
CPV	: Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Sistem
CPV/T	: Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Termal Sistem
PV	: Fotovoltaik
PV/T	: Fotovoltaik Termal Sistem
CPVT	: Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Termal Sistem
PVP	: Fotovoltaik Pompa Sistemleri
PVS	: Fotovoltaik Sistem
CPV	: Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Sistem
ISC	: Kısa Devre Akımı
CIGS	: Bakır İndiyum Galyum Selenid
CdTe	: Kadmiyum Tellur
AL ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
MATLAB	: Matris Laboratuvarı
LCOE	: Dengelenmiş Enerji Maliyeti
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
İRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
SPSS	: Sosyal Bilimler İçin İstatistik Paketi
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası

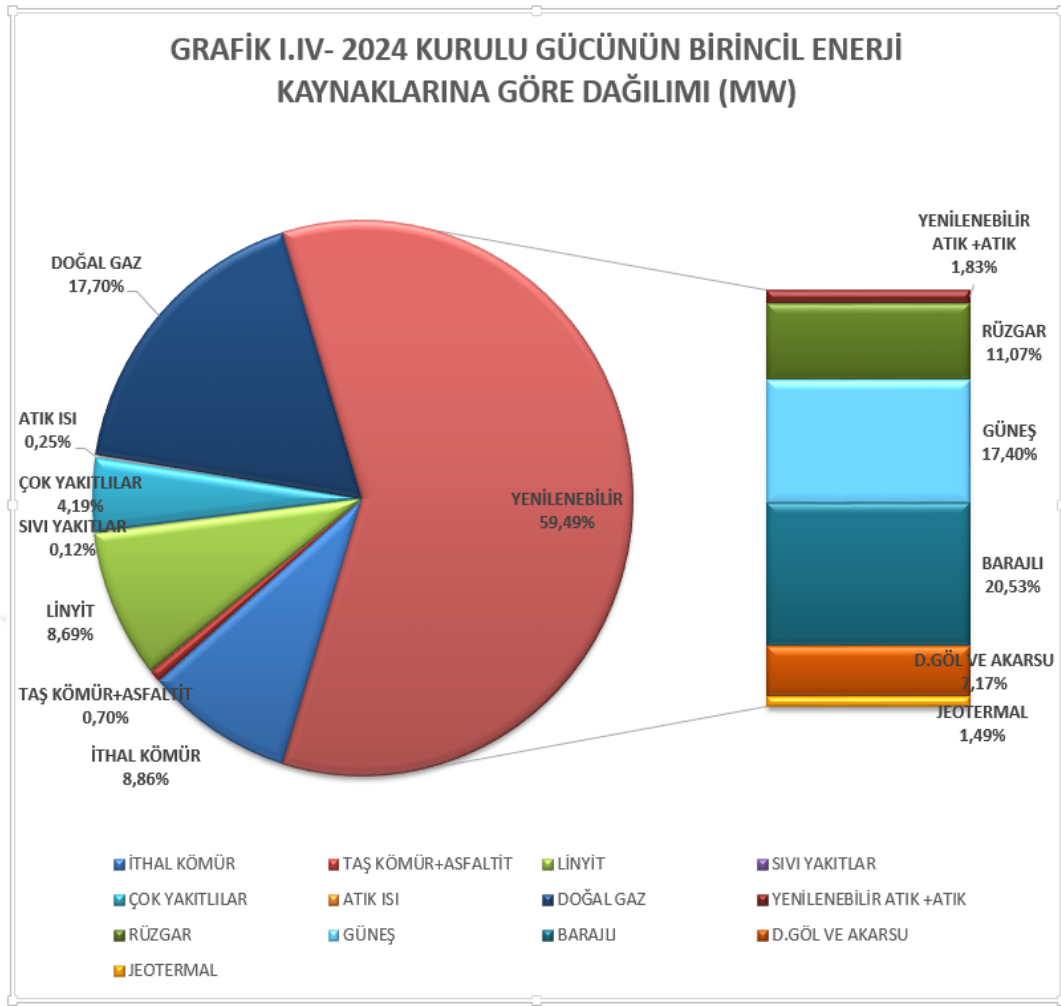
1. GİRİŞ

Giriş bölümü, çalışmanın genel çerçevesini sunmak amacıyla altı alt başlık altında yapılandırılmıştır. Bu bölümde ele alınan konular, çalışmanın kapsamını ve amacını ortaya koyacak şekilde aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

1.1 Çalışmanın Amacı

Günümüzde artan enerji talebi, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve çevresel sorunlar, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarının önemini her zamankinden daha fazla ortaya koymaktadır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ve kullanımı gün geçtikte artmaktadır. Tablo 1.1’de 2024 yılı için Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımının yüzdesel verileri yer almaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli yer sahip olan güneş enerjisi; çevre dostu ve tükenmeyen yapısı sayesinde küresel enerji dönüşümünün temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Güneş enerjisinden elektrik üretiminde kullanılan fotovoltaik (PV) teknolojiler, son yıllarda maliyetlerinin düşmesi, verimliliklerinin artması ve farklı uygulama alanlarında yaygınlaşması nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Artan uygulama alanı bulan fotovoltaik (PV) panellerin verimsiz çalışma durumları da uygulamada karşılaşılan eksikliklere konu olmuştur. PV panellerin verimliliği, panel yüzey sıcaklığının artmasıyla düşmekte; bu durum özellikle yüksek güneşlenme ve sıcaklık değerlerine sahip bölgelerde önemli bir performans kısıtı oluşturmaktadır.



Şekil 1.1: Türkiye kurulu gücünün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı (TEİAŞ, 2025)

Bu sorunun aşılabilmesi için PV sistemlerin hem elektriksel hem de termal enerjiyi birlikte üretebilen Şekil 1.2’de görseli yer alan hibrit yapılar geliştirilmiştir. Bunlardan biri olan Fotovoltaik-termal (PVT) sistemler, PV hücrelerin arka yüzeyinde dolaştırılan bir akışkan aracılığıyla ısının uzaklaştırılması ve bu sayede hem elektriksel verimin korunması hem de elde edilen ısının farklı uygulamalarda kullanılmasını sağlamaktadır. PVT sistemlerin daha da geliştirilmiş bir versiyonu olan yoğunlaştırıcı fotovoltaik-termal (CPVT) sistemler ise optik yoğunlaştırıcı elemanlar kullanarak güneş ışığını PV hücre üzerine daha fazla odaklamakta, böylece birim hücre alanından daha yüksek güç üretimi sağlamaktadır. Bununla birlikte, yoğunlaştırma oranının artması, PV hücre sıcaklığının daha fazla ve hızlıca yükselmesine neden olmakta bu durumda daha da etkin bir soğutma mekanizması gerekliliğini ortaya koymaktadır.



**Panelin altında kalan, akışkanın dolaştığı
Termal Kısım**



**Termal kısmın üzerinde bulunan
Fotovoltaik Kısım**

Şekil 1.2: Hibrit (PV/T) güneş paneli

Günümüzde farkındalığı oluşan diğer bir sistem ise optik filtre teknolojileridir. Bu teknoloji CPVT sistemlerde hem hücrelere ulaşan tayfsal bileşimi optimize etmek hem de ısı yükü azaltmak amacıyla son yıllarda öne çıkan bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Optik filtreler, güneş spektrumundaki belirli dalga boylarını PV hücreye yönlendirirken, diğer dalga boylarını geçirerek veya yansıtarak termal toplayıcıya iletir. Bu sayede hücre sıcaklığı düşürülürken, aynı anda yüksek kaliteli termal enerji üretimi de mümkün hale gelir. Özellikle sıvı bazlı optik filtreler, kolay uygulanabilirlikleri, maliyet avantajları ve spektral geçirgenliklerinin ayarlanabilir olması nedeniyle araştırmalarda yoğun olarak ele alınmaktadır.

Türkiye'nin yüksek güneşlenme süresine ve farklı iklim koşullarına sahip olması, CPVT sistemlerin saha uygulamaları için uygun bir ortam sunmaktadır. Ancak, literatürde bu sistemlerin optik filtre entegrasyonu ile birlikte termal ve elektriksel performansının deneysel olarak incelendiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Uygulama sonuçlarını fayda zarar ilişkisi içerisinde değerlendirebilmek ve uygulama alanında daha doğru tercihlere erişebilmek adına bu kapsamdaki deneysel çalışmaların yapılması ihtiyaç durum haline gelmiştir. Ayrıca bu durum, söz konusu teknolojinin yerel koşullarda verimlilik, maliyet ve sürdürülebilirlik açısından potansiyelini ortaya koyacak araştırmaların gerekliliğini de ortaya koymaktadır. Bu ihtiyaçlar üzerine çalışma amacımız oluşmuştur.

Bu tez çalışmasında, Şekil 1.3'te deney düzeneği görseli bulunan optik filtre entegrasyonu ile geliştirilmiş bir CPVT sistemin termal ve elektriksel performansı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan optik filtreler, spektral geçirgenlik özellikleri dikkate alınarak seçilmiş ve sistemin farklı çalışma koşullarındaki performans parametreleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Alishılmışın dışında termal sistem aynı zamanda optik filtre görevini üstlendiğinden elde edilen sonuçlar optik filtreli CPVT sistemlerin yüksek sıcaklık koşullarında verimlilik artırma potansiyelini ortaya koyarken, aynı zamanda literatürdeki mevcut eksikliklerin çözümü noktasında farkındalık katmakta ve bu eksikliklerin giderilmesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 1.3: Yoğunlaştırıcı fotovoltaik-termal sistem deney düzeneği

1.2 Çalışmanın Önemi

Günümüzde küresel enerji ihtiyacındaki artış ve fosil yakıtların çevresel etkileri, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarının geliştirilmesini kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu bağlamda, kaynak bazında yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip alan güneş enerjisi; yenilenebilir, sınırsız ve çevre dostu yapısıyla enerji dönüşüm teknolojilerinde öncelikli bir konuma sahiptir. Bu dönüşümde görevi üstlenen temel

ekipman olan fotovoltaik (PV) sistemler, güneş enerjisinden doğrudan elektrik üretimi sağlayan temel teknolojilerden biri olmakla birlikte, söz konusu dönüşüm aşamasında güneş ışınımının büyük bir kısmı PV hücrelerde ısıya dönüşmekte ve bu durum hücre sıcaklığının artmasına neden olarak elektriksel verimliliği olumsuz yönde etkilemektedir. Hücre sıcaklığındaki her 1°C'lik artış, çoğu PV teknolojisinde yaklaşık %0.3 ila %0.5'lik verim kaybına yol açmaktadır. Bu nedenle, PV sistemlerin termal yönetimi; sistem performansı, ömür beklentisi ve enerji dönüşüm verimliliği açısından kritik bir gereklilik haline gelmiştir.

Mevcut literatürde, CPVT sistemlerde yoğunlaştırma elemanları, optik filtreler veya soğutma tekniklerinin ayrı ayrı etkileri sıkça incelenmiş olsa da, bu çalışmada sistem performansının soğutma sıvısı sıcaklığıyla eş zamanlı olarak değerlendirilmesi, deneysel düzeyde sistematik bir analizle ortaya konmuştur. Bu yönüyle, çalışmanın özgün katkısı; optik filtre, yoğunlaştırıcı ve sıvı soğutma bileşenlerinin birlikte entegre edildiği bir CPVT sistemde, elektriksel ve termal verimliliğin bir bütün olarak değerlendirilmesidir. Ayrıca, sistemin performans parametrelerinin sıcaklıkla olan ilişkisi hem teorik bilgilerle hem de deneysel verilerle desteklenerek, PV hücre termodinamiğine dair daha derinlemesine veriler kaydedilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma yalnızca akademik literatüre katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yüksek verimli hibrit güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonuna yönelik mühendislik uygulamaları açısından da doğrudan yol gösterici niteliktedir. Özellikle düşük ve orta sıcaklık aralıklarında elde edilen yüksek verim değerleri, bu tür sistemlerin yerleşim alanları, endüstriyel tesisler ve kırsal bölgelerde uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Bu çalışma, geleneksel PV sistem mimarisinden farklı olarak, optik filtre entegreli fotovoltaik-termal (PVT) bir sistemin tasarımı ve deneysel incelenmesi ile ön plana çıkmaktadır. Sisteme entegre edilen spektral seçici optik filtreler, yalnızca PV hücrenin aktif tepki verdiği dalga boylarını yüzeye ileterek, geri kalan spektrumu termal toplama amacıyla yönlendirmektedir. Bu çalışmamızı bilinen termal ve optik filtreli sistemlerden ayıran temel kısmı bu durumdur. Bu spektral ayırım sayesinde, hücre üzerindeki termal yük azalmakta ve daha düşük işletme sıcaklıkları elde edilerek elektriksel verim artırılmaktadır. Ayrıca, hücreden uzaklaştırılan ısı enerjisi dolaşan soğutma sıvısı vasıtasıyla kazanılarak, sistemin

toplam enerji çıktısına katkı sunulmaktadır. Söz konusu bu hibrit yaklaşım, CPVT (Konsantre Fotovoltaik Termal) sistemlerde enerji kullanım etkinliğini artırarak, sistem performansının iyileştirilmesine yönelik önemli bir potansiyel sunmaktadır.

1.3 Problem Tanımı

PV panellerin verimliliği, panel yüzey sıcaklığının artmasıyla azalmakta; yoğunlaştırma teknolojilerinde bu sıcaklık artışı daha belirgin hale gelmektedir. CPVT sistemlerde etkin bir soğutma ve tayfsal yönetim sağlanamadığında hem verimlilik hem de bileşen ömrü olumsuz etkilenmektedir. Bu problem, optik filtre teknolojileriyle çözülebilecek kritik bir mühendislik sorunu olarak tanımlanmaktadır.

Geleneksel fotovoltaik (PV) sistemlerin enerji dönüşüm verimliliği, özellikle hücre sıcaklığındaki artışa bağlı olarak önemli ölçüde azalmakta ve bu durum yüksek sıcaklık ortamlarında sistem performansını olumsuz etkilemektedir. PV hücre sıcaklığının yükselmesi, kısa devre akımı (ISC) ve açık devre gerilimi (VOC) gibi temel elektriksel parametrelerde düşüşlere yol açmakta, dolayısıyla toplam elektriksel verimlilikte anlamlı azalmalar gözlenmektedir. Ayrıca, konvansiyonel PV panellerin dış ortamla doğrudan temas halinde olması, ortam koşullarına bağlı olarak değişken ve genellikle yetersiz bir taşınım (konveksiyon) soğutması sağlamaktadır. Bu soğutma yetersizliği, özellikle güneş ışınımının yoğun olduğu saatlerde hücre sıcaklığının hızla yükselmesine sebep olmakta ve enerji üretim kapasitesini kısıtlamaktadır.

Optik filtre entegreli fotovoltaik-termal (CPVT) sistemler, bu problemlere karşı geliştirilmiş olup, hem elektriksel hem de termal enerji üretimini optimize etmeyi hedeflemektedir. Ancak, bu sistemlerde dolaşan soğutma akışkanının sıcaklık kontrolü kritik bir parametredir; çünkü akışkan giriş sıcaklığının artması, sistemin soğutma performansını düşürmekte, bunun sonucu olarak hücre sıcaklığı artmakta ve kısa sürede akım, gerilim ile genel verimde ani düşüşlere neden olmaktadır. Ayrıca, PVT sistemlerin verimliliği, akışkan sıcaklığına bağlı olarak değişen ısı transfer mekanizmalarına ve optik filtrelerin spektral özelliklerine duyarlıdır. Bu nedenle, yüksek verimlilik için akışkan sıcaklığının optimal kontrolü, sistemdeki ısı ve ışınım yönetiminin faydalı sonuçlarını olumlu etkilemektedir.

Tanımlamış olduğumuz bu sorunları ortadan kaldıracı adıma, bu çalışmamızda, optik filtre entegreli PVT sistemlerin elektriksel ve termal performansları deneysel olarak analiz edilerek, soğutma akışkanının sıcaklığının sistem üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiş ve toplam enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik uygulamalar araştırılmıştır.

1.4 Çalışmanın Kapsamı ve Sınırları

Bu çalışma, optik filtre entegreli konsantre fotovoltaik-termal (PVT) sistemlerde optik filtre entegrasyonu ve sıvı soğutma yöntemlerinin elektriksel ve termal performans üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemektedir. Özellikle, spektral selektif optik filtrelerin PV hücrelerine gelen güneş ışınım spektrumunu optimize ederek elektriksel verimliliği artırırken aynı zamanda akışkan sıcaklığının kontrolü yoluyla panel yüzey sıcaklığının azaltılmasını sağlayarak hem elektriksel hem de termal performansın iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, peristaltik pompa ile sağlanan kapalı devre su dolaşımı sayesinde panel sıcaklığının stabilizasyonu sağlanmış ve böylece hücre sıcaklığının elektriksel parametreler üzerindeki olumsuz etkileri minimize edilmiştir. Sistem performansının değerlendirilmesinde, kısa devre akımı (ISC), açık devre gerilimi (VOC), elektriksel güç çıkışı ve termal enerji kazancı gibi kritik parametreler detaylı şekilde ölçülmüş ve analiz edilmiştir.

Yalnız, deneyler kısa süreli (günlük) ölçümlere dayandığından sistemin uzun vadeli performansı, dayanıklılığı, malzeme bozulmaları ve çevresel faktörlerin etkileri kapsamlı şekilde ele alınmamıştır. Bu da, özellikle yıllık bazda enerji verimliliği değerlendirmeleri ve sistem optimizasyonu açısından bir sınırlılık teşkil etmektedir. Söz konusu kısıtlamalar doğrultusunda, çalışma sonuçları daha çok sistemin anlık ve günlük performansını yansıtmaktadır. Araştırma, belirli iklim koşullarında, sınırlı yoğunlaştırma oranları ve belirli filtre malzemeleri ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamı dışında kalan unsurlar arasında farklı yoğunlaştırma teknolojileri ve alternatif soğutma yöntemleri yer almaktadır.

Sonuç olarak, bu araştırma optik filtre ve sıvı soğutma entegrasyonunun PVT sistemlerde performans iyileştirmesi için kritik parametreler olduğunu deneysel verilerle ortaya koymakta, elektriksel ve termal verimlilik artışının mekanizmalarını detaylı şekilde incelemekte ve fotovoltaik-termal sistemlerin tasarımında bu yaklaşımların önemini

vurgulamaktadır. Literatürde bu alanın halen gelişmekte olması, çalışmanın deneysel katkılarını değerli kılmakta ve gelecekte genişletilmiş deneysel ve simülasyon temelli çalışmalarla sistem optimizasyonuna temel oluşturmaktadır.

Çalışmanın deneysel kısmı, belirli coğrafi koordinatlar (Bartın Üniversitesi, 41.6°K, 32.3°D) ve meteorolojik koşullar altında, tekil bir günün güneş ışıınım profili kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, sonuçların genelleştirilmesi, farklı iklimsel ve coğrafi koşullarda sistem davranışının değişkenlik gösterebileceği gerçeğiyle sınırlıdır. Ayrıca, çalışma kapsamında kullanılan soğutma akışkanı olarak yalnızca saf su tercih edilmiş ve akışkan debisi sabit tutulmuştur. Farklı soğutma akışkanları, değişken debiler veya aktif soğutma tekniklerinin sistem performansına etkileri bu çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Spektral filtre tasarımıda ise tek tip bir filtre kullanılmış olup, farklı spektral geçirgenlik özelliklerine sahip filtrelerin performans karşılaştırmaları da ileriki araştırmalar için potansiyel çalışma alanı olarak not edilmiştir.

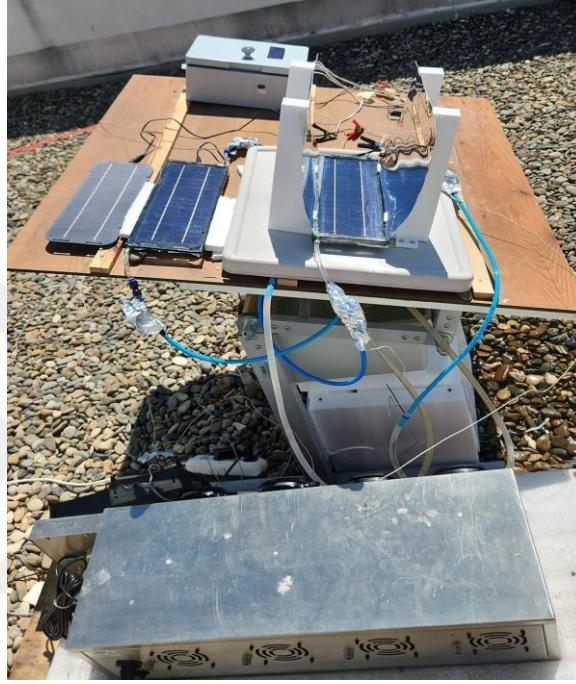
1.5 Tez Kapsamında Yapılan Yenilikler

- a) Sıvı bazlı optik filtre entegrasyonunun CPVT sistemlere uygulanması
- b) Optik filtre entegrasyonunun aynı zamanda termal bir yapı sistemini oluşturması
- c) Yerel iklim koşullarında saha testleri ile performans değerlendirmesi
- d) Elektriksel ve termal verimlilik parametrelerinin birlikte analiz edilmesi

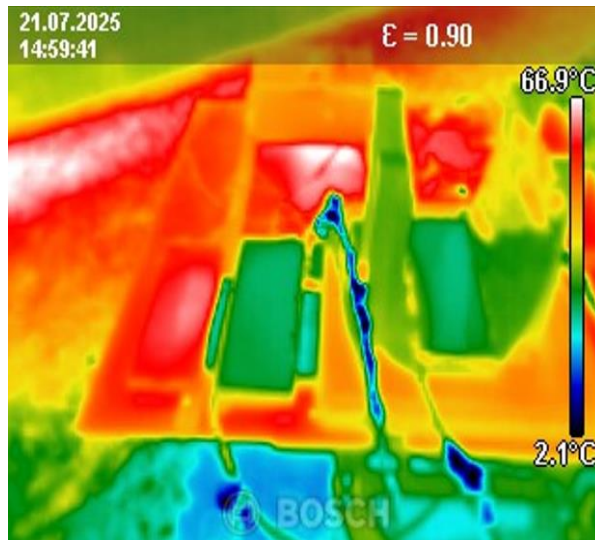
Bu tez çalışması, fotovoltaiik (PV) ve fotovoltaiik termal (PVT) sistemlerin performansını artırmaya yönelik çok boyutlu bir yaklaşım benimseyerek, optik filtre entegreli konsantre fotovoltaiik termal (CPVT) sistem tasarımını geliştirmiştir. Literatürde genellikle PV ve PVT sistemler ayrı ayrı veya sınırlı entegrasyonlarla ele alınırken, bu çalışmada spektral seçicilik sunan optik filtrelerin, compound parabolic concentrator (CPC) ile birlikte kullanılması sağlanmıştır. Bu sayede, güneş ışıınının elektriksel olarak verimli dalga boyları yoğunlaştırılırken, yüksek enerjili ve ısı yük getiren dalga boylarının hücrelerden uzaklaştırılmasıyla ısı stresi minimize edilmiştir. Böylece PV hücre sıcaklıkları önemli ölçüde düşürülmüş ve elektriksel verimlilik üzerinde olumlu etkiler sağlanmıştır.

Buna ek olarak, Şekil 1.4'te yer alan kapalı devre termal bir CPVT deney düzeneği görselinde yer alan kapalı devre bir sistemde dolaşan akışkan olarak saf su kullanılmış ve

bu akışkanın sıcaklığı kontrol altında tutularak Şekil 1.5’te görüntülediği üzere panel yüzey sıcaklığının düşürülmesi sağlanmıştır. Bu yöntem, yüksek sıcaklıkların yol açtığı verim düşüşlerinin önüne geçmekle kalmayıp, aynı zamanda termal enerjinin etkin toplanmasına da imkan vermiştir. Çalışmanın özgünlüğü, optik, termal ve elektriksel performans parametrelerinin eş zamanlı ve entegre şekilde değerlendirilmesinde yatmaktadır. Bu yaklaşım, sistem performansını bütüncül olarak iyileştirme hedefiyle tasarlanmıştır.



Şekil 1.4: Kapalı devre termal bir CPVT sistemin deney düzeneği



Şekil 1.5: Deney düzeneğinin termal kamera görüntüsü

Deneysel veriler ışığında, optik filtre ve CPC'nin kombinasyonunun sistem üzerindeki sinerjik etkisi ortaya konmuş, böylece sadece elektriksel verimde değil, aynı zamanda termal enerji üretiminde de anlamlı artışlar sağlanmıştır. Ayrıca, akışkan sıcaklığının sistem üzerindeki kritik rolü detaylı olarak incelenmiş, bu sayede farklı işletme koşullarında sistemin stabil ve yüksek performansta çalışması için gerekli kontrol parametreleri belirlenmiştir.

Literatürde çoğunlukla tek bir performans kriteri veya sistem bileşeni üzerinde durulurken, bu tez hem optik konsantrasyon hem de spektral filtrasyonun avantajlarını birleştirerek, kompleks fakat etkin bir çözüm ortaya koymaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım sayesinde, CPVT sistemlerin ticari ve endüstriyel uygulamalarda verimliliğini artırarak, sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamak mümkün olacaktır.

Bu tez kapsamında geliştirilen deney düzeneğinde; optik, termal ve yoğunlaştırıcı bileşenlerin bütüncül bir yaklaşımla entegrasyonu sağlanarak, hem termal hem de elektriksel verimlilik açısından yüksek performanslı bir güneş enerjisi dönüşüm sistemi ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlarla, CPVT sistemlerin literatürdeki mevcut çalışmalarına yenilikçi bir katkı sunulması amaçlanmaktadır.

1.6 Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması, fotovoltaik ve fotovoltaik-termal sistemlerin performans analizine yönelik deneysel ve teorik yaklaşımları sistematik şekilde ele almak amacıyla yapılandırılmıştır.

Bölüm 1 Giriş bölümünde çalışmanın amacı, kapsamı, önemi ve dayandığı bilimsel gerekçeler açıklanmış; araştırmanın temel hedefleri ve özgün katkıları ortaya konmuştur.

Bölüm 2 Literatür Taraması kısmında ise CPVT sistemler, optik yoğunlaştırıcılar, spektral filtreler ve soğutma tekniklerine ilişkin literatürdeki güncel çalışmalar değerlendirilmiştir.

Bölüm 3 Materyal ve Metot kısmında ise Deney düzeneği, kullanılan malzemeler, ölçüm sistemleri ve uygulanan yöntemler ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Optik filtre entegrasyonuna dair teknik detaylar da yer almaktadır.

Bölüm 4 – Bulgular kısmında Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen elektriksel ve termal verimlilik bulguları grafik ve tablolar eşliğinde analiz edilmiştir.

Bölüm 5 – Tartışma bölümünde ise elde edilen sonuçlar mevcut literatürle karşılaştırmalı olarak ele alınmış; sonuçların anlamı ve sistem performansı üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Bölüm 6 – Sonuç ve Öneriler kısmında ise Tez çalışmasının genel sonuçları özetlenmiş, sistemin uygulama potansiyeli değerlendirilmiş ve ileri çalışmalar için öneriler sunulmuştur.



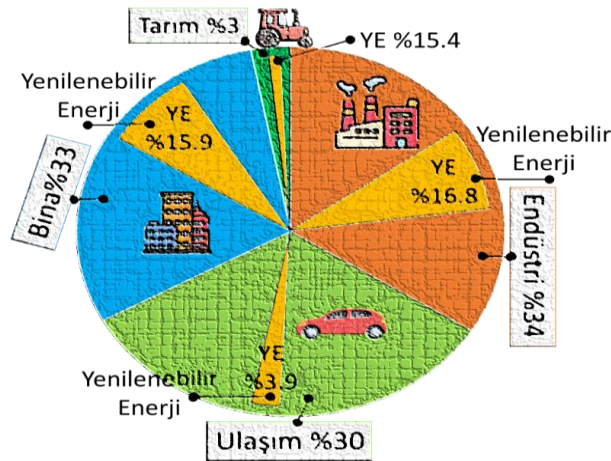
2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür taraması bölümü, çalışmanın bilimsel altyapısını oluşturmak amacıyla sekiz alt başlık altında ele alınmıştır. Bu bölümde, konuya ilişkin önceki çalışmalar sistematik olarak incelenmiş ve ele alınan konular aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

2.1 Türkiye’de Enerji Üretimi

Türkiye’de enerji üretimi, artan nüfus, sanayileşme ve kentleşmeye paralel olarak sürekli bir gelişim göstermektedir. Enerji talebindeki bu artış, ülkenin enerji arz güvenliğini stratejik bir konu hâline getirmiştir. Türkiye, enerji kaynakları açısından sınırlı fosil yakıt rezervlerine sahip olmasına rağmen, coğrafi konumu ve doğal özellikleri sayesinde önemli bir yenilenebilir enerji potansiyeline sahiptir.

Türkiye’nin elektrik enerjisi üretiminde kullanılan başlıca kaynaklar; kömür, doğal gaz, hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle enerjisidir. Uzun yıllar boyunca enerji üretiminde doğal gaz ve ithal kömür önemli bir paya sahip olmuş, bu durum enerji ithalatına olan bağımlılığı artırmıştır. Ancak son yıllarda uygulanan enerji politikaları doğrultusunda yerli ve yenilenebilir kaynakların elektrik üretimindeki payı giderek yükselmektedir. Bu bilgi paralelinde sektörlere göre dünya toplam enerji tüketiminin dağılımı ve modern yenilenebilir enerjinin (YE) ilgi sektör içindeki oranları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

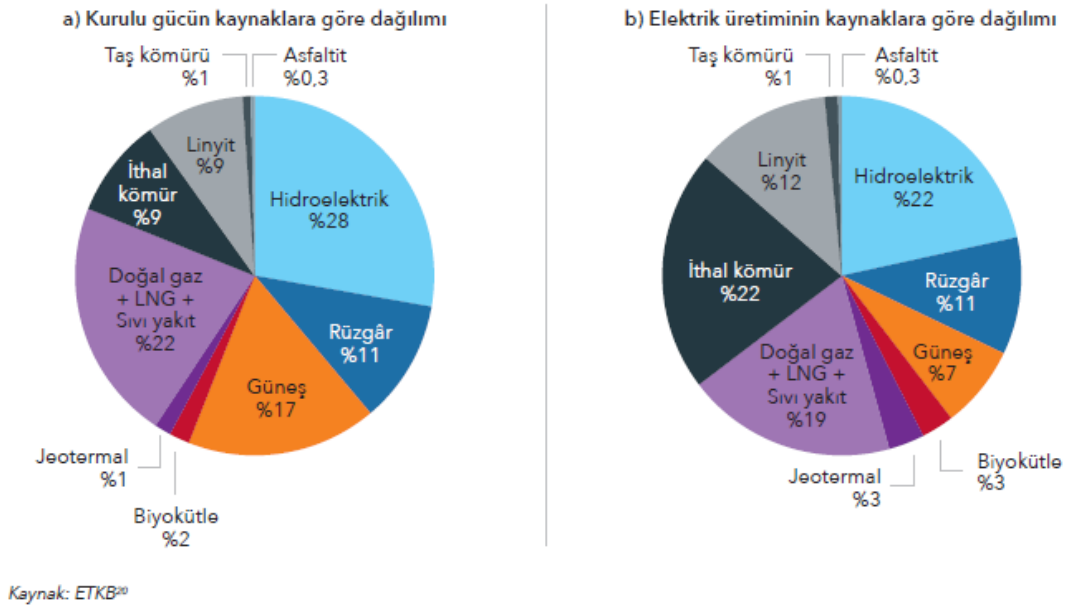


Şekil 2.1: Sektörlere göre dünya toplam enerji tüketiminin dağılımı ve modern yenilenebilir enerjinin (YE) ilgi sektör içindeki oranları (Ustaoglu ve Sungur, 2026)

Hidroelektrik enerji, Türkiye’de yenilenebilir enerji üretiminin temel bileşenlerinden biridir. Ülkenin akarsu potansiyeli, özellikle Doğu Anadolu ve Karadeniz bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Rüzgâr enerjisi ise Ege, Marmara ve Akdeniz bölgelerinde yüksek kapasite faktörlerine sahiptir. Güneş enerjisi açısından Türkiye, yıllık ortalama güneşlenme süresi bakımından Avrupa ülkelerinin büyük bir kısmına kıyasla avantajlı bir konumdadır. Bu durum, fotovoltaik ve güneş termal sistemlerin yaygınlaşmasını desteklemektedir.

Jeotermal enerji potansiyeli bakımından Türkiye, Avrupa’da üst sıralarda yer almakta olup özellikle Batı Anadolu bölgesi bu kaynak açısından öne çıkmaktadır. Biyokütle enerjisi ise tarımsal atıklar, hayvansal atıklar ve organik belediye atıkları yoluyla değerlendirilebilen, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayan bir enerji türü olarak dikkat çekmektedir.

Sonuç olarak, Şekil 2.2’de yer alan grafikte belirtildiği üzere Türkiye’de enerji üretim yapısının fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru kademeli bir dönüşüm süreci içerisinde. Bu dönüşüm, hem enerji arz güvenliğinin artırılması hem de çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanımı, Türkiye’nin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında kilit bir rol oynamaktadır.



Şekil 2.2: 2024 yıl sonu itibarıyla Türkiye elektrik üretimi (EPDK, 2025)

2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğanın kendini sürekli yenileme süreci sayesinde her yeni günde aynı şekilde mevcut olan enerji türleri olarak tanımlanmaktadır. Bu kaynakların en önemli özellikleri arasında, karbondioksit emisyonlarını azaltarak çevresel korumaya katkı sağlamaları, yerli enerji potansiyeli olmaları sebebiyle dışa bağımlılığı azaltmaları ve istihdam olanaklarını artırmaları yer almaktadır. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynakları toplum tarafından geniş çapta kabul görmekte ve güçlü bir kamuoyu desteğine sahiptir. Başka bir ifadeyle, yenilenebilir enerji kaynakları; ulaşılabilirlik, mevcudiyet ve kabul edilebilirlik gibi temel özellikleri bünyelerinde barındırmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları olarak Şekil 2.3'te görselleştirilen hidroelektrik (gelgit ve dalga enerjisi) , jeotermal, güneş, rüzgar, biyokütle (odun ve bitki atıkları), kabul edilmektedir.



Şekil 2.3: Yenilenebilir enerji kaynakları (IEA, 2025)

2.2.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, Güneş'in çekirdeğinde gerçekleşen hidrojenin helyuma dönüşümüyle açığa çıkan füzyon reaksiyonlarına bağlı ısıma enerjisidir. Yaklaşık $3,9 \times 10^{26}$ watt güç üreten Güneş, temiz ve tükenmez bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Güneş'ten yayılan bu enerjinin sadece çok küçük bir kısmı Dünya'ya ulaşmakta olup, atmosferin dış sınırındaki her bir metrekareye ortalama 1367 wattlık bir enerji düşmektedir. Atmosfer, gelen bu ışımanın bir bölümünü, özellikle X-ışınları ve ultraviyole ışınları, emmekte; kalanını ise yansıtmaktadır. Elektrik üretiminde güneş enerjisinden yararlanmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiş olmakla birlikte, günümüzde en yaygın ve etkin yaklaşım, güneş ışığını doğrudan elektrige dönüştüren fotovoltaik sistemlerdir. Güneş enerjisinin kullanımı özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış; teknolojik gelişmeler ve maliyet düşüşleriyle birlikte çevre dostu bir enerji kaynağı olarak önem kazanmıştır. Temizliği ve işletme maliyetlerinin düşük olması, güneş enerjisinin tercih edilmesindeki başlıca nedenlerdendir.

2.2.2 Güneşin Rolü ve Önemi

Küresel enerji talebinin hızla artması ve fosil yakıtların hem sınırlı oluşu hem de çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarını ön plana çıkarmaktadır. Bu kaynaklar arasında güneş enerjisi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada stratejik bir konuma sahiptir. Gerek teknik uygulanabilirliği gerekse çevresel ve ekonomik avantajları açısından güneş enerjisi, alternatif enerji arayışlarında öne çıkan bir seçenek olmuştur.

2.2.3 Güneş Enerjisinin Öne Çıkan Üstünlükleri

Güneş enerjisi, doğal olarak yenilenebilir ve teorik olarak tükenmez bir kaynak olması bakımından diğer enerji türlerinden ayrılır. Dünya'ya her gün ulaşan güneş ışınımı, uygun teknolojik altyapılarla yüksek miktarda elektrik üretimine dönüştürülebilmektedir. Bu yönüyle enerji arz güvenliğine katkı sunarken, enerji krizlerinin önlenmesinde de önemli bir rol oynar. Ayrıca, güneş enerjisi üretimi sırasında sera gazı salımı söz konusu olmadığından, iklim değişikliğiyle mücadelede çevresel açıdan büyük bir avantaj sağlar. Özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde güneş enerjisini daha cazip kılmaktadır.

2.2.4 Güneş Enerjisinin Ekonomik Potansiyeli

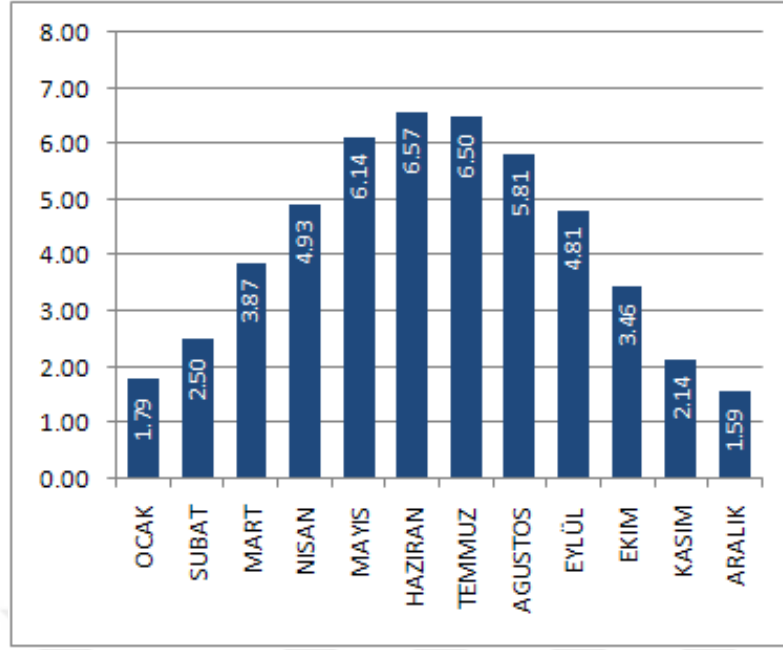
Teknolojik gelişmeler ve ölçek ekonomisinin etkisiyle, güneş enerjisi sistemlerinin kurulum maliyetleri son yıllarda kayda değer oranda azalmıştır. Bu gelişmeler, güneş enerjisini daha erişilebilir ve uygulanabilir hâle getirmiştir. Aynı zamanda bu sektör, yeni istihdam olanakları yaratarak yerel ve ulusal düzeyde ekonomik büyümeye katkı sağlamaktadır. Enerji ithalatına bağımlılığın azaltılması da, ülkeler için ekonomik güvenlik açısından önemli bir kazançtır.

2.2.5 İklim Politikaları ve Çevre Koruma Bağlamında Güneş Enerjisi

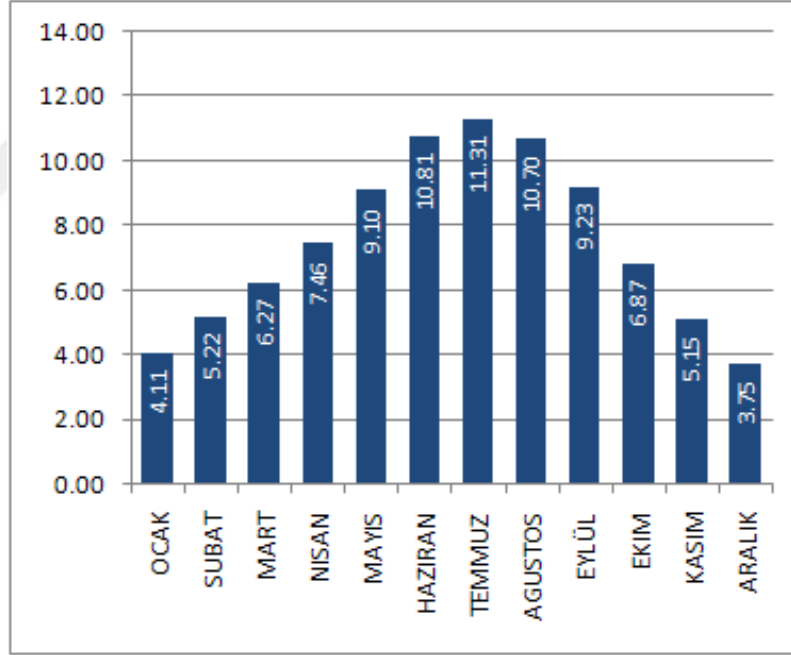
Güneş enerjisi, karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sunarak küresel ısınmanın etkilerinin sınırlandırılmasında etkili bir araçtır. Fosil yakıtların aksine, üretim sürecinde çevreye zararlı emisyonlar oluşturmaz. Ayrıca, su kaynakları ve doğal ekosistemler üzerindeki baskıyı azaltır; geniş alanlara ihtiyaç duymadan entegre edilebilecek sistemleri sayesinde habitat korumasına da olanak tanır. Bu bağlamda güneş enerjisi, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de iklim politikaları açısından stratejik bir enerji çözümüdür.

2.2.6 Güneş Enerjisi Potansiyelimiz (GEPA)

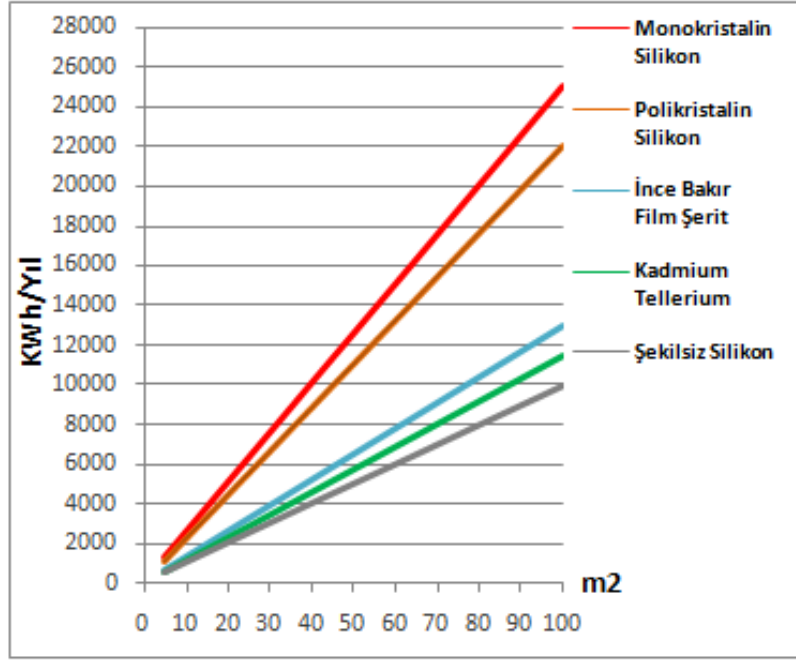
Türkiye, sahip olduğu coğrafi avantajları sayesinde yüksek düzeyde güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 26 Aralık 2024 tarihinde yayımlanan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre, ülkemizin ortalama yıllık güneşlenme süresi 2.741 saat, ortalama yıllık global radyasyon miktarı ise 1.527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. GEPA kapsamında sunulan genel güneş enerjisi potansiyel dağılımı Şekil 2.7’de, Türkiye için aylık ortalama global radyasyon verileri ise Tablo 2.1’de yer almaktadır.



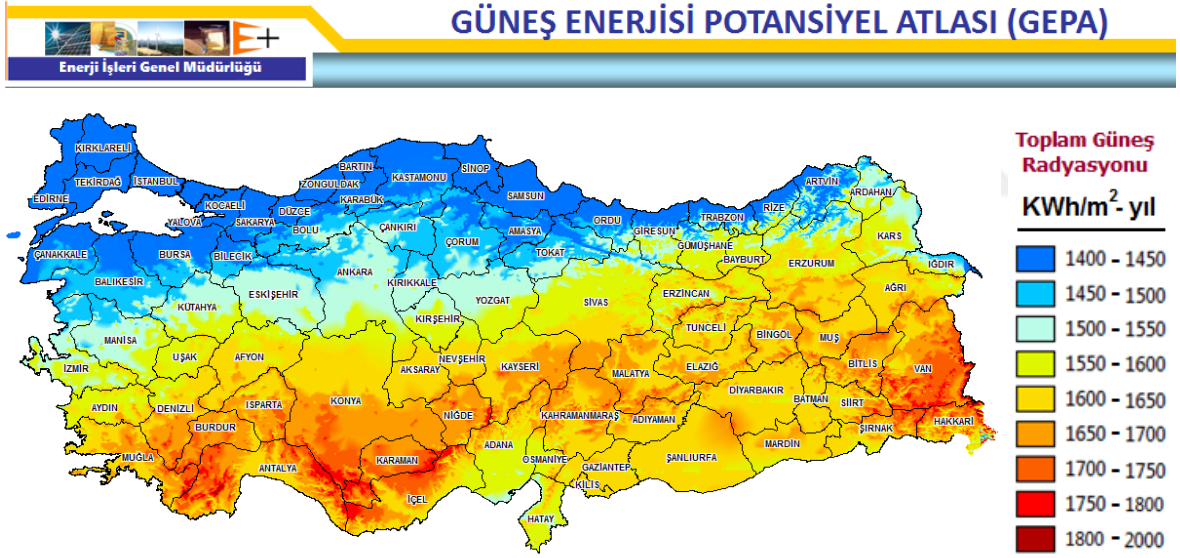
Şekil 2.4: Türkiye global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) (ETKB, 2025)



Şekil 2.5: Türkiye güneşlenme süreleri (saat) (ETKB, 2025)



Şekil 2.6: Türkiye PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (kWh-yıl) (ETKB, 2025)



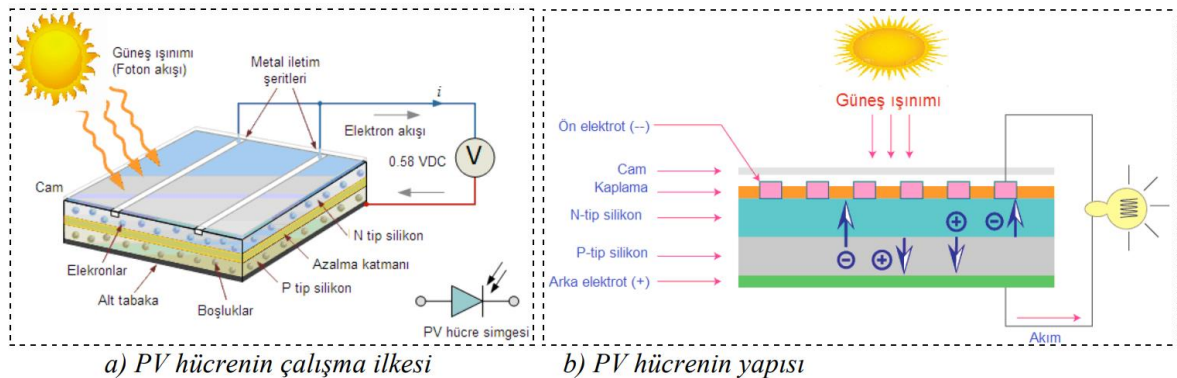
Şekil 2.7: Güneş enerjisi potansiyel atlası (ETKB, 2025)

Tablo 2.1: Türkiye'nin aylık bazda ortalama Global radyasyon değerleri (kwh/m2gün) (MGM, 2025).

Aylar	2023 Yılı Aylık Ortalama	2024 Yılı Aylık Ortalama	2011–2024 Aylık Ortalama
Ocak	65.8	58.4	56.3
Şubat	84.6	86.9	79.8
Mart	101.3	113.8	116.2
Nisan	138.7	152.5	153.6
Mayıs	172.5	174.3	189.6
Haziran	192.5	222.7	203.3
Temmuz	225.2	210.8	216.5
Ağustos	195.8	197.8	194.8
Eylül	155	145.1	153.4
Ekim	110.3	113.1	108.4
Kasım	64.4	69.8	67.9
Aralık	55.6	54.8	51.6

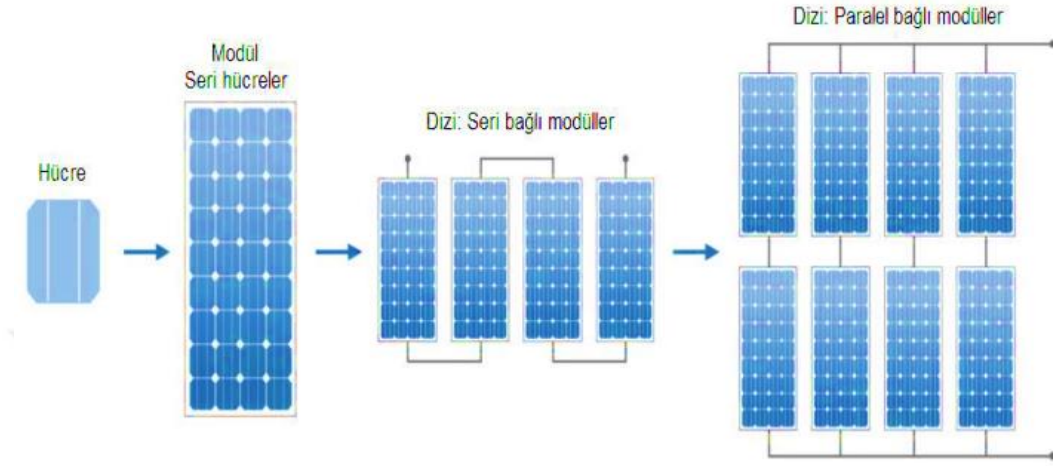
2.3. Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanan yarı iletken tabanlı enerji dönüşüm teknolojileridir. Bir PV sistemin temel çalışma prensibi ise Şekil 2.8'te gösterilmiştir. Bu sistemler, güneş ışınlarının fotonlarını emerek elektron-yuval çiftleri oluşturabilen yarı iletken malzemeler kullanır ve bu sayede elektrik akımı üretirler. PV sistemlerin temel yapıtaşını oluşturan fotovoltaik hücreler, ışık enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde verimliliğin ana belirleyicisidir.



Şekil 2.8: Fotovoltaik pilin genel gösterimi ve çalışma ilkesi (Öztürk, 2019)
Fotovoltaik (PV) panellerin en küçük yapı taşı fotovoltaik hücre yapılarıdır. Bu hücreler,

bir araya gelerek modülleri, modüller de birleşerek daha büyük ölçekli fotovoltaik sistemleri oluşturur. Elektrik üretim kapasitesini artırmak amacıyla, PV panellerin seri veya paralel bağlantılarla birleştirilmesiyle dizi yapıları oluşturulmaktadır. Hücre, modül ve dizi kavramları arasındaki yapısal ilişki, Şekil 2.9’te şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 2.9: Fotovoltaik hücre, modül ve diziler (Öztürk, 2019)

Günümüzde, ticari anlamda yaygın olarak kullanılan fotovoltaik hücreler kristal silikon (c-Si) tabanlıdır. Yüksek verimlilik ve uzun ömür gibi avantajlara sahip olan c-Si hücreler, monokristalin ve polikristalin olarak iki ana gruba ayrılır. Monokristalin hücreler daha yüksek verimlilik sunarken, polikristalin hücreler maliyet açısından avantajlıdır. Bununla birlikte, ince film teknolojileri (örneğin, amorf silikon, CdTe, CIGS) ve son yıllarda perovskit bazlı hücreler gibi alternatif malzemeler de araştırma ve geliştirme çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır. PV sistemlerin performansı çevresel koşullara doğrudan bağlıdır. Hücre sıcaklığındaki artış, malzemenin band aralığını daraltarak açık devre gerilimini (Voc) düşürür. Moharram vd. (2013) tarafından yapılan deneysel çalışmada, panel sıcaklığının yaklaşık her 1 °C artışının elektriksel verimde yaklaşık %0,45 azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, Yadav vd. (2014), sıcak iklim koşullarında PV panellerin verimliliğini artırmak için soğutma tekniklerinin zorunlu olduğunu vurgulamıştır. İnce (Thin) film teknolojileri (CdTe, CIGS vb.) ise düşük üretim maliyeti ve esnek yüzeylere uygulanabilme özelliği ile öne çıkar, ancak verimleri genellikle daha düşüktür (Marques Lameirinhas vd., 2022). Günümüzde PV sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, hem verim artışı hem de maliyet optimizasyonu için yeni malzeme teknolojileri (örneğin perovskitler) ve hibrit sistem entegrasyonları üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Ancak hücrede

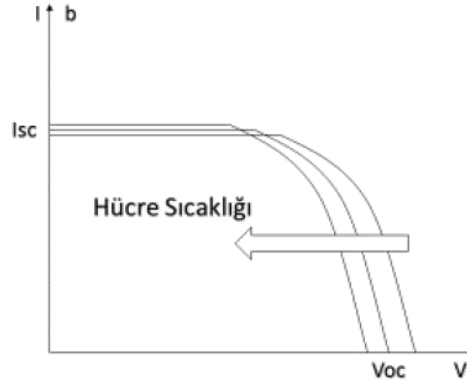
oluşan yüksek sıcaklık etkisini ortadan kaldırmadan yalnızca hücre verimini artırmaya odaklanmak, özellikle sıcak iklimlerde istenen performans iyileşmesini sağlamamaktadır. Bu nedenle, optik ve aynı zamanda termal sistem ile toplam verimi artıran hibrit enerji dönüşüm sistemleri giderek daha fazla ilgi görmektedir.

Farklı fotovoltaik hücre türlerinin yapısal görünümü ve özellik karşılaştırması Tablo 2.2’de sunulmuştur.

Tablo 2.2: Farklı Fotovoltaik Hücre Türlerinin Yapısal Görünümü ve Özellik Karşılaştırması (URL-1, 2025).

Kriter	PERC	Monokristal	Çok Kristalli	İnce Tabaka
İlk maliyet	En yüksek	Yüksek	Orta	En yüksekten en düşüğe: CIGS > CdTe
Yeterlilik (verim)	En yüksek (tek kristale göre yaklaşık %5 daha fazla)	%20 ve üzeri	%15–17	SiG: %13–15CdTe: %9–11a-Si: %6–8
Dış görünüş	Yuvarlak kenarlı siyah	Yuvarlak kenarlı siyah	Kare kenarlı mavi	İnce film varyantına bağlıdır
Avantajlar	En az alan gerektirir En verimli En yüksek güç kapasitesi	Pasivasyon katmanı olmayan PERC panellere göre daha ucuz alternatif	Maliyet–verimlilik–güç kapasitesi açısından orta seviye seçenek	En düşük maliyet Kurulumu daha kolay
Dezavantajlar	Başlangıçta en pahalı Eski panellerde ışıktan ve yüksek sıcaklıktan kaynaklanan bozulma görülebilir	Yüksek başlangıç maliyeti üretim sürecinde düşük verim	Düşük ısı toleransı sıcak ortamlarda uygun değildir	Kristal panellere göre daha kısa kullanım ömrü daha fazla alan gerektirir en az verimli

Son dönemde, fotovoltaik sistemlerin performansını iyileştirmek amacıyla optik konsantrasyon teknolojileri ve spektral yönetim teknikleri geliştirilmiştir. Konsantratörler, güneş ışığını hücre üzerine yoğunlaştırarak ısınım şiddetini artırırken, optik filtreler belirli dalga boylarını geçirerek hücrenin termal yükünü azaltabilir. Şekil 2.10’da Fotovoltaik hücre üzerinde sıcaklığın etkisi izlendiği üzere bu teknolojiler, yüksek sıcaklıklarda oluşan performans kayıplarını minimize etmeye ve sistem verimliliğini optimize etmeye yöneliktir.

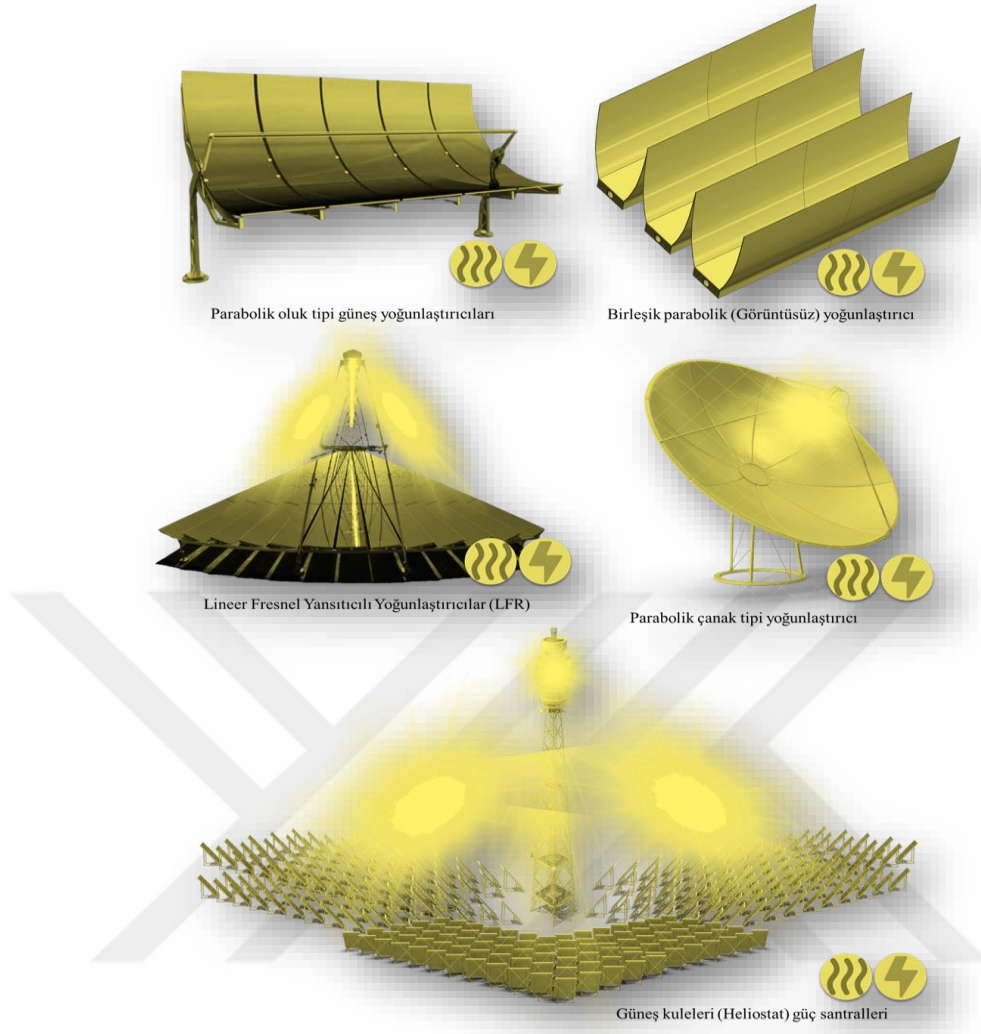


Şekil 2.10: Fotovoltaik Hücre Üzerinde Sıcaklığın Etkisi (Kalogirou, 2009)

Sonuç olarak, fotovoltaik sistemler, güneş enerjisinden çevre dostu ve sürdürülebilir elektrik üretiminin sağlanmasında stratejik bir rol üstlenmektedir. Bu sistemlerin verimliliği, malzeme bilimi, optik tasarım ve termal yönetim alanlarında kaydedilen teknolojik ilerlemeler sayesinde sürekli olarak gelişmektedir.

2.4 Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Termal (CPVT) Sistemler ve Performans Analizi

Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Termal (CPVT) sistemler, güneş enerjisinin hem elektriksel hem de termal enerjiye yüksek verimlilikle dönüştürülmesini sağlayan entegre enerji sistemleridir. Bu sistemlerde, güneş ışınımı özel optik konsantratörler yardımıyla fotovoltaik (PV) hücre yüzeyine odaklanarak, geleneksel PV sistemlere kıyasla ışınım yoğunluğu önemli ölçüde artırılır. Bu yoğunlaştırma sayesinde, PV hücrelerin elektriksel çıkışı artmakla beraber, hücre sıcaklığını yükseltir. Hücre sıcaklığının artması ise elektrik üretiminde verim düşüşüne sebep olduğu için, CPVT sistemlerde etkin bir termal yönetim ve soğutma mekanizması kritik öneme sahiptir. Yoğunlaştırıcı fotovoltaik-termal (CPVT) sistemler, güneş ışığını çeşitli optik elemanlar (örneğin mercekler, parabolik oluklar, Fresnel aynalar) aracılığıyla fotovoltaik (PV) hücreler üzerine odaklayarak, birim hücre alanı başına daha yüksek enerji üretimi elde etmeyi amaçlayan hibrit sistemlerdir. Şekil 2.11’ de Bazı yoğunlaştırıcı güneş toplayıcı sistemler gösterilmektedir. Bu sistemlerde performans üzerinde belirleyici olan temel parametrelerden biri yoğunlaştırma oranıdır (concentration ratio). Ancak yoğunlaştırma oranının artması, PV hücre sıcaklığında da önemli bir yükselmeye neden olmakta; bu durum elektriksel verimliliğin düşmesine ve hücre ömrünün kısılmasına yol açmaktadır (Hasan vd., 2018).



Şekil 2.11: Yoğunlaştırıcı Güneş Toplayıcıları

Resch ve Höller (2021), spektral ayırma teknolojisi ile entegre edilmiş bir CPVT sisteminde, yalnızca yoğunlaştırma yöntemiyle elde edilebilecek verim artışının, optik filtrelerin kullanımı sayesinde önemli ölçüde iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde Wang vd. (2022) tarafından yürütülen bir çalışmada, parabolik oluk tipi yoğunlaştırıcı sistem ile nanofluid tabanlı optik filtre entegre edilerek, elektriksel verimde ve termal verimde artış sağlandığı rapor edilmiştir.

2.4.1 Yoğunlaştırmalı Fotovoltaik Termal Sistemlerin Sınıflandırılması

CPVT sistemlerine ilişkin sınıflandırma Şekil 2.12’te tablo hâlinde sunulmuştur. Söz konusu sınıflandırmaya ait açıklamalar ise aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

Konsantrasyon Oranına Göre

Düşük Konsantrasyonlu Sistemler: Konsantrasyon oranı genellikle 2–10 arasındadır. Daha geniş kabul açısına sahip olup, izleme sistemleri genellikle basittir.

Yüksek Konsantrasyonlu Sistemler: Konsantrasyon oranı 10'un üzerindedir. Daha yüksek verim sağlar, ancak hassas izleme ve daha karmaşık sistemler gerektirir.

Yoğunlaştırıcı Tipine Göre

Görüntülü (Imaging) Konsantratörler: Parabolik çanaklar, Fresnel lensler gibi ışığı odaklayan sistemlerdir. Yüksek optik verim ve hassas izleme gerektirir.

Görüntüsüz (Non-imaging) Konsantratörler: Bileşik parabolik konsantratörler (CPC) gibi, ışığı odaklamadan toplayan sistemlerdir. Daha geniş kabul açısı ile düşük izleme ihtiyacı vardır.

Soğutma Yöntemine Göre

Pasif Soğutmalı Sistemler: Doğal hava akımı veya basit soğutma teknikleri kullanılır.

Aktif Soğutmalı Sistemler: Pompa, fan veya sıvı dolaşımı ile soğutma yapılır. Genellikle termal verimi artırmak için kullanılır.

Entegrasyon Tipine Göre

Fotovoltaik (PV) Sistemler: Sadece elektrik üretimi yapılır.

Fotovoltaik-Termal (PVT) Sistemler: Hem elektrik hem ısı enerjisi üretilir, böylece daha yüksek toplam verim sağlanır.

Montaj Tipine Göre

Statik Sistemler: Sabit pozisyonda, hareketli parçalar yoktur.

Hareketli İzlemeli Sistemler: Güneşi takip eden mekanizmalar ile ışıyım maksimum düzeyde tutulur.

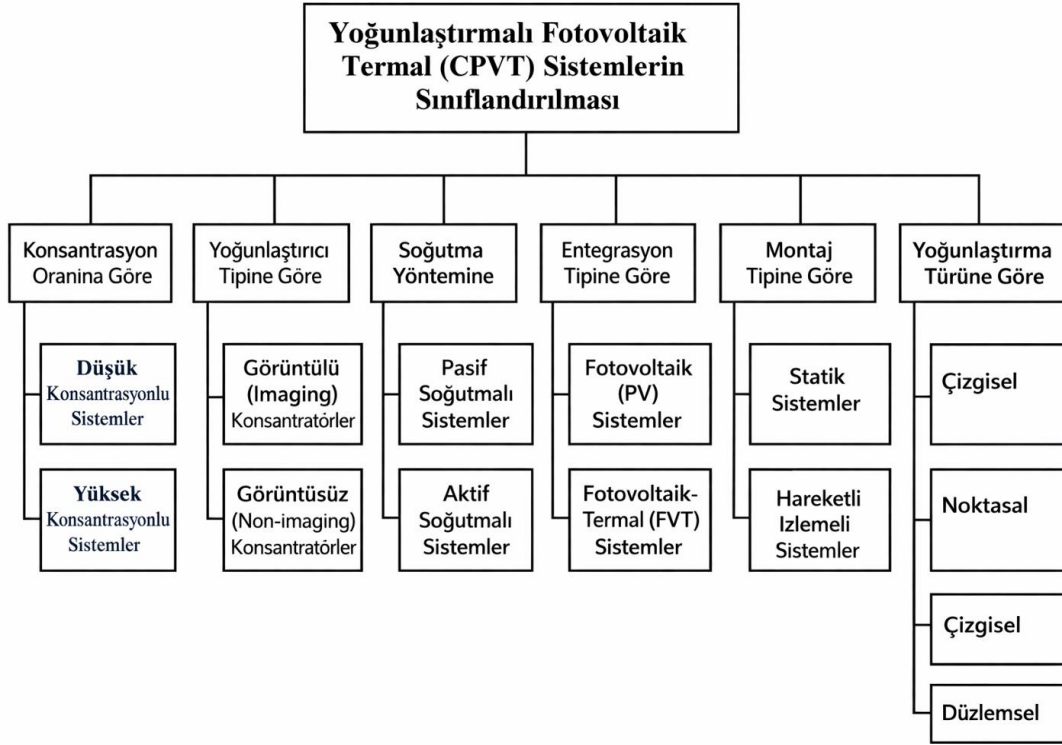
Yoğunlaştırma Türüne Göre

Yoğunlaştırma türüne göre yoğunlaştırıcılar çizgisel, noktasal ve düzlemsel yoğunlaştırıcılar olarak 3 gruba ayrılır;

Çizgisel yoğunlaştırıcılar: Güneş ışığını bir hat boyunca odaklayan parabolik oluklar ve Fresnel aynalar gibi sistemleri içerir ve genellikle uzun, dar PV yüzeylerde kullanılır.

Noktasal yoğunlaştırıcılar: Işını tek bir noktaya odaklayan parabolik çanaklar ve Fresnel lens gibi bileşenleri kapsar; bu sistemler yüksek konsantrasyon oranlarıyla öne çıkar.

Düzlemsel (alan) yoğunlaştırıcılar: Bileşik parabolik konsantratörler (CPC) gibi görüntüsüz (non-imaging) tasarımlar içerir; bu sistemler geniş bir alandan gelen ışığı toplayarak daha yaygın yüzeylere yönlendirir ve genellikle daha düşük izleme ihtiyacıyla çalışır.

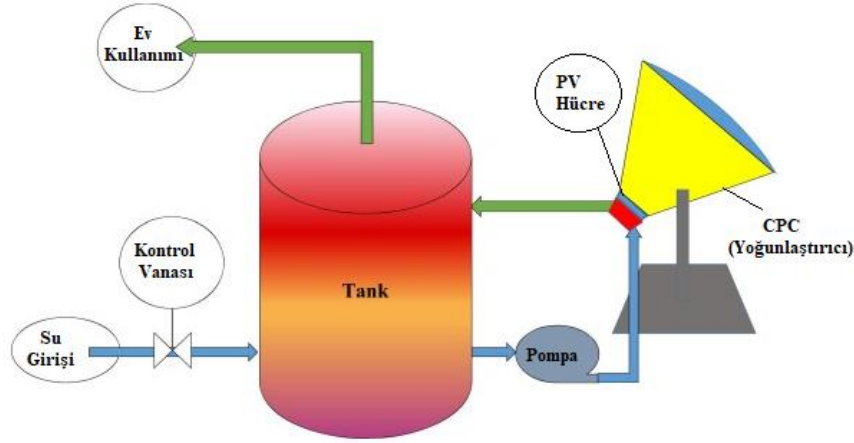


Şekil 2.12: Yoğunlaştırmalı Fotovoltaik Termal (CPVT) Sistemlerin Sınıflandırılması

Her iki sistemde de etkin bir soğutma altyapısının entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, CPVT sistemlere optik filtrelerin dahil edilmesi, hem spektral yönetim hem de termal kontrol açısından çift yönlü fayda sağlamaktadır.

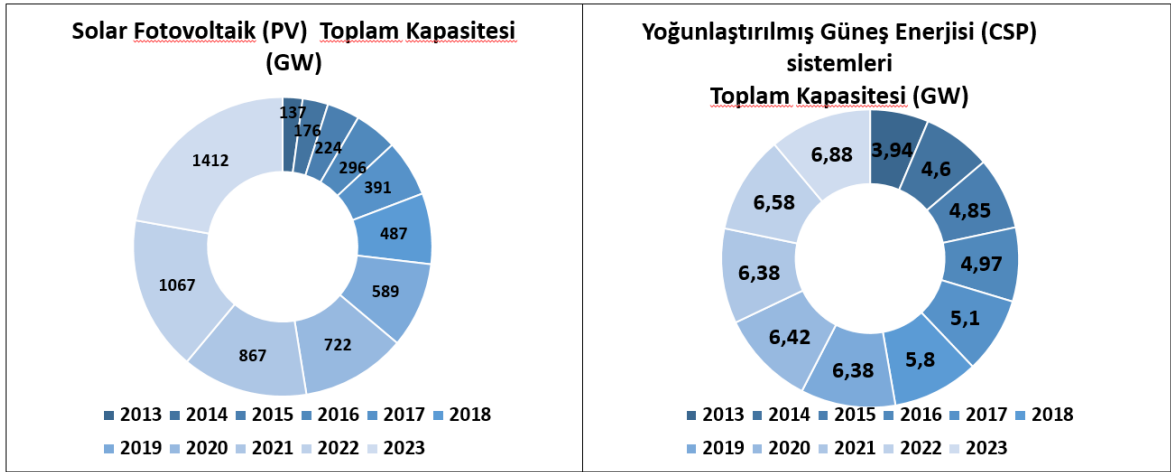
Optik yoğunlaştırıcı uygulamalarına ek olarak, optik sistemlerle entegre edilen spektral filtreler, güneş ışığının yalnızca belirli dalga boylarını PV hücrelere ileterek performansı artırmaktadır. Özellikle ultraviyole (UV) ve kızılötesi (IR) ışınının filtrelenmesiyle, elektrik üretimine katkı sağlamayan ışık bileşenleri uzaklaştırılırken, aynı zamanda hücre üzerindeki termal yük azaltılmış olur (Resch ve Höller, 2021; Wang vd., 2022). Bu sayede hem elektriksel verimlilik yükselmekte hem de hücre sıcaklığındaki artış minimize edilmektedir. Termal yönetim açısından CPVT sistemlerde, PV hücrelerin arkasında dolaşan soğutma sıvıları (genellikle saf su ve/veya antifriz karışımları) kullanılır. Bu akışkanlar, hücre yüzeyinde biriken fazla ısıyı taşıyarak hücre sıcaklığını kontrol altında tutar ve aynı zamanda elde edilen termal enerji başka uygulamalarda kullanılmak üzere toplanabilir. Böylece, CPVT sistemler sadece elektrik üretiminde değil, aynı zamanda ısı geri kazanımı ile toplam enerji verimliliğinde de önemli bir avantaj sağlar.

Şekil 2.13’de basit (tipik) bir CPVT sistem bileşenleri yer almaktadır. Sistem, güneş ışığını optik konsantratör ile hücre yüzeyine yönlendirirken, soğutma devresi ile hücre sıcaklığı sabit tutulur. Burada akışkan sıcaklığı, debisi ve konsantrasyon oranı gibi parametrelerin optimizasyonu, sistem performansını doğrudan etkiler. Literatürde, CPVT sistemlerin elektriksel verimliliğinin, soğutma etkinliğinin artırılması ve spektral yönetim teknikleri ile %20-30 arasında iyileştirilebildiği rapor edilmiştir.(Resch ve Höller, 2021)



Şekil 2.13: Basit (tipik) CPVT sistem bileşenleri

CPVT teknolojisi, özellikle yüksek ısıyım yoğunluğu ve sıcaklık kontrolünün kritik olduğu endüstriyel uygulamalar ve yüksek verimlilik gerektiren projelerde tercih edilmektedir. Ancak, optik elemanların hassas yapısı, soğutma devresinin karmaşıklığı ve maliyet unsurları, teknolojinin yaygınlaşmasında temel zorluklar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumun sonucunu Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı’nın (İRENA) yenilenebilir kapasite istatistikleri 2024 ve ren21’in yenilenebilir enerji 2024 küresel durum raporu kaynaklarında yer alan solar fotovoltaik (PV) kapasitesinin yıllara göre artış oranı ile aynı oranda artış göstermeyen yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemlerinin yıllara göre dağılımı Şekil 2.14’te görmekteyiz. Bu nedenle, mevcut çalışmalarda sistem maliyetlerinin düşürülmesi, uzun vadeli dayanıklılığın artırılması ve entegrasyon kolaylığının sağlanması üzerine çalışmalar yürütülmektedir.



Şekil 2.14: Solar Fotovoltaik (PV) Toplam Kapasitesi (GW) Grafiği İle Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (Csp) Sistemleri Toplam Kapasitesi (GW)'Nin Yıllara Göre Değişimi (Ustaoğlu ve Sungur, 2026)

2.5 Optik Filtreler ve Kullanım Alanları

Optik filtreler, güneş spektrumundaki belirli dalga boylarını seçici olarak geçirerek veya yansıtarak enerji dönüşüm sürecini optimize eden optik elemanlardır. Fotovoltaik uygulamalarda, görünür spektrum PV hücrelere yönlendirilirken, kızılötesi (IR) bileşenler termal toplayıcıya aktarılır. Bu yöntem, hem elektriksel hem de termal çıktılarını iyileştirilmesini sağlar (Huang ve Markides, 2021).

Optik filtreler, yapıldıkları malzemelere bağlı olarak katı (cam veya polimer esaslı) ve sıvı (su ya da nanofluid bazlı çözeltiler) filtreler olarak sınıflandırılmaktadır. Sıvı bazlı filtreler, geçirgenlik özelliklerinin kullanılan akışkanın türü, içerisindeki partikül boyutu ve konsantrasyonuna göre ayarlanabilir olması nedeniyle özellikle deneysel çalışmalarda dikkat çeken bir tercih haline gelmiştir. Ayrıca Şekil 2.15'de farklı optik filtre tiplerinin spektral geçirgenlik eğrilerini göstermektedir. Band-pass filtreler görünür ışık aralığında yüksek geçirgenlik sağlarken, band-stop filtreler aynı aralığı engeller. Long-pass ve short-pass filtreler belirli dalga boyu sınırlarının üzerinde veya altında ışığı iletir. Spektral seçici cam ise termal enerjiye duyarlı dalga boylarını geçirerek güneş kolektörlerinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır (Hecht, 2017; Duffie ve Beckman, 2013).

Bandpass filtreler: Belirli bir dalga boyu aralığını (örneğin 400-700 nm, görünür ışık aralığı)

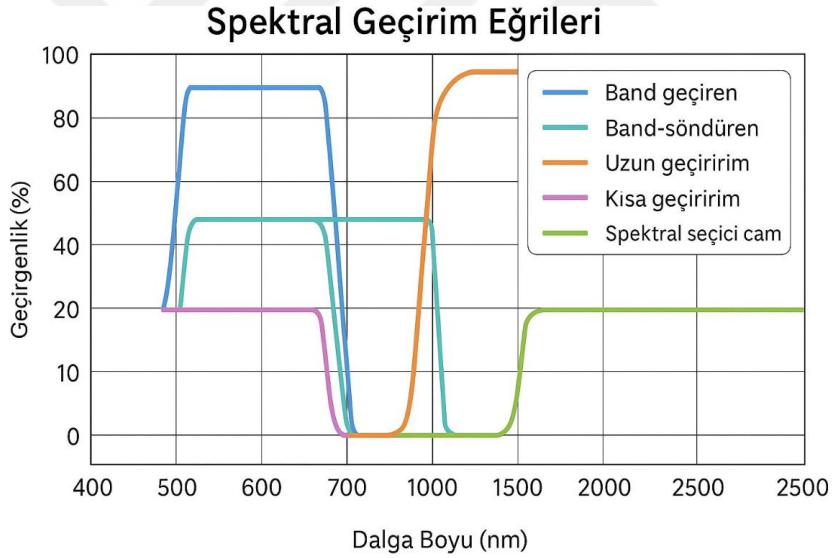
geçirirken, diğer dalga boylarını engeller.

Band-reject (notch) filtreler: Belirli bir dalga boyu aralığını (örneğin 500-600 nm) engeller, diğer dalga boylarının geçişine izin verir.

Long-pass filtreler: Uzun dalga boylarını (örneğin >700 nm, kızılötesi) geçirirken, kısa dalga boylarını engeller.

Short-pass filtreler: Kısa dalga boylarını (örneğin <700 nm, ultraviyole ve görünür ışık) geçirir, uzun dalga boylarını bloke eder.

Spektral seçici camlar: Görünür dalga boylarında (400–800 nm) düşük geçirgenlik, 1500 nm'den sonra geçirgenlik artıyor.



Şekil 2.15: Optik filtrelerin dalga boyu geçirgenlik aralıkları (Peters vd., 2010).

Optik sıvı filtrelerin PV panel sıcaklığını ortalama 6–10 °C düşürdüğünü ve elektriksel verimi yaklaşık % 11,3 oranında artırdığını bildirmiştir. (Hamdan ve Abdelhafez, 2022),

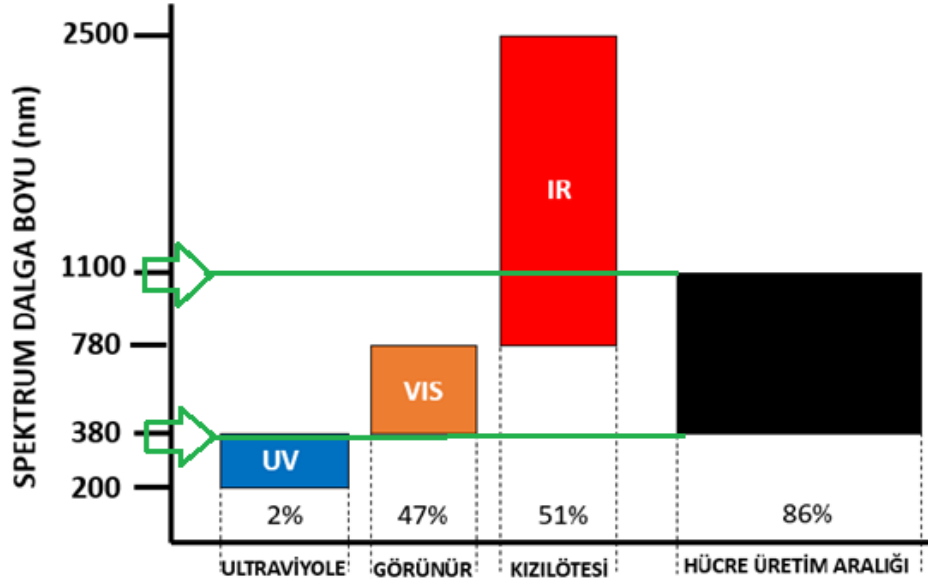
Jin ve Jing (2017) çalışmalarında manyetik nanoparçacık içeren sıvı filtrelerin, spektral ayırma verimliliğini artırdığını ve bu sayede CPVT sistemlerde hem elektriksel hem de termal performansın optimize edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca Mojiri vd. (2016)

alışmalarında volumetrik alıcı tasarımında spektral ayırım prensibini uygulayarak, optik kayıpları minimuma indirmiştir.

Fotovoltaik uygulamalarda optik filtrelerin temel amacı, güneş spektrumundaki kullanılabilir fotonları ayırmak ve bunları PV hücreye yönlendirmek, ısı yükü azaltmak ve böylece hücre sıcaklığının yükselmesini önlemektir. Özellikle kısa dalga boylarını geçirip uzun dalga boylarını yansıtan spektral seçici filtreler, güneş enerjisi sistemlerinde termal enerji geri kazanımı için çok etkili olur. Bu sayede istenmeyen ısı kayıpları minimize edilir ve sistem verimliliği artırılır.

Optik filtrelerin kullanımı, yoğunlaştırıcı fotovoltaik termal (CPVT) sistemlerde daha da kritik bir hale gelir. Burada, filtreler yoğunlaştırılmış ışının spektral bileşenlerini ayırıştırarak, elektriksel ve termal sistemlerin ayrı ayrı optimize edilmesine olanak tanır. Bu sayede hem elektriksel verimlilik artar hem de termal yönetim kolaylaşır. Ayrıca, filtrelerin seçimi ve tasarımı, malzeme özellikleri, iletkenlik, geçirgenlik ve dayanıklılık gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir ve bu faktörler sistemin uzun ömürlü ve verimli çalışmasını sağlar. Şekil 2.16'de fotovoltaik sistemlerde spektral ayırmanın önemini ve farklı dalga boylarının nasıl ayrıldığını görmekteyiz.

Kullanım alanları sadece fotovoltaik sistemlerle sınırlı olmayıp, optik filtreler görüntüleme sistemleri, optik haberleşme, lazer teknolojileri, medikal cihazlar ve çevresel sensörler gibi birçok yüksek teknoloji alanında da kritik bileşenler olarak görev yapmaktadır. Ancak, yenilenebilir enerji alanındaki önemi güneş enerjisinden maksimum fayda sağlama amacıyla giderek artmaktadır.



Şekil 2.16: Spektrum dalga boyu ve güneş hücresi çalışma aralığı gösterimi

2.6 Soğutma Sistemleri ve Termal Yönetim

Fotovoltaik sistemlerin verimliliği, hücre sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Artan sıcaklıklar, PV hücrelerinin elektriksel performansını olumsuz etkileyerek verim kayıplarına neden olur. Bu nedenle, etkin soğutma sistemleri ve termal yönetim stratejileri, PV, PVT ve CPVT sistemlerinde kritik öneme sahiptir. Soğutma yöntemleri genellikle aktif ve pasif olarak iki gruba ayrılır.

Pasif Soğutma: Doğal konveksiyon, radyatif soğutma, faz değiştiren malzemeler (PCM) ve ısı boruları olarak uygulama bulmaktadır. Düşük maliyetlidir ancak yoğunlaştırılmalı sistemlerde yeterli soğutma sağlamayabilir.

Aktif Soğutma: PV üzerinde su ve/veya nanofluid dolaşımı, spreyci soğutma, zorlanmış hava akışı gibi yöntemlerdir. Daha yüksek soğutma etkinliği sağlasa da ek enerji tüketimi ve maliyet getirebilir.

Termal yönetim kapsamında, yoğunlaştırıcı fotovoltaik termal (CPVT) sistemlerde soğutma sıvısı kullanımı, hem hücre sıcaklığının düşürülmesini sağlar hem de toplanan ısı enerjisinin değerlendirilmesine olanak tanır. Bu çift fonksiyonlu yaklaşım, sistemin toplam enerji

verimliliğini artırır. Soğutma sistemlerinin tasarımında akışkan tipi, debisi, giriş sıcaklığı ve termal kontak direnci gibi parametreler performans üzerinde belirleyici rol oynar.

Erdoğan vd. (2024), PV modüllerde uygulanan gelişmiş soğutma tekniklerinin, özellikle aktif sıvı bazlı yöntemlerin, elektriksel verimliliği yaklaşık %13'e kadar artırabildiğini göstermiştir. Jailany vd. (2016), düşük yoğunlaştırmalı PV sistemlerde su tabanlı soğutmanın sıcak iklim koşullarında yaklaşık %10'a varan ek elektrik üretimi sağladığını rapor etmiştir.

2.6.1 PVT ve CPVT Sistemlerinde Soğutma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Fotovoltaik termal (PVT) ve yoğunlaştırmalı fotovoltaik termal (CPVT) sistemlerde, güneş panelinin aşırı ısınmasını önleyerek hem elektriksel verimi artırmak hem de ısı enerjisinden faydalanmak amacıyla çeşitli soğutma teknikleri uygulanmaktadır. Bu sistemlerde soğutma yöntemleri genel olarak aktif ve pasif olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

Aktif soğutma sistemleri, pompa, fan veya başka bir mekanik yardımcıyla sıvı ya da hava dolaşımını sağlayarak panel yüzeyinden ısıyı uzaklaştırır. Bu yöntem, özellikle yüksek güneş yoğunluğu altında çalışan CPVT sistemleri için oldukça etkilidir. Aktif soğutma ile hem PV modül sıcaklığı kontrol altında tutulabilir hem de atık ısı daha verimli biçimde geri kazanılabilir. Ancak bu sistemler, ek enerji ihtiyacı, ilk yatırım maliyeti ve bakım gereksinimleri açısından bazı dezavantajlara sahiptir. Ayrıca, sistemde kullanılan pompa ve fan gibi hareketli parçalar zamanla arızalanabilir ve sistemin güvenilirliğini azaltabilir.

Pasif soğutma sistemleri ise doğal hava akımı, ısıl iletim veya termosifon etkisi gibi dış enerji gerektirmeyen mekanizmalarla çalışır. Enerji tüketimi olmaması, düşük maliyet ve bakım kolaylığı gibi avantajlar sunar. Özellikle küçük ölçekli PVT sistemlerde tercih edilen bu yöntem, sistemin basitliğini ve sürdürülebilirliğini artırır. Ancak, pasif sistemlerin soğutma kapasitesi sınırlıdır ve yüksek sıcaklıkların olduğu ortamlarda yeterli performans sağlayamayabilir. Bu nedenle, CPVT gibi yüksek konsantrasyonlu sistemlerde etkinliği sınırlı kalmaktadır. Söz konusu soğutma sistemlerinin karşılaştırması Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3: Soğutma yöntemlerinin karşılaştırılması (Bukar vd., 2025)

Kriter	Aktif Soğutma	Pasif Soğutma
Tanım	Pompa, fan vb. yardımıyla sıvı/hava sirkülasyonu sağlanarak ısı uzaklaştırılır	Doğal hava akımı, termosifon etkisi veya ısıl iletimle ısı transferi sağlanır
Enerji Tüketimi	Dış enerjiye ihtiyaç duyar	Harici enerji gerektirmez.
Verim Artışı	Elektriksel ve termal verimi belirgin biçimde artırılabilir	Sınırlı verim artışı sağlar
Kurulum Maliyeti	Yüksektir (pompa, fan, kontrol sistemleri vb.)	Düşüktür
Bakım Gereksinimi	Düzenli bakım gerektirir (hareketli parçalar)	Bakım ihtiyacı azdır
Uygulama Alanı	CPVT sistemleri, büyük ölçekli projeler	PVT sistemleri, küçük ölçekli ve bireysel uygulamalar
Soğutma Performansı	Yüksek ve kontrollü	Sınırlı ve çevresel koşullara bağlı
Dayanıklılık Güvenilirlik	Mekanik parça arızaları oluşabilir	Daha uzun ömürlü ve basittir
Sürdürülebilirlik	Enerji tüketimi nedeniyle sınırlı	Yüksek, çevre dostu

Literatürde, özellikle su tabanlı aktif soğutma yöntemlerinin fotovoltaiik (PV) sistemlerin elektriksel verimliliğini yaklaşık %10'a varan oranlarda artırdığı yukarıda da atıfta bulunmuş olduğumuz birçok çalışmada rapor edilmiştir. Bu iyileşme, soğutma sıvısının panel yüzeyinden etkin bir şekilde ısı uzaklaştırmasıyla sağlanmakta ve böylece hücre sıcaklığının kritik seviyelerin altına çekilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca, aktif soğutma sistemlerinin atık ısı geri kazanımı gibi ek avantajları da toplam enerji verimliliğini artırıcı etki yapmaktadır. Ancak, bu sistemlerin ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin pasif sistemlere kıyasla yüksek olduğu, ayrıca enerji tüketimi ve bakım gereksinimleri nedeniyle uygulama alanlarının dikkatli seçilmesi gerektiği literatürde vurgulanmaktadır (Farak vd., 2024).

Sonuç olarak, sistem tasarımında tercih edilecek soğutma yöntemi; coğrafi konum, sistem boyutu, hedeflenen enerji çıkışı ve ekonomik parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Yüksek verim ve sıcaklık kontrolünün ön planda olduğu CPVT uygulamalarında aktif soğutma sistemleri, maliyet ve basitlik avantajının öncelikli olduğu PVT uygulamalarında ise pasif soğutma sistemleri öne çıkmaktadır.

2.7 Literatürdeki Benzer Çalışmalar ve Boşluklar

CPVT sistemlerde optik filtre kullanımı üzerine çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma yapılmış olsa da, bunların büyük bölümü laboratuvar koşullarında kısa süreli testlerle sınırlıdır. Mojiri vd. (2016), tayfsal ayırma prensibi ile çalışan PV–termal alıcı tasarımıyla elektriksel verimi yaklaşık %5, termal verimi ise yaklaşık %12 oranında artırdığını açıklamıştır. Benzer şekilde Chemisana vd. (2018) doğrudan daldırılmış PVT sistemlerde sıvı bazlı filtrelerin, termal verim üzerinde geçirgenliğe bağlı olarak iyileşme sağladığını ortaya koymuşlardır. Buna karşın, özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek güneşlenme koşullarında uzun süreli gerçek zamanlı deneysel saha testleri az sayıdadır. Ayrıca, farklı filtre malzemelerinin, yoğunlaştırma oranlarının ve soğutma stratejilerinin birlikte optimize edildiği çalışmaların eksikliği göze çarpmaktadır. Bu durum, hem teknolojinin farklı iklimlerde uygulanabilirliği hem de ekonomik fizibilitesi açısından araştırma yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Yoğunlaştırıcı fotovoltaiik termal (CPVT) sistemler ve optik filtrelerin entegrasyonu konusunda yapılan birçok literatür çalışmaları, bu alandaki teknolojik gelişmeler ve performans iyileştirmeleri açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Son yıllarda yapılan deneysel ve sayısal araştırmalar, CPVT sistemlerin hem elektriksel hem de termal verimliliklerini artırmaya yönelik farklı tasarım ve optimizasyon stratejilerini ele almaktadır.

Sharaf vd. (2022), parabolik yoğunlaştırıcılar kullanarak tasarladıkları CPVT sistemde optik filtrelerin spektral seçiciliğinin, hücre sıcaklığını önemli ölçüde düşürdüğünü ve elektriksel verimi %15'e kadar artırdığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, Abdelrazik vd. (2023) optik filtrelerle desteklenen kapalı devre soğutma sistemlerinin, özellikle yüksek yoğunluklu güneş ışınımı altında hücre performansını koruduğunu göstermiştir.

CPC tabanlı bir PV/T sistemde ZnO-su nanofluid spektral filtre kullanarak yaptıkları deneysel çalışmada, nanofluid konsantrasyonu arttıkça PV hücre sıcaklığının azaldığını ve sistem verimliliğinin önemli düzeyde iyileştiğini rapor etmiştir (Elharoun vd., 2023).

Literatürde ayrıca farklı soğutma akışkanlarının (su, hava, nanofluidler) termal yönetim üzerindeki etkisi detaylı şekilde incelenmiştir. Nanofluid kullanan CPVT sistemlerinin

standart su soğutmalı sistemlere kıyasla yaklaşık %20 daha yüksek ısı transferi sağladığını ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, akışkan özelliklerinin sistem verimliliği üzerinde doğrudan etkili olduğunu doğrulamaktadır (Chaichan vd., 2021).

Öte yandan, bazı çalışmalar optik filtrelerin sistem maliyetine ve karmaşıklığına etkilerini tartışmakta, bu nedenle sistem optimizasyonunda maliyet-verimlilik dengesi üzerinde durmaktadır. Bu noktada, literatürde kullanılan deneysel düzeneğin detaylandırılması ve performans parametrelerinin standartlaştırılması durumu çalışmaları karşılaştırılabilir kılmak açısından önemlidir.

Bu bağlamda, literatürde farklı unsurlar için yürütülen çalışmalar, CPVT sistemlerin tasarımında optik filtrelerin, soğutma tekniklerinin ve malzeme seçimlerinin kritik rol oynadığını göstermekte; ancak sistem performansını maksimum seviyeye çıkaracak entegre stratejilerin geliştirilmesi için Tablo 2.4'te de görüldüğü üzere maliyet optimizasyonu, kullanılacak malzeme seçimi ve uygulanacak metotlar gibi konularda halen önemli araştırma boşlukları bulunmaktadır.

Bu çalışma, bu boşlukları hedefleyerek optik filtreli ve etkin soğutmalı bir CPVT sistemin deneysel analizini sunmakta, böylece hem literatüre katkı sağlamayı hem de uygulama potansiyelini artırmayı amaçlamaktadır.

Tablo 2.4: CPVT Sistemlerinin Klasik PV ve PVT Sistemlerine Göre Karşılaştırması (Xu vd., 2017)

Özellik	PV	PVT	CPVT
Elektrik Verimi	Orta	Orta	Yüksek
Termal Verim	Yok	Yüksek	Yüksek
Yoğunlaştırma	Yok	Yok	Var
Maliyet	Düşük	Orta	Yüksek

2.8 Araştırma Boşlukları ve Bu Çalışmanın Katkısı

Yoğunlaştırıcı fotovoltaiik termal (CPVT) sistemler alanında yapılan çalışmalar, özellikle elektriksel ve termal performansın artırılması konusunda önemli ilerlemeler kaydetmiş olsa

da halen bazı kritik araştırma boşlukları bulunmaktadır. Öncelikle, optik filtrelerin spektral seçicilik özelliklerinin farklı malzeme ve geometrik tasarımlar açısından sistem performansına etkilerinin detaylı deneysel verilerle desteklenmesi için yapılan çalışmalar sınırlı kalmakta bu nedenle bu alanda çalışmaların artırılması gerekmektedir. Literatürde çoğunlukla sayısal modellemeler ve/veya sınırlı parametrelerle yapılan deneysel çalışmalar yer almakta, geniş kapsamlı sistem optimizasyonunu sağlayacak kapsamlı karşılaştırmalı analizler eksik kalmaktadır.

Ayrıca, soğutma sistemlerinin tasarımında kullanılan farklı akışkan tipleri ve dolaşım hızlarının, hem elektriksel verim hem de termal enerji kazanımı üzerindeki etkilerinin birlikte değerlendirilmesi durumu çok az sayıdaki çalışmada incelenmiştir. Bu durum, gerçek çalışma koşullarında performans tahminlerinin doğruluğunu azaltmakta ve uygulamaya yönelik pratik çözümler geliştirilmesini zorlaştırmaktadır.

Buna ek olarak, yoğunlaştırıcı ve optik filtrelerin birlikte kullanıldığı entegre sistemlerde, sıcaklık kontrolü ve ışıyım yönetimi arasındaki etkileşimin optimize edilmesi konusunda literatürde yeterince detaylı çalışma bulunmamaktadır. Bu alanda yapılan mevcut araştırmalar genellikle ayrı ayrı ele alınmakta, entegre performans ve enerji verimliliği üzerine kapsamlı deneysel veriler sınırlı kalmaktadır.

Bu çalışma, yukarıda belirtilen boşlukları gidermek amacıyla, optik filtre entegreli CPVT sistemlerin hem elektriksel hem de termal performansını, su sıcaklığı kontrollü kapalı devre soğutma sistemi ile deneysel olarak incelemektedir. Sistem tasarımı ve performans analizi, geniş zaman diliminde ve gerçek dış ortam koşullarında gerçekleştirilerek, mevcut literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca, akışkanın sisteme giriş ve çıkış noktalarındaki sıcaklık değişimlerinin sistem üzerindeki etkisi detaylıca değerlendirilmekte ve spektral filtrelerin performansa etkisi deneysel verilerle doğrulanmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, CPVT sistemlerin enerji verimliliğini artırmaya yönelik entegre optik ve termal yönetim stratejilerinin geliştirilmesine önemli bir referans oluşturarak, hem akademik literatüre hem de uygulamalı teknoloji geliştirme süreçlerine katkı sağlamaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

Materyal ve metot bölümü, çalışmada kullanılan deneysel düzenek, ölçüm yöntemleri ve analiz süreçlerini açıklamak amacıyla yedi alt başlık altında ele alınmıştır. Bu bölümde incelenen konular aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

3.1. Deneysel Sistem Tasarımı ve Bileşenleri

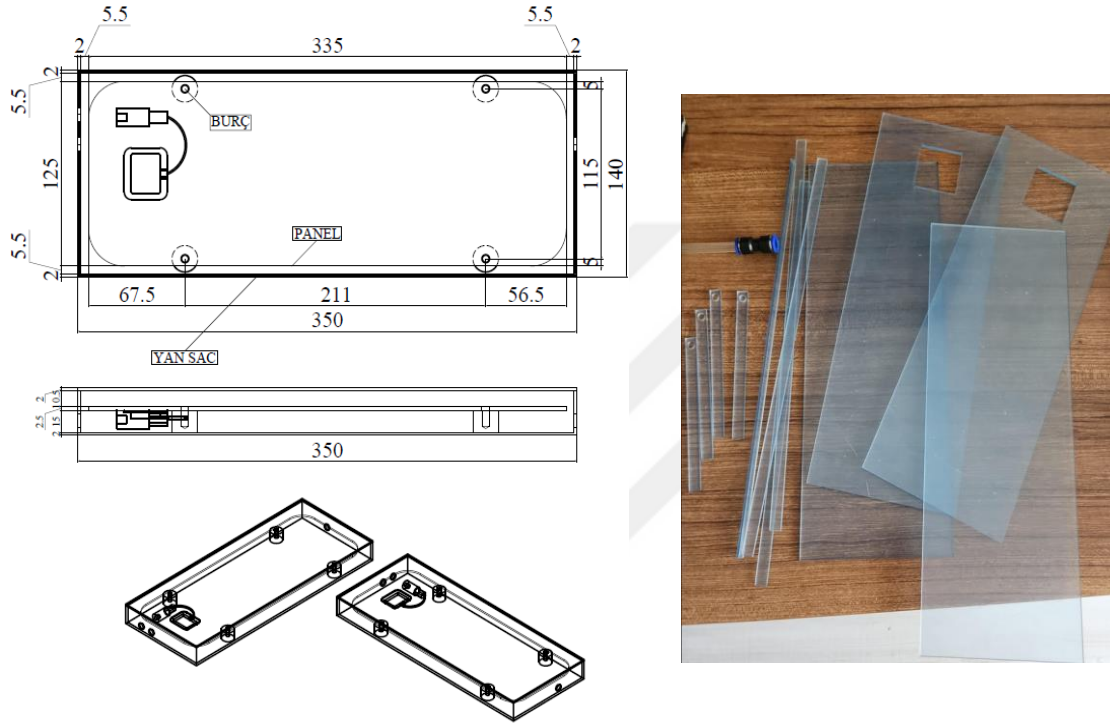
Bu çalışmada incelenen sistem, optik filtre entegrasyonu ile geliştirilmiş bir yoğunlaştırıcıli fotovoltaik-termal (CPVT) düzeneğinden oluşmaktadır. Deney düzeneği, güneş ışığını PV hücre üzerine odaklayan bir Compound Parabolic Concentrator (CPC) yapısı, spektral ayırım sağlayan optik filtre, PV modül, termal toplayıcı, akışkan devresi, ölçüm sensörleri, sirkülasyon(peristaltik) pompası ve veri toplama biriminden meydana gelmektedir.

Kullanılan CPC, yüksek yansıtma katsayısına (>%95) sahip alüminyum kaplama yansıtıcı yüzeylerden imal edilmiş olup, yoğunlaştırma oranı $X = 2$ olarak tasarlanmıştır. CPC geometrisi, gelen güneş ışınlarını optik filtre aracılığıyla PV hücre üzerine minimum optik kayıpla yönlendirecek şekilde belirlenmiştir. Sistem tasarımı, hem yoğunlaştırma verimini hem de filtre sonrası tayfsal dağılımı optimize etmek üzere literatürdeki benzer çalışmalar dikkate alınarak yapılmıştır (Resch ve Höller, 2021; Wang vd., 2022).

CPC geometrisi geniş bir kabul açısı ile gelen güneş radyasyonu alıcı bölgeye yoğunlaştırmakta ve güneş takip sistemine ihtiyaç duymadan uniform bir ışınım dağılımı ve optimum verim ile gelen güneş radyasyonunu düzlemsel bir alana yoğunlaştırarak sisteme katkı sağlamaktadır. Optik filtre ise PV nin cevap aralığındaki Güneş radyasyonunu geçirip termal radyasyonu absorbe ederek sistem üzerinde anlamlı katkılar sağlamaktadır. Ayrıca taşınım yolu ile soğutulan PV nin elektriksel verimini artırmaktadır.

PV modül, polikristalin silikon tabanlı olup, tepe gücü 50 W ve nominal çalışma sıcaklığı (NOCT) 45 ± 2 °C'dir. Şekil 3.1'de sistem bileşenleri gösterilen düzenek, kapalı çevrimde çalışan bir kap içerisinde yer almakta olup, PV modülün zeminine monte edilmesi ve üzerinden saf su akışkanının dolaştırılması sayesinde ısının uzaklaştırılması sağlanmakta

aynı zamanda tasarım optik filtre görevini de üstlendiğinden bu sayede elektriksel üretimde daha verimli olan dalga boylarının geçişine izin verilmektedir. Yani bu amaçla tasarlanmış kapalı çevrim çalışan bu sistem; bir kap içerisine yerleştirilmiş PV modülünün tüm yüzeyine temas ederek akan saf su, hem termal toplayıcı görevini hem de optik filtre görevini üstlenmiştir. Söz konusu kapalı kap PV modülün yüzey alanına tam uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Saf su için ısıl iletkenlik katsayısı ($k \approx 0.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) olarak kabul edilmiştir.

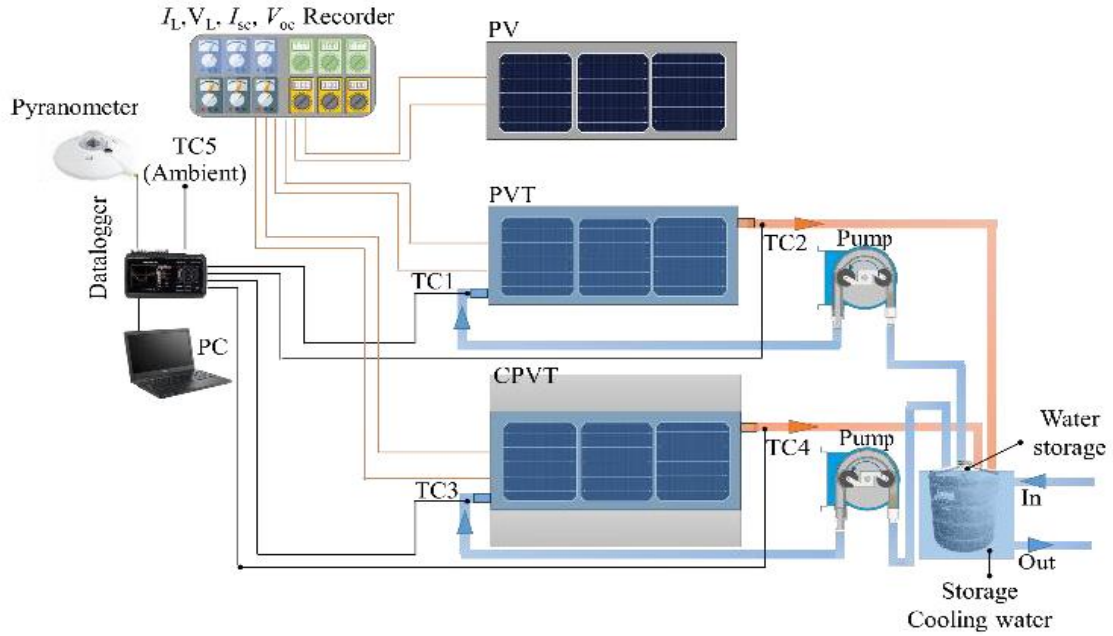


Şekil 3.1: Kapalı Çevrim Termal Sistem PV Yatağı Bileşenleri

Bu çalışmada, yoğunlaştırıcı fotovoltaiik-termal (CPVT), fotovoltaiik-termal (PVT) ve yalnızca fotovoltaiik (PV) panelden oluşan üç farklı sistemin termal ve elektriksel performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, PV–PVT ve PVT–CPVT olmak üzere iki farklı karşılaştırma modeli oluşturulmuş; ölçülen ve kaydedilen veriler bu modeller üzerinden analiz edilmiştir. Tüm test ekipmanlarını içeren deney düzeneğinin şematik diyagramı Şekil 3.2’de sunulmaktadır.

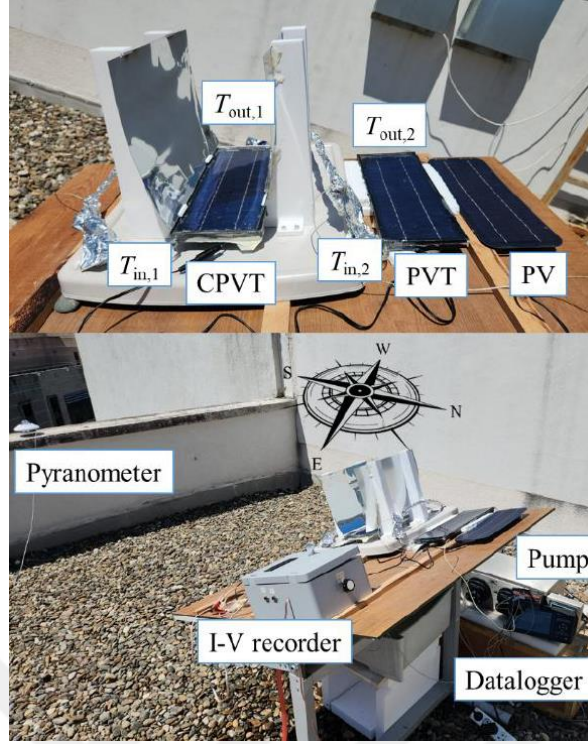
Şematik diyagramda, her panelin elektriksel çıkışları I–V ölçüm cihazına, termal çıkışları ise sıcaklık sensörleri (Pt100) ve debimetreler aracılığıyla veri toplayıcıya (datalogger) bağlanmıştır. Sistemin soğutma devresinde bir su deposu, sirkülasyon pompaları ve akış

yönünü belirten hatlar yer almaktadır. Panellere gelen anlık güneş ışınlımı, panel yüzeyine paralel konumlandırılmış bir pyranometre ile ölçülmüştür. Soğutma devresinde kullanılan akışkan saf su olup, CPVT ve PVT panellerden geçen akışkan debisi sabit tutulmuştur. Ölçülen elektriksel veriler ile sıcaklık değerleri senkronize bir şekilde kaydedilmiştir.



Şekil 3.2: Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik diyagramı

Sistemin çatı üzerinde kurulu gerçek görünümü Şekil 3.3'te sunulmuştur. Fotoğrafta soldan sağa doğru CPVT, PVT ve PV panelleri; giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilmiş sıcaklık sensörleri; sistemin önünde yer alan pyranometre; pompalar; I-V ölçüm cihazı ve veri kaydedici görülmektedir.



Şekil 3.3: PV-PVT-CPVT sistem deney düzeneği gerçek görünümü

Panellerin yönlendirilmesi, güneş ışınlamından maksimum yararlanmak amacıyla pusula doğrultusunda yapılmıştır ve bu yönlendirme görsel üzerinde de işaretlenmiştir. Sistem, deney süresince açık hava koşullarında çalıştırılmış, tüm ölçümler gerçek zamanlı olarak toplanmıştır.

Yoğunlaştırıcı sistemin verim hesabı yapılırken sisteme gelen güneş radyasyonu optik filtre alanı esas alınarak belirlenmiştir. Bu kabul, temel tasarım özellikleri farklı olan düzlemsel ve yoğunlaştırıcı sistemlerin aynı standartlar altında adil ve tutarlı bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla yapılmıştır.

3.1.1 Deney Sisteminde Kullanılan Cihazların Teknik Bilgisi

Fotovoltaik Hücre

Deney düzeneğinde aynı özelliklere sahip polikristalin fotovoltaik hücreler kullanılmıştır. Kullanılan PV panel görseli Şekil 3.4 te yer almakta olup, teknik özellikleri ise Tablo 3.1’de belirtilmiştir.

Tablo 3.1: PV Panel Teknik Özellik Tablosu

Özellik	Değer
Ürün Tipi	Güneş Paneli Şarj Cihazı
Malzeme	Polikristalin Silikon
Ağırlık	Yaklaşık 304 g / 10.7 oz
Kullanım	Güneş Panelleri
Maksimum Güç (Pmax)	50 W
Açık Devre Gerilimi (VOC)	18 V
Maksimum Güç Gerilimi (VMPP)	12 V
Kısa Devre Akımı (ISC)	0,9 A
Maksimum Güç Akımı (IMPP)	0,4 A
Çıkış	DC



Şekil 3.4: Kullanılan PV panel görseli

Peristaltik Pompa

Pompa, farklı spektral ayrıştırıcıların geniş debi aralıklarında dolaşımını sağlayarak, çok yönlü bir sirkülasyon imkânı sunar. Kullanılan Peristaltik Pompa (Shenchen YZ1515x DF600) görseli Şekil 3.5'te özellikler ise Tablo 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Peristaltik pompa görseli

Tablo 3.2: Peristaltik pompa özellik tablosu

Parametre	Değer / Aralık
Akış Hızı	0,053 – 3600 mL/dak
Hız Aralığı	0,1 – 600 rpm
Dağıtım Hacmi Aralığı	0,1 – 9999,99 mL
Dağıtım Süresi	0,5 – 9999,99 s

Multimetre

Multimetreler, PV ve PV/T sistemlerinin akım (I), gerilim (V), kısa devre akımı (ISC) ve açık devre gerilimi (VOC) ölçümlerinde kullanılmıştır. Elde edilen elektriksel güç ve verim değerleri, ayrıca termal verim hesaplamalarında da kullanılmıştır.

Piranometre

Eğimli yüzeye ulaşan güneş radyasyonunun hesaplanabilmesi için gerekli olan küresel güneş radyasyon verileri ölçülmüştür. Kullanılan Piranometre görseli Şekil 3.6’da yer almaktadır.



Şekil 3.6: Piranometre Cihazı

Veri Kaydedici

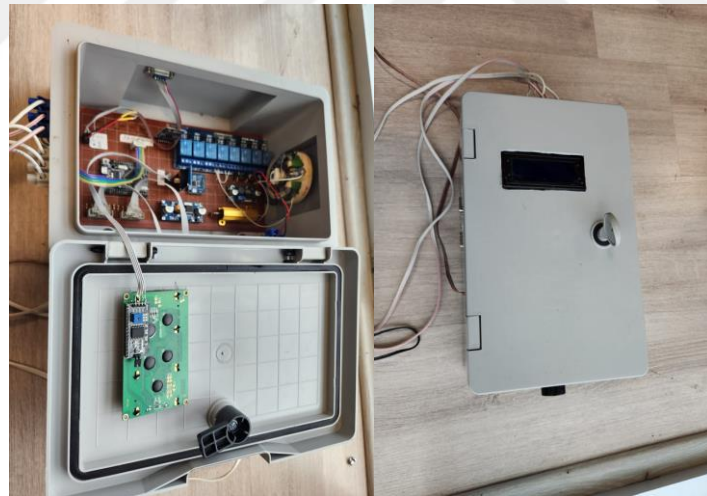
Piranometre, termokupl cihazlarından elde edilen anlık güneş ışıınımı ve sıcaklık verilerini kaydetmek amacıyla kullanılmıştır. Kullanılan Veri Kaydedici (Hıokı 1r 8450) görseli Şekil 3.7’de yer almaktadır.



Şekil 3.7: Veri kaydedici (Hioki lr 8450)

Ölçüm Devre Kutusu

Bu elektronik devre kutusu, özel bir yazılım aracılığıyla I_{sc} ve V_{oc} ile yük altındaki akım ve gerilim değerlerini belirli zaman aralıklarında ölçmekte ve kaydetmektedir. Kullanılan ölçüm devre kutusunun görseli Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Ölçüm Devre Kutusu

Termokupl

Deney düzeneğinde, PV/T sisteminde sirküle edilen spektral ayrıştırıcının giriş ve çıkış sıcaklıkları ile çevre sıcaklığı derece ($^{\circ}C$) cinsinden ölçülmüştür. Akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları ile ortam sıcaklığı K tipi termokupllar kullanılarak ölçülmüş olup, kullanılan

sensörlerin hassasiyeti $\pm 0,4\%$ 'tür. Elde edilen sıcaklık verileri aynı zamanda sistemin termal veriminin hesaplanmasında kullanılmıştır. Kullanılan K tipi termokupllara (Pt100) ait görsel Şekil 3.9'da sunulmuştur.



Şekil 3.9: Termokupl (Pt100)

Depolama Tankı

Depolama tankı, spektral ayrıştırıcı görevini üstlenen akışkanın sirkülasyonunu sağlamak amacıyla tasarlanmış bir hazne olarak sistemde kritik bir rol oynar. Tank, akışkanın geçici olarak depolanmasına ve sistemde düzgün bir akış sağlanmasına olanak tanırken, aynı zamanda sıcaklık dalgalanmalarını minimize ederek sistem performansının daha stabil olmasını destekler. Bu hazne, akışkanın hem termal hem de optik özelliklerinin korunmasına katkıda bulunur ve PVT-CPVT sistemlerinin verimli çalışması için gerekli olan kontrollü dolaşımı mümkün kılar.

3.2. Optik Filtre Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan optik filtre, sıvı bazlı bir ortam içerisinde hazırlanmış olup, spektral seçicilik esasına dayalı olarak özel olarak formüle edilmiştir. Filtrenin tasarımı, fotovoltaiik hücrelerin yalnızca görünür spektrum aralığında (yaklaşık 400–800 nm) çalışmasından hareketle, gelen güneş spektrumunun bu aralıkta maksimum geçirgenliğe, kızılötesi (IR) bölgede ise yüksek oranda absorpsiyona sahip olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, baz sıvı olarak saf su tercih edilmiş, ayrıca kızılötesi ışıınımlı absorbe etme kabiliyeti yüksek nano-parçacıklar (örneğin SiC veya Al₂O₃) eklenerek çeşitli nanofluid çözeltilerinde

kullanılabileceği araştırılan durum bilgisi olarak not edilmiştir.

Optik filtrenin birincil işlevi, PV hücrelere zarar verebilecek yüksek enerjili IR ışınımı absorbe ederek termal bileşene yönlendirmek ve böylece elektriksel verimi artırırken sistemin genel enerji geri kazanımını da yükseltmektir. Kullanılan filtre haznesi, düşük demir içerikli, yüksek geçirgenliğe sahip plexiglass malzemeden üretilmiş olup, iç yüzeyinde yansıma kayıplarını minimize etmek amacıyla antireflektif kaplama (sıvı sprej) uygulanmıştır.

Spektral geçirgenlik verileri, UV-Vis-NIR spektrofotometre (300–2500 nm aralığında) kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, saf su bazlı filtrelerde geçirgenlik oranı görünür bölgede ortalama %92 civarında olduğu kaydedilmiştir.

Bu filtre yapısı sayesinde CPVT sistemlerde hücre sıcaklığı düşürülmüş, IR bileşenlerin termal toplayıcıya yönlendirilmesiyle toplam enerji dönüşüm verimi artırılmıştır.

3.3. Ölçüm Sistemleri ve Kalibrasyon

Deneysel çalışmada, fotovoltaik-termal sistemin elektriksel ve termal performansını doğru ve güvenilir şekilde değerlendirmek amacıyla yüksek hassasiyetli ölçüm sistemleri entegre edilmiştir. Ölçüm sistemi, deney verilerinin gerçek zamanlı ve sürekli olarak izlenmesine olanak tanıyan dijital sensörler ve veri toplama ünitelerinden (DAQ) oluşmaktadır.

3.3.1 Elektriksel Ölçümler

PV modül çıkışına entegre edilen dijital multimetreler ve DAQ sistemi aracılığıyla anlık akım (I) ve gerilim (V) değerleri kaydedilmiştir. Akım ve gerilim ölçümleri için kullanılan sensörlerin doğruluk payı $\pm 0,5\%$ olup, cihazlar endüstri standardına uygun olarak fabrika çıkışlı kalibrasyon sertifikalarına sahiptir. Ölçümler 1 saniyelik örnekleme frekansı ile gerçekleştirilmiş, elde edilen değerler daha sonra ortalama alarak değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

3.3.2 Termal Ölçümler

PV yüzey sıcaklığı, soğutucu sıvının giriş ve çıkış sıcaklıkları ile ortam sıcaklığı, K tipi termokupllar kullanılarak ölçülmüştür. Kullanılan termokupllar $\pm 0,1$ °C hassasiyete sahip olup, deney öncesinde buz-banyo kalibrasyonu yöntemi ile doğrulama yapılmıştır. Bu yöntemle, 0 °C referans sıcaklık sağlanarak sensör sapmaları minimize edilmiştir. Termokupllar, panelin yüzeyine termal iletken macun aracılığıyla sabitlenerek temas direnci azaltılmıştır.

3.3.3 Güneş Işınımı Ölçümleri

Gün boyunca gelen güneş ışıınımı, ± 5 W/m² hassasiyete sahip piranometre ile ölçülmüş ve sistemin genel enerji girdisi bu değerler üzerinden değerlendirilmiştir. Piranometre, yatay düzleme kalibre edilmiş ve ölçümler boyunca gölgelemeden etkilenmemesi için özel bir sabitleme aparatı ile monte edilmiştir.

3.3.4 Veri Toplama ve Kalibrasyon

Tüm sensörlerden elde edilen veriler, çok kanallı veri toplama kartı ile senkronize şekilde kaydedilmiş, yazılım tabanlı analiz altyapısı ile anlık izleme ve kayıt yapılmıştır. Veri toplama frekansı 1 Hz olarak belirlenmiş, sistem ısı kararlılığına ulaştıktan sonra analiz verileri elde edilmiştir. Tüm cihazlar üretici talimatlarına uygun olarak periyodik kalibrasyonlara tabi tutulmuş, ölçüm güvenilirliği üst düzeyde sağlanmıştır.

Bu ölçüm altyapısı sayesinde, sistemin performansına etki eden tüm elektriksel ve termal değişkenler yüksek doğrulukla izlenmiş ve deneysel analizlerin temeli oluşturulmuştur.

3.4. Deney Koşulları ve Prosedürü

Deneysel çalışmalar, Bartın ili sınırları içerisinde, Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi'nin idari binası çatısında (41.6°K, 32.3°D) yaz mevsiminde, Temmuz ayı içerisinde, saat 09:00 ile 17:00 arasında gerçekleştirilmiştir. Deney süresince meteorolojik veriler anlık olarak kaydedilmiş, hava durumu genel olarak açık veya parçalı bulutlu olarak seyretmiştir. Rüzgâr hızı 0,5–3 m/s arasında, bağıl nem %40–60 aralığında ve

ortam sıcaklığı 28–34 °C arasında ölçülmüştür. Bu koşullar, açık alan PV/PVT sistemleri için karakteristik olan doğal çevresel değişkenlikleri yansıtmakta ve deneysel sonuçların gerçek atmosfer koşullarında geçerliliğini desteklemektedir.

Deneysel düzende, PV, PVT ve CPVT sistemlerinin tümü aynı yön ve eğim açısına sahip platformlara monte edilmiştir. Her bir sistem, aynı anda ve eşit ışınlım koşullarına maruz bırakılarak karşılaştırmalı değerlendirme yapılabilmesine olanak sağlanmıştır. Özellikle CPVT sistem için hem optik filtreli hem de filtresiz çalışma senaryoları uygulanarak filtrenin etkisi ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir.

Deneysel prosedür aşağıdaki adımlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir:

Sistem kurulumu ve sensör bağlantılarının kontrolü: Panel modülleri, sensörler (irradiance, sıcaklık, debi, gerilim ve akım sensörleri) ve veri toplama birimleri (datalogger ve yazılım arayüzü) kontrol edilerek montaj tamamlanmıştır.

Akışkan devresinin hazırlanması ve akışkan devresinin hava boşluklarından arındırılması: Su kullanılan devredeki hava boşlukları sistemden uzaklaştırılarak tam dolum sağlanmıştır. Pompa hızı sabit tutulmuş ve laminar akış koşulları sağlanmıştır.

Kalibrasyon ve başlatma: Tüm sensörlerin kalibrasyonu tamamlandıktan sonra veri toplama sistemi aktive edilmiş, ölçümler eş zamanlı ve sürekli biçimde başlatılmıştır.

Veri toplama yazılımının başlatılması: Deney süresince her dakika başına bir örnekleme olacak şekilde sıcaklıklar (giriş, çıkış, ortam), elektriksel parametreler (ISC, VOC, güç), güneş ışınlımı (global, direkt, difüz) ve akışkan debisi kayıt altına alınmıştır.

Gözlem, deney süresince her 1 dakikada bir ortalama değerlerin kaydedilmesi ve değerlendirme: Gün sonunda tüm veriler MATLAB ve Excel gibi analiz yazılımlarında işlenerek grafiksel karşılaştırmalar ve istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Akışkan sıcaklıklarının gün içi eğilimleri, ışınlım yoğunluğu ile ilişkilendirilmiştir.

Deney sonunda akışkan sıcaklığının ve güneş ışınlımının gün boyu değişiminin analiz edilmesi ve irdelenmesi işlemi yapılmıştır.

Özet olarak bu deneysel prosedür ile sistem performansına etki eden çevresel faktörler kontrollü şekilde gözlemlenmiş ve farklı yapılandırmaların (özellikle optik filtreli ve filtresiz durumlar) enerji verimliliğine olan katkıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ölçüm hassasiyetini artırmak amacıyla tüm sensörler $\pm 1\%$ belirsizlik değerine sahip olacak şekilde seçilmiş ve sistematik hata kaynakları en aza indirgenmiştir.

3.5. Kullanılan Akışkanlar ve Termofiziksel Özellikler

Bu çalışmada yalnızca saf su akışkanı kullanılmıştır. Saf su, termal sistemlerde yaygın olarak tercih edilmesinin temel nedenleri aşağıda özetlenmiştir.

Yüksek özgül ısı kapasite ($c_p \approx 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$): Bu özellik, suyun birim kütlesinin sıcaklık değişimi başına yüksek miktarda ısı depolayabilmesini sağlar, böylece ısı taşıma kapasitesini artırır.

Düşük viskozite: Düşük viskozite, akışkanın boru ve kanallarda daha düşük sürtünme kaybıyla dolaşmasına imkan verir, pompaj maliyetlerini ve enerji kayıplarını azaltır.

Yoğunluk ($\rho \approx 998 \text{ kg/m}^3$, 25°C): Yüksek yoğunluk, akışkanın ısı taşıma kapasitesini güçlendirir ve termal depolama sistemlerinde daha etkin enerji aktarımı sağlar.

Yüksek ısı iletkenliği ($k \approx 0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$): Su, ısı iletimi açısından diğer yaygın akışkanlara kıyasla oldukça etkilidir, bu da termal verimliliği artırır.

Kimyasal kararlılık ve çevresel uyumluluk: Su, toksik olmayan, ucuz ve çevre dostu bir akışkandır; bu nedenle laboratuvar ve endüstriyel uygulamalarda güvenle kullanılabilir. Bu nedenle saf su, özellikle güneş enerjisiyle çalışan hava ve sıvı ısıtma sistemlerinde ve diğer termal uygulamalarda birincil akışkan olarak tercih edilmektedir.

3.6. Veri Toplama ve Analiz Yöntemi

Deneysel sürecin tamamında elde edilen veriler, entegre sensörler ve veri kayıt sistemleri aracılığıyla dijital olarak toplanmıştır. Sıcaklık, akım, gerilim, debi ve ısıtım ölçümleri,

yüksek hassasiyetli sensörler aracılığıyla her 60 saniyede bir örnekleme ile kaydedilmiş, veriler gerçek zamanlı olarak bilgisayar tabanlı veri toplama yazılımına aktarılmıştır.

Toplanan veriler, MATLAB R2024b ortamında işlenmiş ve sistem performans parametreleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır:

Güneş yükseklik açısı:

$$\sin \alpha_s = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (1)$$

Burada, ϕ gözlem noktasının enlemini ifade etmektedir. ω Güneş'in yerel meridyene göre açısal yer değiştirmesini gösteren güneş saat açısını temsil etmektedir. δ ise Dünya'nın ekvator düzleminin, Dünya merkezini Güneş'e bağlayan doğruya göre eğimini ifade etmektedir.

Deklasyon açısı (δ) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$\delta = 23.45 \sin(0.9863(n + 284)) \quad (2)$$

Küresel güneş ışınlamı, yatay bir düzlem üzerine gelen toplam güneş akısını temsil etmekte olup, doğrudan, yayılı ve yansıyan bileşenlerden oluşmaktadır. Bu değer aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır (Duffie ve Beckman, 2013).

$$H = H_b + H_d = I_b \sin \alpha_s + H_d \quad (3)$$

Burada, H yatay bir düzleme gelen toplam güneş ışınlamını ifade etmektedir. b - d sırasıyla doğrudan (ışınlam) ve yayılı (difüz) bileşenlere karşılık gelmektedir. I_b ise güneş ışınlamının doğrudan bileşenini göstermektedir.

$$q_s = I_b \cos \theta + H_d \cos^2 \frac{\beta}{2} + H \rho_r \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

Çalışmada, eğimli yüzey üzerindeki toplam güneş ışınlamı, doğrudan, difüz ve yansıyan bileşenler dikkate alınarak Duffie ve Beckman (2013) tarafından önerilen yöntemler doğrultusunda hesaplanmıştır.

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega \quad (5)$$

Burada, β eğim açısını temsil etmektedir. ρ_r ise etkin zemin yansıtma katsayısını ifade etmektedir. ρ_r değeri, güneş enerjisi sisteminin bulunduğu konuma ve yüzey özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Duffie ve Beckman, 2013; Hunn ve Calafell 1977). Işınlamın geliş açısı θ ise Liu ve Jordan (1960) çalışmasından yararlanılarak hesaplanmıştır.

Atmosferik saydamlık indeksi (K_T), atmosferik koşullara bağlı olarak önemli değişkenlik göstermekte olup, bulutsuz gökyüzü koşullarında yaklaşık 0,85 değerine ulaşırken yoğun bulut örtüsü durumunda 0 değerine kadar düşebilmektedir. Bu indeks, yatay bir yüzeye ulaşan küresel güneş ışınlamının, atmosferin üst sınırında alınan güneş enerjisine oranı olarak matematiksel biçimde tanımlanmaktadır. Atmosferik saydamlık indeksi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (6)$$

Atmosferik saydamlık indeksi ile ilişkili basitleştirilmiş bir bağıntı kullanılmıştır (Boes vd., 1976). Bu eşitlik, atmosferik saydamlık indeksinin $0.3 \leq K_T < 0.85$ aralığında olduğu durumlar için geçerlidir. K_T değerinin bu aralığın dışında kaldığı durumlarda ise doğrudan güneş ışınlamı (I_b) sıfır olarak kabul edilmektedir.

$$I_b = -520 + 1800K_T \quad (7)$$

Bu sayede, güneş ışınlamının hem doğrudan hem de yayılı bileşenleri belirlenebilmekte ve eğimli bir yüzeye gelen güneş ışınlamının hesaplanması mümkün olmaktadır.

PV modülünün akım (I) ve gerilim (V) değerleri, güç çıkışının belirlenmesi açısından temel

parametrelerdir. Bu parametreler, en yüksek güç üretiminin değerlendirilmesinde ve akım ile gerilim çarpımının maksimuma ulaştığı çalışma noktasının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Goetzberger ve Hoffmann, 2005).

$$P_{MP} = I_{MP} V_{MP} \quad (8)$$

Burada, I_{MP} ve V_{MP} , belirli çalışma koşulları altında elde edilen tepe (maksimum) performans değerlerini temsil etmektedir. Bu değerler, farklı devre yük koşulları altında alınan I - V verilerinden türetilmiştir. Maksimum güç noktasında (MPP) çalışmaya karşılık gelen ideal yükün belirlenmesi amacıyla farklı direnç değerleri uygulanmıştır (Ustaoglu vd., 2025). Bu süreç, I_{MP} - V_{MP} değerlerinin ilgili koşullar altında en yüksek verimliliği doğru biçimde yansıtmalarını sağlamaktadır. Fotovoltaik modülün performans ve kalite göstergelerinden biri olan doluluk faktörü (FF) ise Goetzberger ve Hoffmann'ın, (2005) çalışmada yer alan formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (9)$$

Burada, P_{MP} tepe (maksimum) gücü, I_{SC} kısa devre akımını ve V_{OC} açık devre gerilimini ifade etmektedir. Bu değerler, bir multimetre yardımıyla güneş hücrelerinden doğrudan ölçülebilmektedir. Söz konusu parametreler, modülün çalışma karakteristiklerinin belirlenmesinde temel göstergeler olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik (PV) çalışma verimliliği, gelen güneş ışınımından elektrik enerjisi üretebilme yeteneğini nicel olarak ifade etmektedir. Bu verimlilik, PV modülünün ürettiği elektrik enerjisinin yüzeye gelen güneş enerjisine oranı olarak tanımlanmaktadır. PV performansı; gelen güneş ışınımının şiddeti ve PV modül sıcaklığı gibi faktörlerden etkilenmektedir. PV modülünün elektriksel verimliliği η_{elec} , ise Goetzberger ve Hoffmann'ın, (2005) çalışmasında verilen aşağıdaki eşitlik kullanılarak ifade edilmektedir.

$$\eta_{elec} = \frac{P_{MP}}{\dot{Q}_{solar,in}} = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{\dot{Q}_{solar,in}} \quad (10)$$

$\dot{Q}_{solar,in}$ PV modülüne gelen güneş ışınlamını ifade etmekte olup, daha önce yapılan çalışmalarda verilen aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmaktadır (Goetzberger ve Hoffmann, 2005; Liu vd., 2020).

$$\dot{Q}_{solar,in} = q_s C_r A_{PV} \quad (11)$$

Burada, C_r yoğunlaştırma oranını ifade etmektedir. A_{PV} ise fotovoltaiik modülün güneş enerjisi toplama alanını temsil etmektedir.

Akışkanın dolaşımı sırasında soğurulan ısı miktarı, Liu vd.'nin (2020) çalışmasında yer verilen aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$Q_{th} = \dot{V}_f \rho_f c_{p,f} (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (12)$$

CPVT sisteminin termal performansı, gelen güneş enerjisinin kullanılabilir ısı çıkışına dönüştürülebilir yeteneğini tanımlamaktadır. Bu verimlilik; akışkanın özgül ısı kapasitesi (c_p), hacimsel debisi $\dot{V}_f$ ve akışkanın giriş-çıkış sıcaklıkları arasındaki fark ($T_{f,in} - T_{f,out}$) esas alınarak belirlenmektedir. Sistem yüzeyine gelen güneş ışınlamına kıyasla akışkana aktarılan ısıнын değerlendirilmesiyle tanımlanan termal verimlilik, belirli çalışma koşulları altında sistemin performansını bütüncül olarak ortaya koymaktadır. Bu verimlilik aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmaktadır:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{solar,in}} \quad (13)$$

Toplam verimlilik, sistemin güneş enerjisinden hem elektrik hem de ısı üretme konusundaki birleşik yeteneğini yansıtmaktadır. Elektriksel ve termal performansların birlikte değerlendirilmesiyle ifade edilen bu büyüklük, sistem performansına ilişkin bütüncül bir ölçüt sunmaktadır. Bu verimlilik, mevcut güneş kaynaklarından enerjinin en etkin şekilde kullanılmasında CPVT sisteminin etkinliğini ortaya koymaktadır.

$$\eta_{overall} = \eta_{th} + \eta_{elec} \quad (14)$$

Ekonomik analiz, deneysel değerlendirme kapsamında elde edilen ortalama performans verilerine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı olarak elde edilen termal ve elektriksel enerji üretim değerleri ortalamaya alınmış ve Türkiye Cumhuriyeti Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen Bartın iline özgü aylık güneşlenme süreleri kullanılarak ölçeklendirilmiştir (Türkiye Devlet Meteoroloji Servisi, 2024). Elde edilen enerji değerleri, her bir sistem için yıllık enerji maliyet tasarrufunun tahmin edilmesi amacıyla sabit bir enerji birim fiyatı ile çarpılmıştır. Basit geri ödeme süresi ise aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$SPP = \frac{IIC(\$)}{AECS(\$ / year)} \quad (15)$$

Burada, IIC başlangıç yatırım maliyetini, AECS ise sistemlerin yıllık enerji maliyet tasarrufunu ifade etmektedir. CPVT sistemlerinin ekonomik fizibilitesini değerlendirmek amacıyla, her bir sistemin toplam başlangıç yatırım maliyeti geometrik boyutları ve malzeme maliyetleri esas alınarak hesaplanmıştır. Maliyet hesabına reflektör ve PV modül maliyetleri dâhil edilmiştir. Reflektör maliyeti ise her bir yoğunlaştırıcının toplam açıklık alanının, malzeme, imalat ve kurulum giderlerini içeren sabit birim maliyet (\$/m²) ile çarpılması yoluyla belirlenmiştir.

Analiz kapsamında, her sistem için ortalama, maksimum ve minimum değerler belirlenmiş, günlük performans eğrileri çıkarılmıştır. Grafikler, gün boyunca değişen güneş ışıınımı, ortam ve panel sıcaklıkları ile sistemlerin elektriksel ve termal çıktılarını zaman ekseninde gösterecek şekilde hazırlanmıştır.

Verilerin istatistiksel analizi için SPSS ve MATLAB Statistics Toolbox kullanılmış, özellikle optik filtreli ve filtersiz sistemler arasında gözlenen performans farklarının anlamlılığı bağımsız örneklem t-testi ile değerlendirilmiştir ($p < 0.05$ anlamlılık düzeyi ile).

Elde edilen sonuçlar, literatürde raporlanmış benzer deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak

geçerlilik ve güvenilirlik açısından değerlendirilmiş, grafiksel ve sayısal yorumlar 5. Bölüm olan tartışma bölümünde detaylı şekilde sunulmuştur. Bu yöntem, sistem performansının çevresel değişkenlere duyarlılığını ortaya koymada etkin bir temel sağlamıştır.

3.7. Hata Analizi ve Ölçüm Belirsizliği

Deneyisel çalışmalarda elde edilen verilerin güvenilirliği, ölçüm cihazlarının hassasiyetine, çevresel koşullara ve sistem bileşenlerinin performansına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, sistematik ve rastgele hata kaynaklarının değerlendirilmesi, deney sonuçlarının doğruluğunu artırmak açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyonları, üretici firma spesifikasyonlarına göre önceden yapılmış olup, tüm sensörlerin doğruluk aralıkları göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan başlıca ölçüm cihazlarının belirsizlik değerleri Tablo 3.3’de belirtilmiştir.

Tablo 3.3: Ölçüm Cihazları ve Belirsizlik Değerleri

Ölçüm Parametresi	Kullanılan Cihaz	Ölçüm Aralığı	Belirsizlik ($\pm$)	Birim
Güneş Işınım	Pyranometre	0-2000	5	W/m ²
Sıcaklık	K Tipi Termokupl	-50 – 400	0.5	°C
Akım	Dijital Akım Ölçer	0-10	0.02	A
Gerilim	Dijital Voltmetre	0-100	0.1	V
Akışkan Debisi	Debimetre	0.1-10	%2 (tam ölçek)	L/min

Toplam ölçüm belirsizliği, çoklu parametrelerin bileşkesiyle hesaplanmıştır. Bileşik belirsizlik (U_c), aşağıdaki genel formül üzerinden belirlenmiştir (ISO, 1998).

$$U_c = \sqrt{\sum (\partial R / \partial x_i)^2 \times (u_{x_i})^2} \quad (16)$$

Burada $\partial R / \partial x_i$, ölçülen değişkenin sonuç üzerindeki kısmi etkisini, u_{x_i} ise ilgili değişkenin standart belirsizliğini temsil eder (Karmalawi, 2023).

Elektriksel güç ve termal güç hesaplamalarındaki toplam belirsizlik, cihaz toleransları dikkate alınarak analiz edilmiş ve %3–5 arasında bir hata marjı belirlenmiştir. Bu belirsizlik

aralığı, benzer deneysel PV/PVT çalışmlarla uyumlu olup, sistemin performans analizlerinin güvenilir sınırlar içerisinde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Ayrıca, deneysel kurulum sırasında meydana gelebilecek aşağıdaki olası hata kaynakları da değerlendirmeye alınmıştır:

- a) Güneş ışınlamındaki ani dalgalanmalar (bulut geçişleri)
- b) Soğutma sıvısının debisindeki mikro değişimler
- c) Panel yüzeyinde oluşabilecek kirlenme ya da yansıma kayıpları
- d) Sensör yerleşimlerinin geometriye göre küçük sapmaları
- e) Soğutma sıvısı kabına daldırılmış olan borunun istem dışı yer değiştirmesi ile sistem girişi sıvı sıcaklığının değişmesi

Tüm bu faktörler ışığında, analiz edilen veriler belirli bir güven düzeyiyle değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçların yorumlanmasında bu hata payları dikkate alınmıştır. Ölçüm belirsizliklerinin minimize edilmesi amacıyla her deney seti en az üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler alınarak analizler yapılmıştır.

4. BULGULAR

Bulgular bölümü, gerçekleştirilen deneysel ve/veya sayısal analizler sonucunda elde edilen verilerin sunulması amacıyla sekiz alt başlık altında ele alınmıştır. Bu bölümde incelenen konular aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

4.1. Deney Günlerine Ait Meteorolojik Koşullar

Deneyler sırasında ölçülen güneş ışıınımı değerleri, açık gökyüzü koşulları altında maksimum 950–1020 W/m² aralığında seyretmiştir. Sabah erken saatlerde (09:00–10:00) ışıınım değerlerinde hızlı bir artış gözlemlenirken, öğle saatleri (12:00–14:00) arasında ışıınım genellikle sabit ve yüksek seviyelerde kalmıştır. Rüzgâr hızı deney süresince 0,5–2 m/s arasında düşük seviyelerde seyretmiş, bu da panel yüzeyinde doğal konveksiyonla gerçekleşen soğutma etkinliğinin sınırlı kalmasına neden olmuştur. Ölçülen ortalama ortam sıcaklığı 31,2 °C olup, bu değer PV modüllerin performans testlerinde referans alınan standart test koşullarının (25 °C) önemli ölçüde üzerindedir. Yüksek ortam sıcaklığı ve düşük rüzgâr hızı koşulları, özellikle optik filtresiz sistemlerde hücre sıcaklığının artmasına ve buna bağlı olarak elektriksel performansın olumsuz etkilenmesine neden olmuştur. Bu meteorolojik parametrelerin kontrolü ve etkilerinin değerlendirilmesi, deneysel sonuçların doğruluğu ve sistemlerin gerçek çalışma koşullarına uyumu açısından kritik öneme sahiptir.

4.2. PV Hücre Yüzey Sıcaklıklarının Karşılaştırılması

Optik filtre entegrasyonunun PV hücre yüzey sıcaklıkları üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Optik filtresiz CPVT sistemde ölçülen maksimum yüzey sıcaklığı 72,4 °C iken, optik filtre entegreli sistemde bu değer 63,1 °C'ye kadar düşmüştür. Ortalama PV yüzey sıcaklığı farkı 8,7 °C olarak tespit edilmiş olup, bu değerlere göre yapılan istatistiksel analizde elde edilen sonuç ile (t-testi, $p < 0,05$) anlamlı bir düşüş olduğu doğrulanmıştır (Field, 2013).

Bu sıcaklık azalışı, optik filtrenin güneş ışıınınının kızılötesi bölgesindeki ($\lambda > 800$ nm) spektral bileşenlerini PV hücreye iletmeyerek termal toplayıcıya yönlendirmesiyle ilişkilidir. Böylece PV hücre üzerindeki termal yük azalmakta, hücre performansını olumsuz

etkileyen ısı stresi minimize edilmektedir. Literatürde Hamdan ve Abdelhafez (2022) benzer çalışmalarında sıvı bazlı optik filtrelerin PV hücre sıcaklığını 6–10 °C arasında düşürdüğünü rapor etmiş olup, bu çalışma sonuçlarıyla tutarlı bir performans ortaya koymuştur.

Elde edilen sıcaklık düşüşü, hücre verimliliği üzerinde doğrudan olumlu etkiye sahip olup, yüksek sıcaklıkların neden olduğu performans kayıplarını azaltarak sistemin genel enerji verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, sıcaklık kontrolü termal yönetim stratejilerinin etkinliğini artırarak, PV hücrelerin uzun vadeli dayanıklılığına da katkı sağlamaktadır.

4.3. Elektriksel Performans Analizi

Deneyisel sonuçlar, filtreli ve filtresiz yoğunlaştırıcı fotovoltaiik termal (CPVT) sistemlerin elektriksel performansları arasında belirgin farklar olduğunu göstermektedir. Gün ortası saatleri olan 12:00–13:00 arasında, filtre entegreli CPVT sistemin anlık elektriksel güç çıkışı ortalama 49,2 W olarak ölçülmüş; karşılaştırma amacıyla aynı koşullarda çalıştırılan filtresiz sistemin ise 45,8 W değerine ulaştığı kaydedilmiştir. Bu fark, filtreli sistemin elektriksel güç üretiminde yaklaşık %7,4'lük bir artışa işaret etmektedir.

Günlük ortalama elektriksel verimlilik analizlerinde ise filtreli sistem %6,91 verimlilik sağlarken, filtresiz sistem %5,98 seviyesinde kalmıştır. Bu durum ile verim artışında %15,6 oranında bir iyileşme sağlandığı not edilmiştir. Elektriksel verimlilikteki bu artış, özellikle güneş ışıınının maksimuma ulaştığı öğle saatlerinde daha belirgin hale gelmiştir. Çünkü bu iyileşmenin temel nedeni, optik filtrenin PV hücre yüzey sıcaklığını düşürme etkisidir. Filtreli sistemde PV hücre sıcaklığı daha düşük kalmakta, böylece hücrelerin açık devre gerilimi (Voc) üzerindeki termal olumsuz etkiler minimize edilmektedir. Deneyisel ölçümler, filtreli sistemde ortalama Voc değerinin 0,61 V, filtresiz sistemde ise 0,58 V olduğunu göstermiştir. PV hücre sıcaklığındaki bu düşüş, hücre yarı iletken materyalinin band gap enerjisindeki termal azalmayı önleyerek, gerilim ve dolayısıyla güç çıkışında pozitif bir etki yaratmaktadır.

Bu bulgular, literatürdeki Hamdan ve Abdelhafez, (2022) ve Chow, (2010) gibi çalışmaların sonuçları ile uyumludur ve optik filtreli soğutma stratejilerinin CPVT sistemlerin elektriksel performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini doğrulamaktadır. Sonuç olarak, optik filtre

entegrasyonu, PV hücre sıcaklığını etkili şekilde kontrol ederek, elektriksel güç üretiminde hem verimlilik hem de performans açısından kayda değer avantajlar sunmaktadır.

Tablo 4.1: Filtreli ve filtresiz CPVT sistemlerde gün ortası (12:00-13:00) anlık elektriksel güç ve pv hücre sıcaklığı karşılaştırması

Zaman (dk)	Güç Filtreli_(W)	Güç Filtresiz_(W)	PV_Hücre_Sıcaklığı Filtreli_(C)	PV_Hücre_Sıcaklığı Filtresiz_(C)
0 (12:00)	48,5	45	46,5	55,2
10	49,0	45,5	46,2	55,3
20	49,5	46	46,1	55,5
30	49,7	46,2	46,2	55,6
40	49,8	46,5	46,3	55,7
50	49,9	46,7	46,6	55,8
60 (13:00)	50	47	46,8	56

4.4. Termal Performans Analizi

Termal toplayıcıdan elde edilen ısı gücü (Q_{th}), filtreli sistemde ortalama 49,8 W, filtresizde ise 45,7 W olarak ölçülmüştür. Bu farkın temel nedeni, optik filtrenin IR bileşenlerini PV hücreden uzaklaştırarak doğrudan termal toplayıcıya yönlendirmesidir.

Termal verimlilik değerleri, filtreli sistemde %78,8 filtresizde ise %87,5 olarak bulunmuştur. Bu yaklaşık %11 oranında bir artış anlamına gelmektedir.

Q_{th} , sistem tarafından akışkana aktarılan yararlı ısı miktarını temsil eder. Güç olarak ifade edildiğinde Q_{th} 'nin birimi Watt (W) olur.

$$Q_{th} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (17)$$

$\dot{m}$: Kütleli debi (kg/s)

C_p : Akışkanın özgül ısısı (J/kg·K)

T_{out} : Çıkış sıcaklığı (°C veya K)

T_{in} : Giriş sıcaklığı (°C veya K)

Deneysel veriler ışığında, termal toplayıcıdan elde edilen ısı gücü (Q_{th}), filtreli CPVT sistemde ortalama 49.8 W olarak kaydedilmiştir. Buna karşın, filtresiz sistemde bu değer ise 45,7 W seviyesinde gerçekleştiği kaydedilmiştir. Bu durum yaklaşık % 9 oranında bir artış anlamına gelmektedir. Bu sonuç optik filtrenin kızılötesi (IR) spektrum bileşenlerini etkin biçimde PV hücre yüzeyinden uzaklaştırarak doğrudan termal toplayıcıya yönlendirmesi sayesinde elde edilmektedir. Optik filtre, IR ışınımını absorbe etmeden geçirerek termal toplayıcıda enerji dönüşümünü artırmakta ve böylece termal verimliliğin yükselmesini sağlamaktadır.

Termal verimlilik (η_{th}), toplayıcıdan elde edilen ısı enerjisinin toplam gelen güneş enerjisine oranı olarak hesaplanmış ve filtreli sistemde % 78,8, filtresiz sistemde ise % 87,5 olarak bulunmuştur. Bu değerler, optik filtre kullanımının termal enerji toplama performansını anlamlı düzeyde iyileştirdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, Chemisana vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda sıvı bazlı optik filtrelerle elde edilen %7–10 aralığındaki termal verimlilik artışıyla tutarlılık göstermektedir.

Termal performans artışının, filtreli sistemde IR spektrumunun yüksek geçirgenliği ile birlikte filtre haznesindeki akışkanın etkili soğutma kapasitesi sayesinde sağlandığı gözlenmiştir. Ayrıca, filtreli sistemde termal toplayıcı yüzey sıcaklıklarının daha dengeli ve düşük seyrettiği, bu durumun da termal enerji kayıplarını minimize ettiği deneysel bulgularla desteklenmiştir. Sonuç olarak, optik filtreli CPVT sistemler, hem elektriksel hem de termal verimlilikte özellikle toplam verimde kayda değer iyileşmeler sunarak enerji dönüşüm verimliliğini optimize etmektedir.

Tablo 4.2: Termal performans karşılaştırması

Sistem Türü	Ortalama Termal Güç (W)	Termal Verimlilik (%)
Filtreli	49.8	78,8
Filtresiz	45,7	87,5

4.5. Toplam Sistem Verimliliği

Toplam sistem verimliliği, elektriksel verimlilik ile termal verimlilik değerlerinin bir araya getirilmesiyle hesaplanmaktadır. Bu parametre, sistemin güneş enerjisinden elde ettiği

toplam enerji dönüşüm etkinliğini yansıtır. DeneySEL sonuçlar, optik filtre entegreli CPVT sistemin ortalama %94,05 toplam verimlilik ile çalıştığını ortaya koymuştur. Buna karşın, filtre kullanılmayan sistemde bu değer %84,73 olarak belirlenmiştir. Elde edilen yaklaşık 9,7 puanlık (10,9 artış) iyileşme, optik filtrenin hem PV hücre yüzey sıcaklığını düşürmesi hem de kızılötesi ışıının etkili bir şekilde termal toplama yönlendirilmesi sayesinde mümkün olmuştur. Bu iyileşme, özellikle yüksek yoğunlaştırma oranlarına sahip sistemlerde kritik önem taşıdığı çünkü termal yönetimin optimum düzeyde sağlanması sistem kararlılığını artırdığı ve uzun vadeli performans düşüşlerini engellediği kaydedilmiştir. Ayrıca, toplam verimlilikteki artış, enerji üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve sistem bileşenlerinin ömrünün uzatılması açısından da önemli katkılar sağlar.

Tablo 4.3: Toplam sistem verimliliği karşılaştırması

Sistem Türü	Ortalama Elektriksel Verim (%)	Ortalama Termal Verimlilik (%)	Ortalama Toplam Verim (%)
Filtreli	6.91	87,14	94,05
Filtresiz	5.98	78,75	84,73

4.6. Zaman Serisi Analizi ve Günlük Üretim

Gün boyunca kaydedilen zaman serisi verileri, optik filtre entegrasyonunun PV hücrelerin termal kontrolünde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Filtreli sistem, özellikle güneş ışıının maksimuma ulaştığı öğle saatlerinde, hücre sıcaklıklarını daha stabil tutarak elektriksel performansın sürekliliğini sağlamıştır. Buna karşılık, filtresiz sistemde yüksek sıcaklıkların etkisiyle güç çıkışında anlamlı bir azalma gözlenmiştir; öğleden sonraki saatlerde güç düşüşü % 12 seviyelerine kadar yükselirken, filtreli sistemde bu azalma % 6'da sınırlı kalmıştır. Bu durum, optik filtrenin kızılötesi ışıını termal toplayıcıya yönlendirerek PV hücre yüzey sıcaklığını düşürmesinin doğrudan sonucu olarak değerlendirilmiştir.

Günlük toplam enerji üretimi açısından değerlendirildiğinde ise, filtreli sistem elektriksel ve termal enerji üretiminde sırasıyla 0,246 kWh ve 0,902 kWh ile toplam 1,148 kWh enerji sağlamıştır. Filtresiz sistem ise 0,221 kWh elektrik ve 0,815 kWh termal olmak üzere toplam 1,036 kWh enerji üretmiştir. Optik filtrenin sağladığı bu %8,9'luk toplam enerji kazancı, sistemin hem performans hem de enerji verimliliği açısından önemli bir iyileşmeye işaret

etmektedir. Bu sonuçlar, CPVT sistemlerde optik filtrelerin kullanımının, özellikle yüksek güneş ışınlamı koşullarında termal yönetimi optimize ederek elektriksel güç kayıplarını minimize ettiğini ve toplam enerji üretimini artırdığını desteklemektedir. Literatürde benzer çalışmalar, optik filtrelerin günlük performans üzerindeki olumlu etkilerini doğrulamakta olup, bu bulgular mevcut çalışmanın özgün katkısını pekiştirmektedir.

4.7. İstatistiksel Değerlendirme

Çalışmada elde edilen elektriksel verimlilik, termal verimlilik ve toplam verimlilik değerlerinin karşılaştırılması için bağımsız örneklem t-testi uygulanmıştır. Analiz sonuçları, filtreli ve filtresiz sistemler arasındaki farkların %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir ($p < 0,05$). Bu bulgu, optik filtre entegrasyonunun sistem performansında gözlemlenen iyileşmelerin tesadüfi olmadığını, aksine filtre kullanımının elektriksel ve termal çıktı üzerinde belirgin ve güvenilir bir pozitif etkisi olduğunu doğrulamaktadır.

İstatistiksel olarak anlamlı bulunan bu farklılıklar, deneysel verilerin tutarlılığı ve tekrarlanabilirliği açısından da güçlü bir temel oluşturmaktadır. Bu kapsamda, filtreli sistemlerde hem elektriksel hem termal parametrelerde kayda değer artışlar gözlemlenmiş, böylece toplam sistem verimliliğinde anlamlı bir iyileşme sağlanmıştır. Sonuçlar, optik filtre teknolojisinin fotovoltaik termal sistemlerin optimize edilmesinde kritik bir role sahip olduğunu vurgulamaktadır.

4. 8. Optik Filtre Sıcaklığının Elektriksel Performansa Etkisi

Deneysel düzeneğin güvenilirliğini sağlamak ve elde edilen bulguların karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesine imkân tanımak amacıyla PV-PVT, PV-PVT-CPVT ve PVT-CPVT olmak üzere üç farklı karşılaştırma modeli oluşturulmuştur. Belirlenen bu sıralamaya uygun şekilde gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen veriler, ilgili karşılaştırma modelleri temel alınarak analiz edilmiştir.

Birinci model PV-PVT için; PVT ünitesinin hemen yanına aynı özelliklere sahip ikinci bir fotovoltaik panel yerleştirilmiştir. Bu referans panelin gerilim, akım ve sıcaklık verileri de

eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Böylece, klasik bir PV modülü ile optik filtre destekli ve sıvı soğutmalı PVT modülün performansları doğrudan karşılaştırılmış, elde edilen farklar ayrıntılı olarak grafikler üzerinden değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışma, optik filtre entegreli ve aktif soğutma sistemine sahip hibrit PVT teknolojilerinin, geleneksel PV panellere kıyasla ne ölçüde verimlilik üstünlüğü sunduğunu kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Sonuçlar, yalnızca mevcut PV teknolojilerinin iyileştirilmesine katkı sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda hibrit güneş enerjisi sistemlerinin daha etkin ve yaygın kullanımına da önemli bir yön göstermektedir. PV ve PVT sistemlerinin deneysel analizi, 10 Haziran 2025 tarihlerinde Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İdari Binası çatısında ($41,6^{\circ}\text{K}$, $32,3^{\circ}\text{D}$) gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde akışkan dolaşımı, $\pm 0,5$ debi hassasiyetine sahip Shenchen YZ1515x DF600 model peristaltik pompa ile sağlanmış, soğutucu akışkanın hacimsel debisi 150 ml/dk olarak ayarlanmıştır.

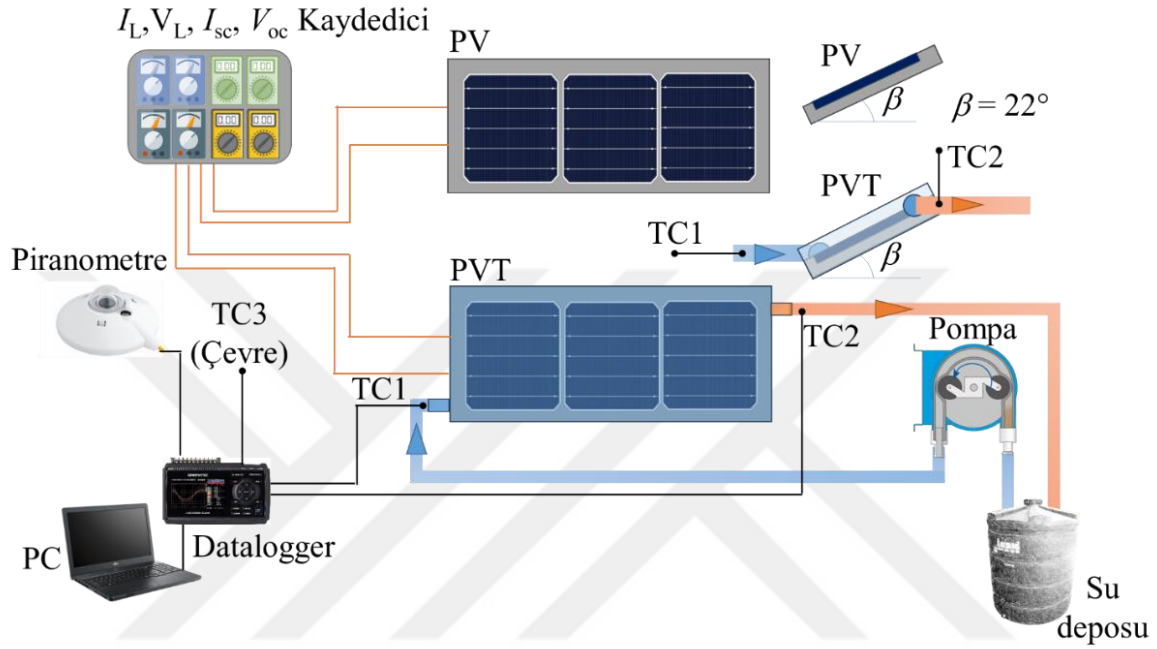
Güneş ışıınımı ve sıcaklık verilerinin kaydı için $\pm 0,3$ ölçüm doğruluğu ve $\pm 0,1$ tam ölçek hassasiyetine sahip U8550 voltaj/sıcaklık modülüyle donatılmış Hioki LR8450 veri kayıt cihazı ile kaydedilmiştir. Akışkan giriş-çıkış sıcaklıkları ve ortam sıcaklığı K tipi termokupllarla ölçülmüş olup, kullanılan sensörlerin hassasiyeti $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ 'tür.

Yatay düzlemdeki toplam güneş ışıınımı, kalibrasyon, doğrusal davranış ve çevresel faktörler dikkate alınarak yaklaşık ± 3 toplam belirsizlikle EKO MS-410 piranometre ile ölçülmüştür. PV panellerin elektriksel performansını izlemek amacıyla, akım (I), kısa devre akımı (ISC), gerilim (V) ve açık devre gerilimi (V_{OC}) değerlerini kaydedebilen özel bir I-V ölçüm sistemi geliştirilmiştir.

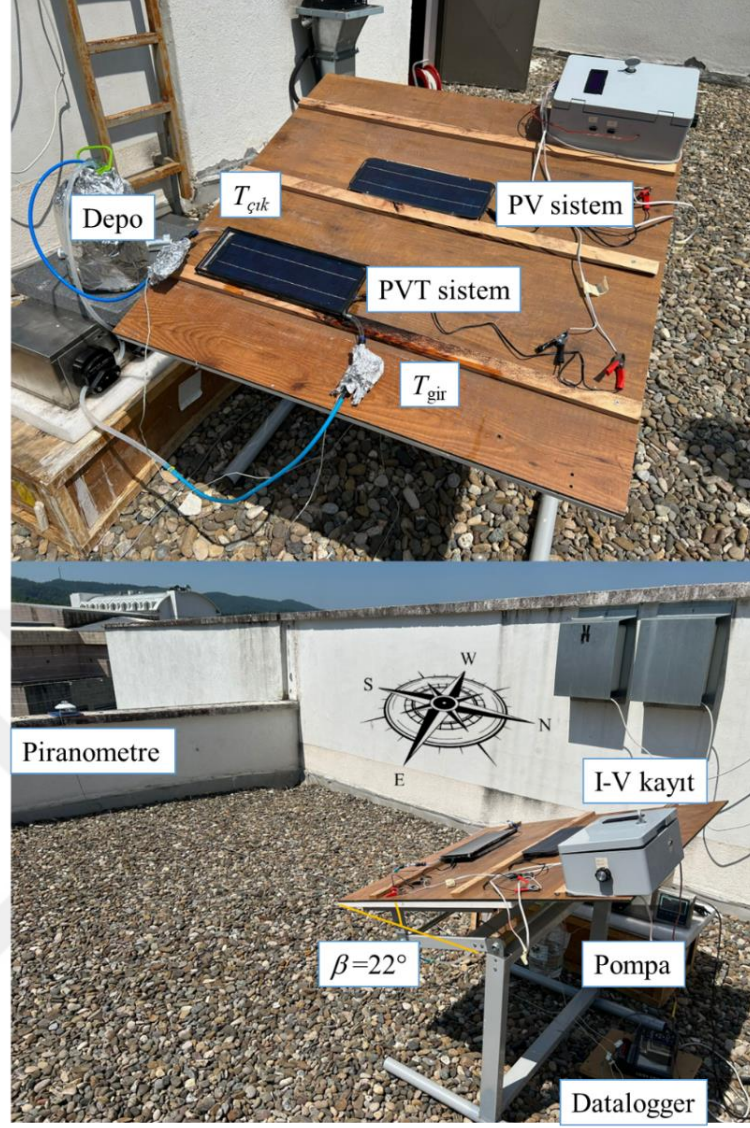
Sistemde suyun depolanması ve sürekli sirkülasyonu için bir su tankı kullanılmıştır. Kurulum, güneşten en yüksek düzeyde yararlanmak üzere güneşe yönlendirilmiş, deneyin yapıldığı gün güneşin öğle saatinde yüzeye dik gelmesi için eğim açısı 22° olarak ayarlanmıştır. Deney düzeneğine ait şematik diyagram Şekil 4.1'de, kurulan sistemin fotoğrafı ise Şekil 4.2'de sunulmaktadır.

Bu çalışmada, optik filtre entegreli PVT sistemin performans değerlendirmesi, klasik bir

PVT sistem yerine yaygın biçimde kullanılan standart bir PV panel ile yapılmıştır. Böyle bir tercih, optik filtrenin ve aktif sıvı soğutmanın elektriksel ve termal performans üzerindeki etkilerini, doğrudan temel bir PV referansına göre ayırıştırarak incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, gözlenen iyileştirmelerin yalnızca optik ve ısıl katkılardan kaynaklandığı daha açık ve karşılaştırılabilir biçimde ortaya konmuştur.



Şekil 4.1: PVT ve PV sistem deneyinin şematik diyagramı



Şekil 4.2: PVT ve PV sistem dış ortam deney fotoğrafı

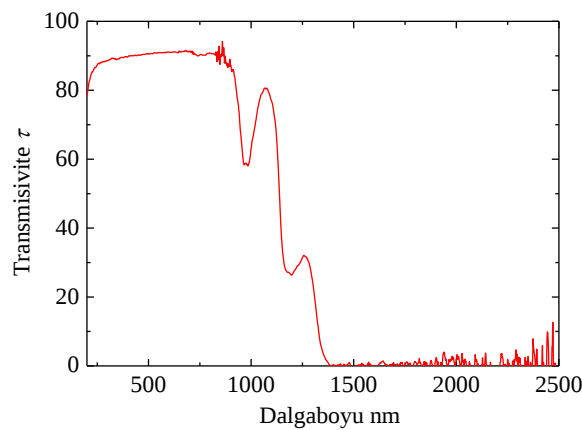
Bu çalışmada kullanılan saf (deiyonize) suyun, PV panel yüzeyi boyunca akışı sırasında yalnızca taşınım ile soğutma etkisi yaratması değil, aynı zamanda güneş tayfındaki seçici optik davranışıyla sistem performansına katkı sağlaması amaçlanmıştır. Su, görünür ve yakın kızılötesi ışınımın büyük kısmını geçirerek hücrelerin elektrik üretimine destek olurken, daha uzun dalga boylarındaki radyasyonu tutarak yüzeydeki aşırı sıcaklık artışını sınırlamaktadır.

Deneylerde elde edilen spektral geçirgenlik eğrileri Şekil 4.3'te verilmiştir. Ölçümler, suyun görünür bölge (400–700 nm) için %85'in üzerinde geçirgenliğe sahip olduğunu, ancak 900 nm sonrasında geçirgenliğin kademeli biçimde azaldığını ortaya koymuştur. Yakın kızılötesi

alandanda özellikle 980, 1200 ve 1450 nm civarında oluşan belirgin absorpsiyon bantları nedeniyle geçirgenlik %10'un altına inmektedir. Bu durum, su moleküllerinin titreşimsel geçişlerinden kaynaklanmakta ve kızılötesi radyasyonun etkin şekilde sönümlenmesine yol açmaktadır.

Söz konusu bantlar, çoğunlukla güneş spektrumunun 1000–2500 nm arasındaki termal enerji taşıyan kısmında yoğunlaşmaktadır. Bu dalga boyları, PV hücreleri tarafından elektriksel çıktıya dönüştürülemez; fakat yüzey sıcaklığını artırarak verim kaybına neden olabilir. Dolayısıyla, suyun bu bölgedeki ışınımı emmesi, panele ulaşan ısı yükünü azaltılmasına ve soğutma etkisinin güçlenmesine katkı sağlamaktadır.

Sonuçlar, saf suyun spektral seçici bir filtre gibi davranabileceğini göstermektedir. Özellikle kızılötesi bölgenin zayıflatılmasıyla PV yüzeyinde biriken ısının azaltılması mümkün olmaktadır. Nitekim literatürde de benzer bulgular rapor edilmiştir: görünür dalga boylarında suyun kırılma indisi yaklaşık 1.33 olup absorpsiyonu ihmal edilebilir düzeydedir ($<0.01 \text{ m}^{-1}$) (Hale ve Querry, 1973). Buna karşılık, 900 nm'nin ötesinde absorpsiyon katsayısı hızla yükselmekte ve 1450 ile 1900 nm'de 100 m^{-1} 'nin üzerine çıkmaktadır. Bu artış moleküler titreşim rezonanslarından kaynaklanmakta ve suyun kızılötesi radyasyona karşı etkili bir bariyer işlevi görmesine neden olmaktadır. Elde edilen ölçümler literatürdeki verilerle uyumlu olup, görünür spektrumda yüksek geçirgenlik, IR bölgesinde ise güçlü absorpsiyon karakterini doğrulamaktadır (Segelstein, 1973).



Şekil 4.3: Deneyde kullanılan saf suyun güneş spektrumu (280-2500 nm) içindeki dalga boyuna bağlı geçirgenlik (transmisivite) değerleri

Deneyisel analiz, 10 Haziran 2025 tarihinde Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İdari Binası'nın çatısında (41,6°K, 32,3°D) gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4(a)'da global, direkt ve difüz güneş ışınlamı değerlerinin zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. Maksimum global ışınlamı saat 13:00 civarında 918,5 W/m² olarak ölçülmüş; bu değerin 781,6 W/m²'si direkt bileşen, 136,9 W/m²'si ise difüz radyasyondan oluşmuştur. Böylece toplam ışınlamının yaklaşık %85'i direkt, %15'i difüz bileşenlerden kaynaklanmıştır. Ölçüm süresince gökyüzünün büyük ölçüde açık olması, doğrudan ışınlamdan maksimum düzeyde yararlanılmasına uygun koşullar sağlamıştır.

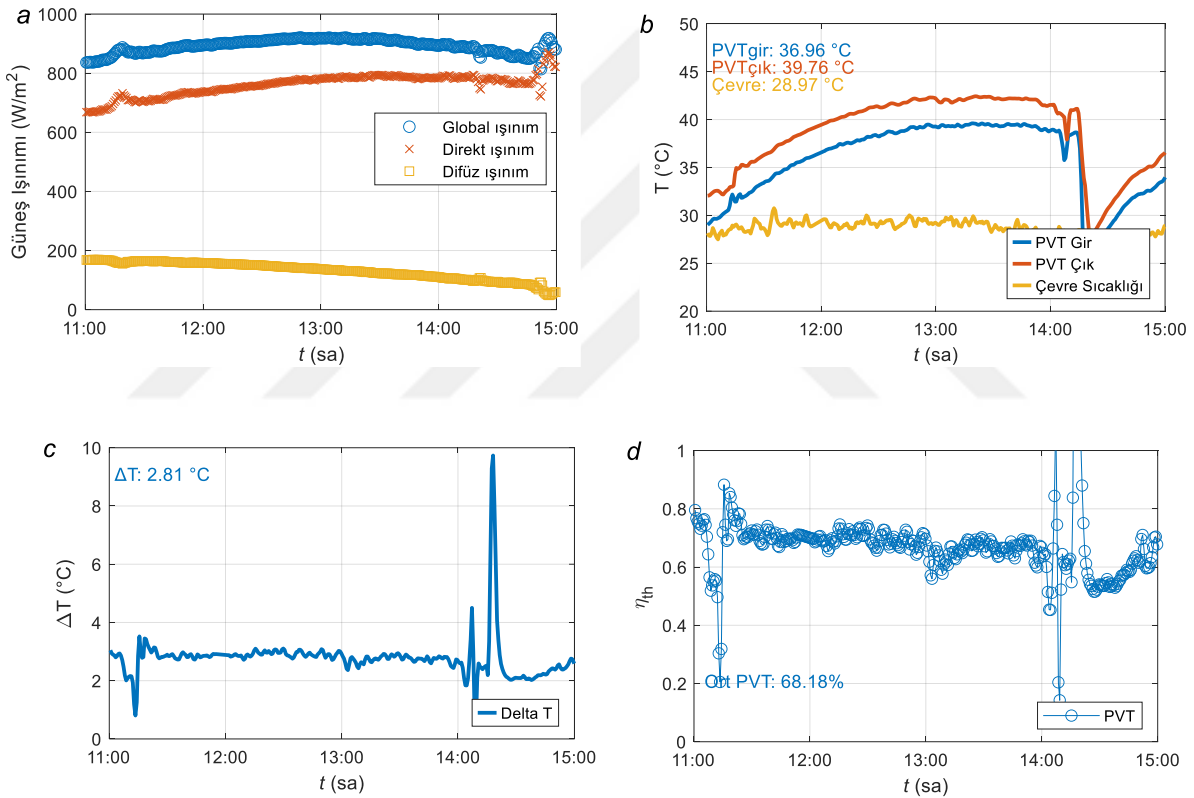
Şekil 4.4(b)'de PVT sistemine ait akışkan giriş-çıkış sıcaklıkları ile çevre sıcaklığının değişimi verilmiştir. Güneş ışınlamının artışıyla birlikte her iki sıcaklıkta da kademeli yükseliş gözlenmiştir. Depoya dönen akışkanın yeniden sisteme girişi, giriş sıcaklığının da zamanla artmasına yol açmıştır. Akışkan sıcaklığındaki artış, PV hücrelerin elektriksel performansını olumsuz etkilemiş, bu nedenle deney sırasında giriş sıcaklığı periyodik olarak düşürülerek sistemin tepkisi incelenmiştir. Çevre sıcaklığı ise yaklaşık 29 °C civarında sabit kalmıştır. Ortalama değerler dikkate alındığında, giriş sıcaklığı 36,9 °C, çıkış sıcaklığı ise 39,7 °C olup sistemde ortalama 2,8 °C'lik bir sıcaklık farkı oluşmuştur. Maksimum değerler ise sırasıyla 39,3 °C ve 42 °C olarak kaydedilmiştir. Bu fark, PVT sistemin ısı katkısını ortaya koyarken aynı zamanda elektriksel verim üzerinde sınırlayıcı bir etki yaratmaktadır (Şekil 4.4(c)).

Şekil 4.4(d)'de görüldüğü üzere, PVT sistemin ortalama termal verimi %68,2 civarındadır. Verimin deney boyunca nispeten sabit kalması, giriş-çıkış sıcaklık farkının belirgin dalgalanma göstermemesiyle ilişkilidir. PVT sistemin en önemli avantajı, PV modüllerin elektriksel çıktısına ek olarak kullanılabilir ısı enerjisi sağlamasıdır. Bu durum, toplam enerji verimliliğinde kayda değer bir üstünlük ortaya koymaktadır.

Elektriksel performans parametreleri Şekil 4.5'te sunulmuştur. Kısa devre akımı, açık devre gerilimi, akım, gerilim, güç üretimi ve elektriksel verimlilik değerleri sıcaklık değişimlerinden doğrudan etkilenmiştir. PVT sistemde soğutma sayesinde yüzey sıcaklığı klasik PV modüle kıyasla daha düşük seyretmiştir. Ancak dolaşan akışkanın ısınmasıyla birlikte 12:20'den sonra akım ve gerilim değerlerinde ani düşüş meydana gelmiştir. Bu anda PVT sistemin giriş ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla 37,9 °C ve 40,9 °C olarak ölçülmüştür. Aynı

saatlerde rüzgâr hızındaki artış, PV panel yüzeyinin daha hızlı soğumasına katkı sağlamış, ancak PVT panel yüzeyi esas olarak akışkan sıcaklığına bağlı kaldığı için çevresel değişimlere daha az tepki vermiştir.

Bu etkinin doğrulanabilmesi için 14:20’de giriş suyu sıcaklığı 23 °C’ye düşürülmüş, bunun sonucunda PVT yüzey sıcaklığı azalmış ve elektriksel parametrelerde hızlı bir toparlanma gözlenmiştir. Bulgular, PVT sistemin elektriksel veriminin doğrudan akışkan sıcaklığıyla ilişkili olduğunu açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, bu değerlendirme yalnızca ölçülen sıcaklık ve elektriksel verilere dayalıdır; çalışmada ayrıntılı bir ısı transferi analizi yapılmadığı için bulgular eğilimsel yorum olarak sunulmuştur.



Şekil 4.4: Global, direkt ve difüz ışıınım değerleri (a), giriş, çıkış ve çevre sıcaklıkları (b), PVT sistemin akışkan çıkış ve giriş sıcaklıkları arasındaki fark (c) ile PVT sistemin termal performansı (d)

PV hücrelerin sıcaklığa karşı yüksek hassasiyeti, akışkan sıcaklığındaki değişimlerin elektriksel performans üzerinde bu denli belirgin etki oluşturmasının temel nedenidir. Hücre sıcaklığı arttıkça yarı iletken malzemenin bant aralığı daralır ve bunun sonucunda açık devre gerilimi (V_{oc}) düşer. Ayrıca sıcaklığın yükselmesi, yük taşıyıcılarının yeniden birleşme

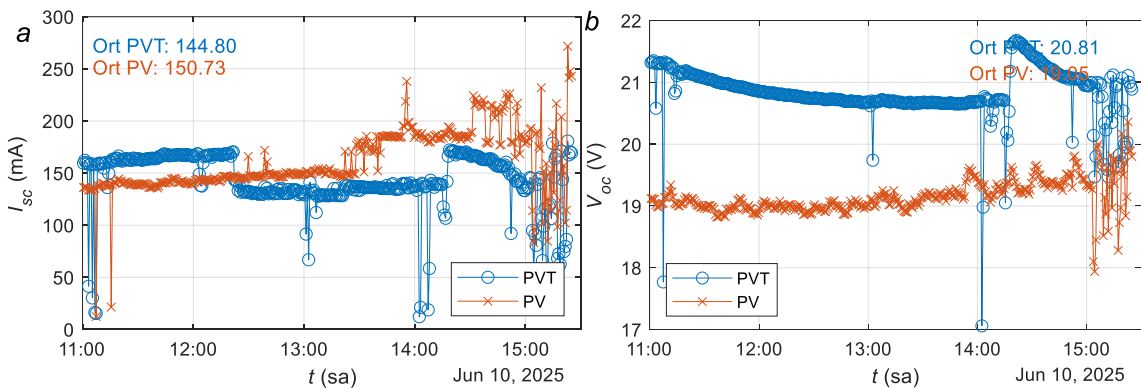
oranını artırarak akım değerini de olumsuz etkiler.

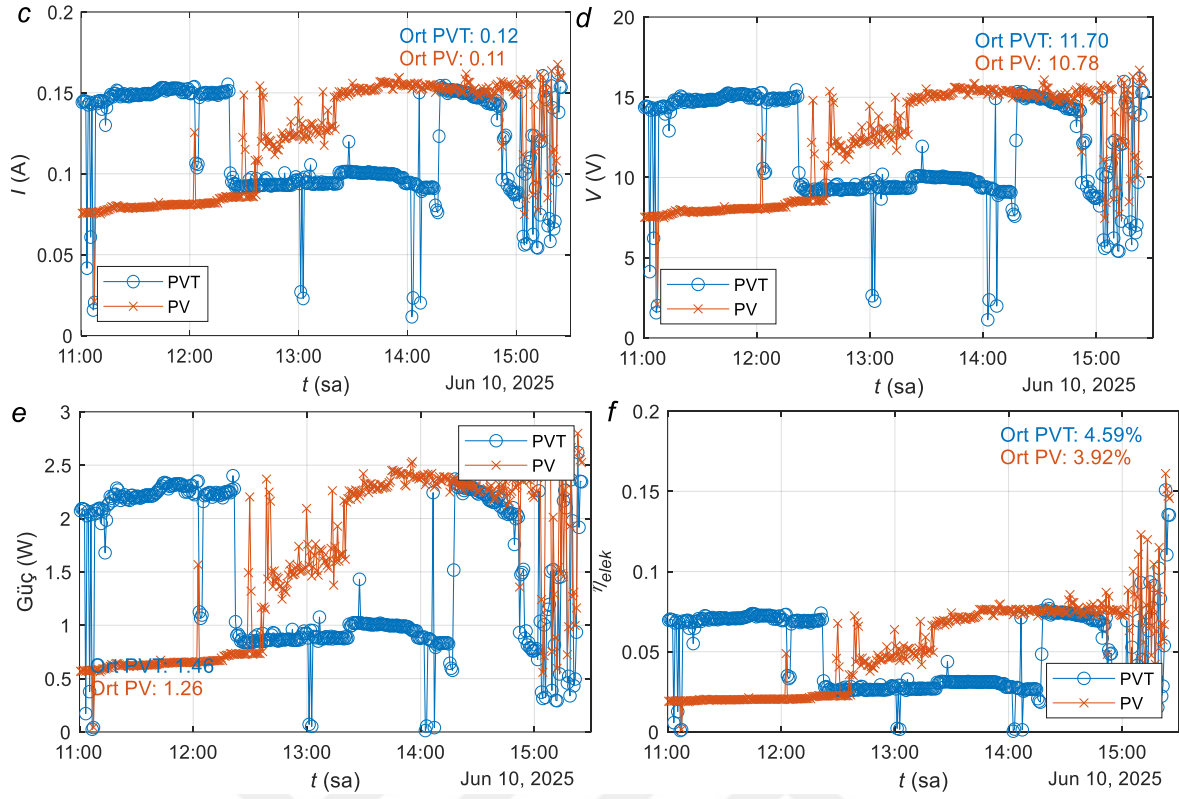
PVT sistemde PV yüzeyi doğrudan akışkanla temas ettiği için panelin sıcaklığı büyük ölçüde akışkanın sıcaklığına bağlıdır. Akışkan ısındığında yüzeyden ısı transferi zorlaşır ve PV hücreleri kısa sürede daha yüksek sıcaklıklara ulaşır. Özellikle 40 °C civarındaki kritik eşik aşıldığında, hücre malzemesinin doğrusal olmayan sıcaklık-tepki karakteri devreye girer ve verim kaybı hızlanarak ani düşüşler ortaya çıkar.

Buna karşın, klasik PV panellerde yüzey doğrudan atmosferle temas halindedir. Bu nedenle özellikle rüzgârın arttığı zamanlarda taşınım ile soğuma etkisi güçlenir ve yüzey sıcaklığı daha düşük seviyelerde tutulabilir. Deney sırasında da rüzgâr hızındaki artış, PV modül yüzey sıcaklığını düşürerek geçici performans iyileşmeleri sağlamıştır.

PVT sistemde ise akışkan ile PV yüzeyi arasında belirli bir ısı direnç bulunmaktadır. Akışkanın sıcaklığı yükseldikçe bu direnç nedeniyle yüzeyden akışkana ısı geçişi kısıtlanır ve bu durum ani yüzey sıcaklığı artışlarına yol açar. Hücre içinde lokal sıcaklık farklarının oluşması, mikroskobik seviyede gerilim dengesizlikleri yaratarak kısa süreli verim kayıplarına neden olabilir.

Sonuç olarak, deneysel gözlemler ve bilinen fiziksel mekanizmalar birlikte değerlendirildiğinde, akışkan sıcaklığının PV yüzeyi üzerinde belirleyici bir kontrol faktörü olduğu ve elektriksel performansı doğrudan şekillendirdiği açıkça görülmektedir.





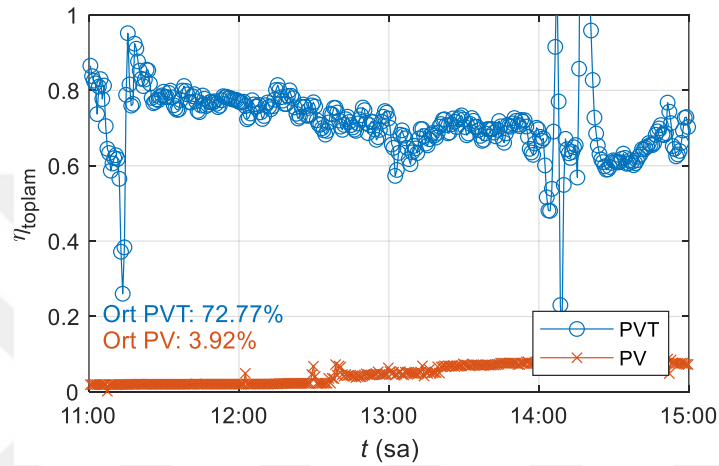
Şekil 4.5: PV ve PVT sistemlerine ait kısa devre akımı (a) ve açık devre gerilimi (b), akım (c), gerilim (d), elektriksel güç üretimi (e) ve elektriksel verimlilik (f)

Şekil 4.5f' te sistemlerin elektriksel verim değerleri karşılaştırılmaktadır. 11:00–12:20 arasındaki dönemde PVT sistemin ortalama elektriksel verimi %7,5 seviyesinde gerçekleşirken, yüksek yüzey sıcaklığı nedeniyle PV panelin verimi yalnızca %2,1 civarında kalmıştır. 12:20 sonrasında rüzgârın etkisiyle PV yüzey sıcaklığı kademeli olarak düşmüş ve buna bağlı olarak verim artarak 14:20 itibarıyla yaklaşık %8'e ulaşmıştır. Aynı zaman aralığında PVT panelde akışkan sıcaklığının yükselmesi, verimin ani bir şekilde %3,3 düzeyine gerilemesine yol açmıştır. Rüzgâr etkisi PVT sistem üzerinde belirgin bir soğutma sağlamadığından bu düşüş devam etmiştir. Ancak 14:20'de giriş akışkan sıcaklığının düşürülmesiyle PVT yüzey sıcaklığı azalmış ve sistemin elektriksel verimi yeniden PV panel ile benzer seviyelere ulaşmıştır.

Şekil 4.6'da PV ve PVT sistemlerin toplam verimleri sunulmaktadır. Termal enerjinin değerlendirilebilmesi, PVT sistemin klasik PV panele kıyasla önemli bir üstünlük elde etmesini sağlamıştır. PV panelin elektriksel verimi yüzey sıcaklığına bağlı olarak %2 ile %8 arasında değişmiş ve belirli zaman dilimlerinde ortalama %3,9 seviyesinde gerçekleşmiştir.

Buna karşılık, PVT sistemde yaklaşık %68,2 oranında ek ısııl enerji kullanımı sayesinde toplam verimlilik %72,7'ye ulaşmıştır.

Sonuçlar, optik filtreli PVT tasarımının avantaj ve sınırlılıklarını ortaya koymaktadır. Optik filtrenin toplam verimi artırıcı etkisi gözlenmiş olmakla birlikte, akışkan giriş sıcaklığı yükseldiğinde elektriksel verimde kayıplar meydana gelmiş ve özellikle 40 °C civarındaki kritik eşik değeriinde performansın belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.6: PV ve PVT sistemlerin toplam verimleri

Şekil 4.6'da PV ve PVT sistemlerin toplam verimleri karşılaştırıldığında, optik filtrenin elektriksel performansa doğrudan katkısı net şekilde ayrıştırılamamaktadır. Ancak ortalama güç çıktıları dikkate alındığında, Şekil 4.5'e'de yer aldığı üzere PVT sistemin 1,46 W üretim yaptığı, PV panelin ise 1,26 W ile daha düşük kaldığı görülmektedir. Bu durum, PVT sistemin ortalama %15,9 oranında daha yüksek güç sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, deney sırasında akışkan giriş sıcaklığının zaman zaman yükselmesi, PV hücre sıcaklığının hedeflenen düzeyde tutulmasını zorlaştırmış ve dolayısıyla gözlenen farkın, ideal koşullarda elde edilebilecek potansiyel kazancın altında kalmasına neden olmuştur. Daha etkin bir termal yönetim sağlandığında optik filtrenin elektriksel verime katkısı çok daha belirgin hale gelebilecektir.

Bu avantaj, optik filtrenin gelen ışınının bir bölümünü doğrudan elektrik üretimine katkı sağlayacak şekilde PV hücrelerine yönlendirmesi, geri kalanını ise termal kazanca aktarması ve modül sıcaklığının kontrol altında tutulması sayesinde ortaya çıkmaktadır. Literatür

bulguları da bu durumu desteklemektedir. Örneğin Safan vd. (2024), su bazlı spektral ayrıştırma filtresi kullanılan bir sistemin, klasik PV panellere kıyasla elektriksel verimi %29,4'e kadar artırabildiğini rapor etmiştir. Benzer biçimde, Crisostomo vd. (2015) tarafından geliştirilen yoğunlaştırmalı hibrit PV/T kolektör tasarımında, spektrumun belirli dalga boylarında ayrıştırılması sayesinde geleneksel CPV sistemine kıyasla %47 daha yüksek güç çıktısı elde edilmiştir.

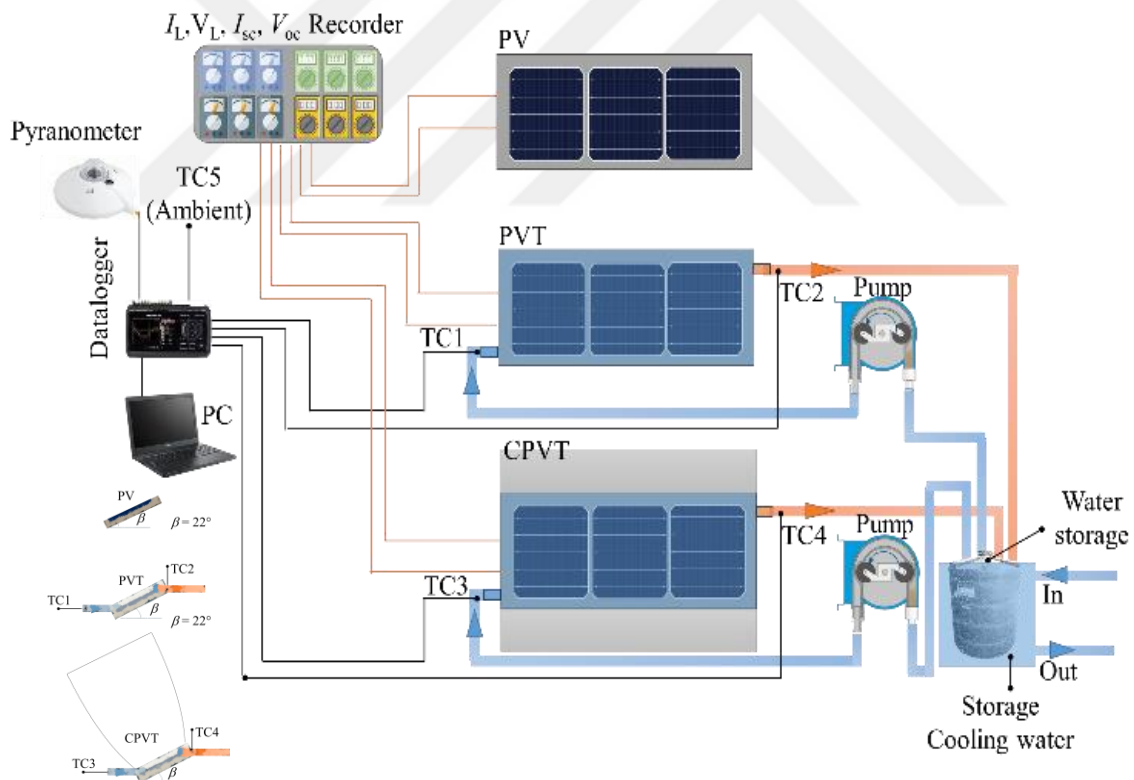
Dolayısıyla, elde edilen deneysel sonuçlar ve literatürdeki bulgular birlikte değerlendirildiğinde, optik filtre uygulamasının hem elektriksel hem de termal performansı iyileştiren önemli bir strateji olduğu görülmektedir.

İkinci model PV-PVT-CPVT için; PV ve PVT ünitelerinin hemen yanına aynı özelliklere sahip yoğunlaştırıcı düzeneği ile donatılmış üçüncü bir CPVT panel yerleştirilmiştir. Bu grup panelin ayrı ayrı gerilim, akım ve sıcaklık verileri de eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Böylece, klasik bir PV modül, optik filtre destekli ve sıvı soğutmalı PVT modül ve yoğunlaştırıcı optik filtre destekli ve sıvı soğutmalı CPVT modül performansları doğrudan karşılaştırılmış, elde edilen farklar ayrıntılı olarak grafikler üzerinden değerlendirilmiştir.

Yoğunlaştırmalı fotovoltaik termal (CPVT) sistemler kapsamında, bu çalışmada bileşik parabolik yoğunlaştırıcılar (CPC) esas alınmıştır. Kullanılan tam boyutlu CPC reflektör için yoğunlaştırma oranı 2 olarak belirlenmiş, kabul açısı ise 30° olacak şekilde ayarlanmıştır. PV, PVT ve CPC-CPVT sistemlerinin deneysel incelemesi, 21 Temmuz 2025 tarihinde Türkiye'nin Bartın ili sınırlarında yer alan Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İdari Binası çatısında (41,6°K, 32,3°D) gerçekleştirilmiştir.

Soğutma akışkanının sistem içerisindeki dolaşımı, $\pm 0,5$ debi doğruluğuna sahip Shenchen YZ1515x DF600 peristaltik pompa kullanılarak sağlanmış ve hacimsel debi 150 mL/dk sabit tutulmuştur. Güneş ışınımı ve sıcaklık ölçümlerinin kaydedilmesi amacıyla, $\pm 0,3$ okuma doğruluğu ve $\pm 0,1$ tam ölçek doğruluğu sunan U8550 gerilim/sıcaklık modülüne sahip Hioki LR8450 veri kaydedici kullanılmıştır. Akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıkları ile ortam sıcaklığı ölçümleri, $\pm 0,4$ hassasiyete sahip K tipi termokupllar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Deney düzeneğine, soğutma akışkanının toplanması ve sistem içerisinde kesintisiz dolaşımının sağlanabilmesi amacıyla bir su deposu entegre edilmiştir. Deney sistemi, güneşlenmeden maksimum düzeyde faydalanmak amacıyla tam güney yönelimli olacak şekilde konumlandırılmış ve panel yüzeyi, güneş öğle vaktinde güneş ışınlarına dik olacak biçimde 22° eğim açısı ile yerleştirilmiştir. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi Şekil 4.7’de, kurulan sistemin fotoğrafı ise Şekil 4.8’de sunulmaktadır.



Su akışkanının kütsel debisi 150 mL/dk olarak sabit tutulmuştur. Fotovoltaik panelin bir

soğutma akışkanı kullanılarak soğutulması sırasında elde edilen termal enerji kazancı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir (Incropera, 2007; Duffie ve Beckman, 2013).

$$\dot{Q}_{th} = \dot{V}_f \rho_f c_{p,f} (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (18)$$

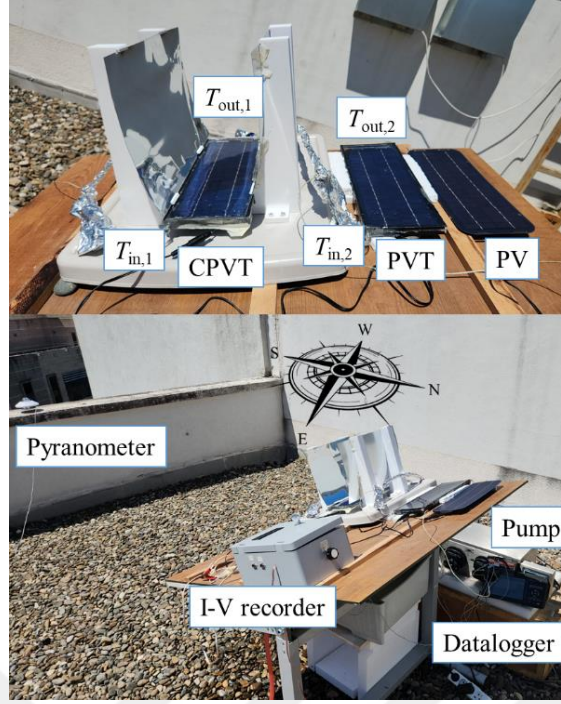
numaralı denklemde, $\dot{V}_f$ sistemin hacimsel debisini, ρ_f soğutma akışkanının yoğunluğunu, $c_{p,f}$ soğutma akışkanının özgül ısı kapasitesini, $T_{f,in}$ ve $T_{f,out}$ ise sırasıyla akışkanın giriş ve çıkış sıcaklıklarını ifade etmektedir. Sistemin termal verimi aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmaktadır.

$$\eta_{th} = \dot{Q}_{th} / \dot{Q}_s \quad (19)$$

Fotovoltaik modülün verimi, eğimli yüzeye gelen güneş ışınımına karşılık PV modül tarafından üretilen enerjinin oranı olarak aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$\eta_{elec} = P_{MP} \dot{Q}_s^{-1} = V_{oc} I_{sc} FF \dot{Q}_s^{-1} \quad (20)$$

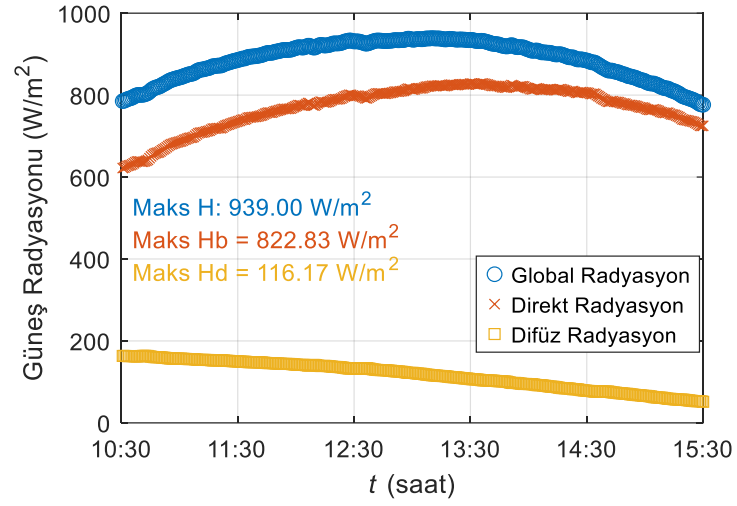
Sistemin toplam güç üretimi ise, sistemin termal ve elektriksel güç üretimlerinin toplamı olarak tanımlanmıştır.



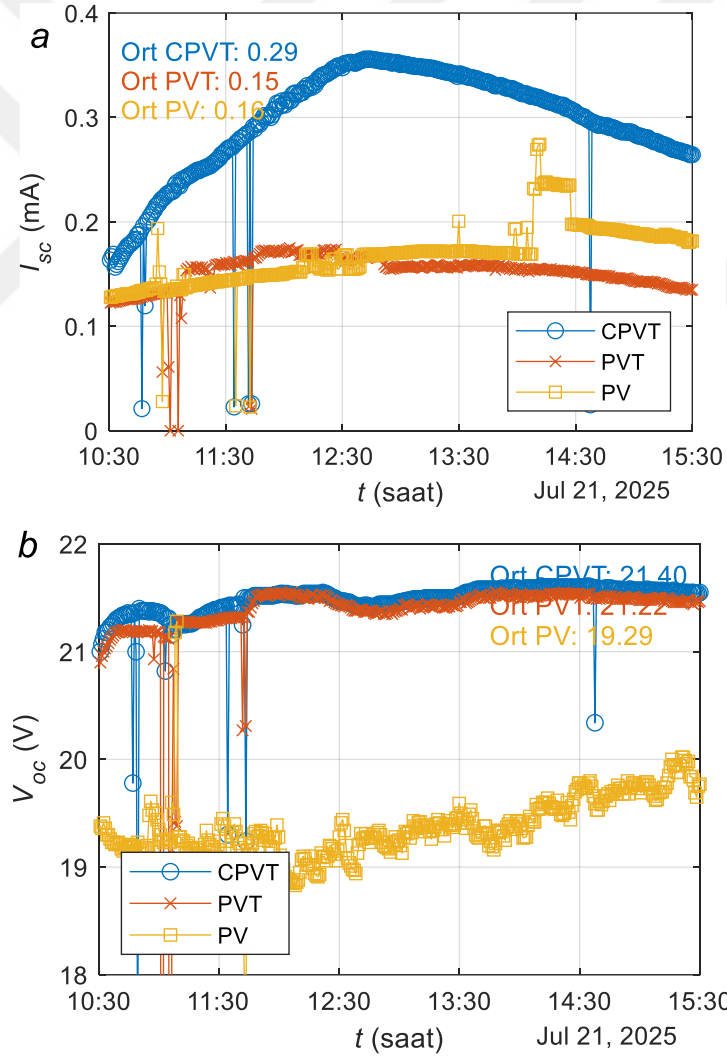
Şekil 4.8: İkinci modelimiz olan deneysel düzeneğin fotoğrafı

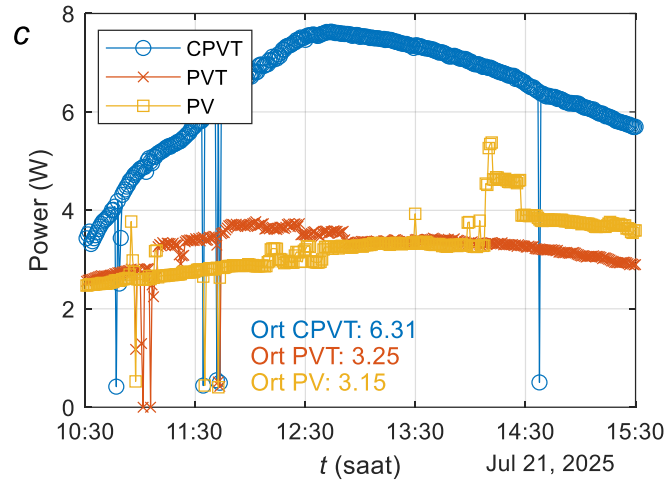
Şekil 4.9’da, deney süresi boyunca küresel, direkt ve yayınlık güneş ışınımının zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. Ölçümler sonucunda, en yüksek küresel ışınım değeri (H) yaklaşık 13:00 civarında 939 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Aynı zaman diliminde, direkt ışınım (H_b) $822,8 \text{ W/m}^2$, yayınlık ışınım (H_d) ise $136,9 \text{ W/m}^2$ olarak kaydedilmiştir.

Bu veriler, toplam küresel ışınımın yaklaşık %87’sinin direkt bileşenlerden, yaklaşık %13’ünün ise yayınlık bileşenlerden oluştuğunu göstermektedir. Ölçüm süresi boyunca gökyüzü koşullarının büyük ölçüde açık olduğu gözlemlenmiş olup, elde edilen ışınım dağılımı özellikle direkt ışınım ağırlıklı çalışan güneş enerjisi sistemleri için uygun bir çalışma ortamı sağlandığını ortaya koymaktadır.

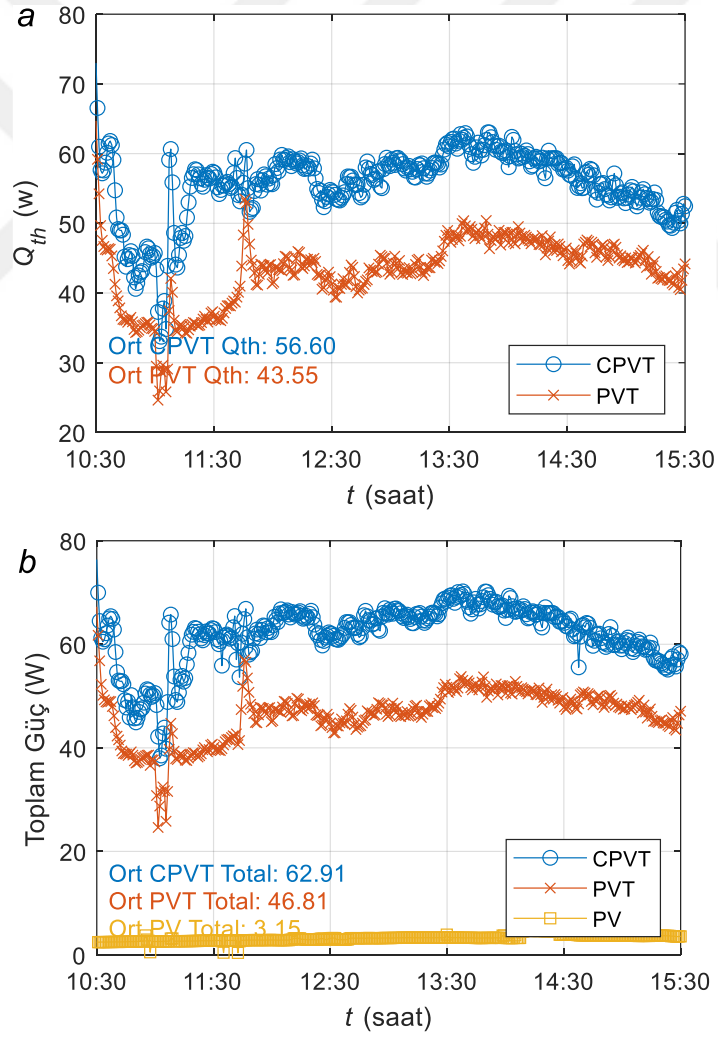


Şekil 4.9: Küresel, direkt ve yayımlık güneş ışınlımı





Şekil 4.10: Kısa devre akımı (I_{sc}) (a), açık devre gerilimi (V_{oc}) (b) ve I_{sc} ile V_{oc} esas alınarak hesaplanan maksimum güç üretimi (c)



Şekil 4.11: CPVT, PVT ve PV sistemlerinin Q_{th} (a) ve toplam güç üretimi (b)

Şekil 4.10a'da, 21 Temmuz 2025 tarihinde CPVT, PVT ve PV sistemleri için kısa devre akımı (I_{SC}) değerlerinin zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. İncelenen üç sistem arasında CPVT konfigürasyonu, ölçüm süresi boyunca istikrarlı biçimde en yüksek kısa devre akımı değerlerini üretmiş ve bu değerler güneş öğle saatlerine yakın bir zaman aralığında maksimum seviyeye ulaşmıştır. Ortalama ISC değerleri CPVT sistemi için 0,29 A, PVT sistemi için 0,15 A ve PV sistemi için 0,16 A olarak hesaplanmıştır.

CPVT sisteminde elde edilen bu belirgin artış, spektral filtreleme ile etkin sıvı soğutmanın birlikte sağladığı avantajlara dayandırılmaktadır. Bu bütünleşik yapı, fotovoltaik hücre sıcaklığının düşürülmesine ve aktif yüzey üzerinde daha yüksek etkin ısıtım yoğunluğunun sağlanmasına olanak tanımaktadır. Buna karşılık, PVT ve PV sistemleri daha kararlı ancak daha düşük bir elektriksel performans sergilemiş olup, bu durum geleneksel sistemlerin yoğunlaştırılmış güneş ısıtım koşullarında elektrik üretimini artırmadaki sınırlı etkinliğini ortaya koymaktadır. Ölçümlerin erken saatlerinde gözlenen dalgalanmaların ise düşük ısıtım seviyeleri ve sistemlerin kararlı çalışma rejimine geçiş süreciyle ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.10b'de, deney süresi boyunca açık devre gerilimi (V_{OC}) değerlerinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. CPVT sistemi 21,40 V ile en yüksek ortalama V_{OC} değerini korurken, PVT sistemi 21,22 V ile bu değeri yakından izlemiştir. Geleneksel PV sistemi ise 19,29 V ortalama değeri ile diğer sistemlere kıyasla daha düşük bir gerilim performansı sergilemiştir.

CPVT ve PVT sistemlerinde gözlenen daha yüksek gerilim seviyeleri, esas olarak soğutma mekanizmasının hücre sıcaklığını azaltmasına bağlı olup, bu durum sıcaklığa bağlı elektriksel kayıpların sınırlandırılmasını sağlamaktadır. PV sisteminde ise daha geniş dalgalanmalar ve daha düşük gerilim aralıkları gözlenmiş, bu da yüksek çalışma sıcaklıklarının gerilim kararlılığı ve elektriksel çıktı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğunu göstermiştir.

Şekil 4.10c'de, CPVT, PVT ve PV sistemlerinin elektriksel güç üretimlerinin zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. CPVT sistemi, diğer iki sistemle karşılaştırıldığında belirgin biçimde daha yüksek bir güç çıktısı elde etmiştir. Ortalama elektriksel güç üretimi CPVT sistemi için 6,31 W olarak hesaplanırken, bu değerler PVT ve PV sistemleri için sırasıyla

3,25 W ve 3,15 W olarak belirlenmiştir. CPVT sisteminde gözlenen bu kayda değer artış, optik yoğunlaştırma, spektral seçicilik ve etkin termal yönetimin birlikte çalışmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle güneş öğle saatlerine yakın zamanlarda CPVT sisteminde daha belirgin bir güç tepe noktası oluşması, yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin elektrik enerjisine daha verimli biçimde dönüştürüldüğünü ortaya koymaktadır. Buna karşılık, PV ve PVT sistemleri daha sınırlı artışlar göstererek görece düşük ve kararlı bir güç üretimi sergilemiştir.

Şekil 4.11a'da, CPVT ve PVT sistemlerine ait termal enerji kazancı (Q_{th}) değerlerinin zamana bağlı değişimi sunulmaktadır. CPVT sistemi, ölçüm süresi boyunca daha yüksek bir termal çıktı üretmiş ve ortalama termal güç değeri 56,60 W olarak belirlenmiştir. PVT sistemi için ise bu değer 43,55 W olarak hesaplanmıştır. İki sistem arasındaki performans farkı, özellikle güneş ışınımının en yüksek seviyelere ulaştığı saatlerde daha belirgin hâle gelmiştir. Bu durum, CPVT sisteminde kullanılan bileşik parabolik yoğunlaştırıcı (CPC) ve spektral filtre entegrasyonunun ısı toplama yeteneğini artırdığını göstermektedir. Ölçümlerin başlangıç safhasında görülen dalgalanmaların, sistemlerin kararlı çalışma koşullarına ulaşma süreciyle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Genel olarak elde edilen sonuçlar, CPVT sisteminin güneş enerjisinden hem termal hem de elektriksel açıdan daha etkin biçimde yararlandığını ortaya koymaktadır.

Şekil 4.11b'de ise CPVT, PVT ve PV sistemlerinin toplam güç üretimi, yani elektriksel ve termal enerji çıktılarının toplamı sunulmaktadır. CPVT sistemi, 62,91 W ortalama toplam güç değeri ile en yüksek performansı sergilerken, PVT sistemi 46,81 W ortalama değer ile ikinci sırada yer almıştır. PV sistemi ise termal enerji geri kazanımına sahip olmadığından yalnızca 3,15 W toplam güç üretmiştir. CPVT sisteminde elde edilen bu üstün performans, optik yoğunlaştırma, spektral seçicilik ve akışkan tabanlı soğutmanın sinerjik etkisine bağlanmaktadır. Bu bulgular, fotovoltaiik sistemlere spektral filtreler ve yoğunlaştırıcıların entegre edilmesinin, toplam enerji dönüşüm verimliliğini kayda değer ölçüde artırdığını açıkça göstermektedir.

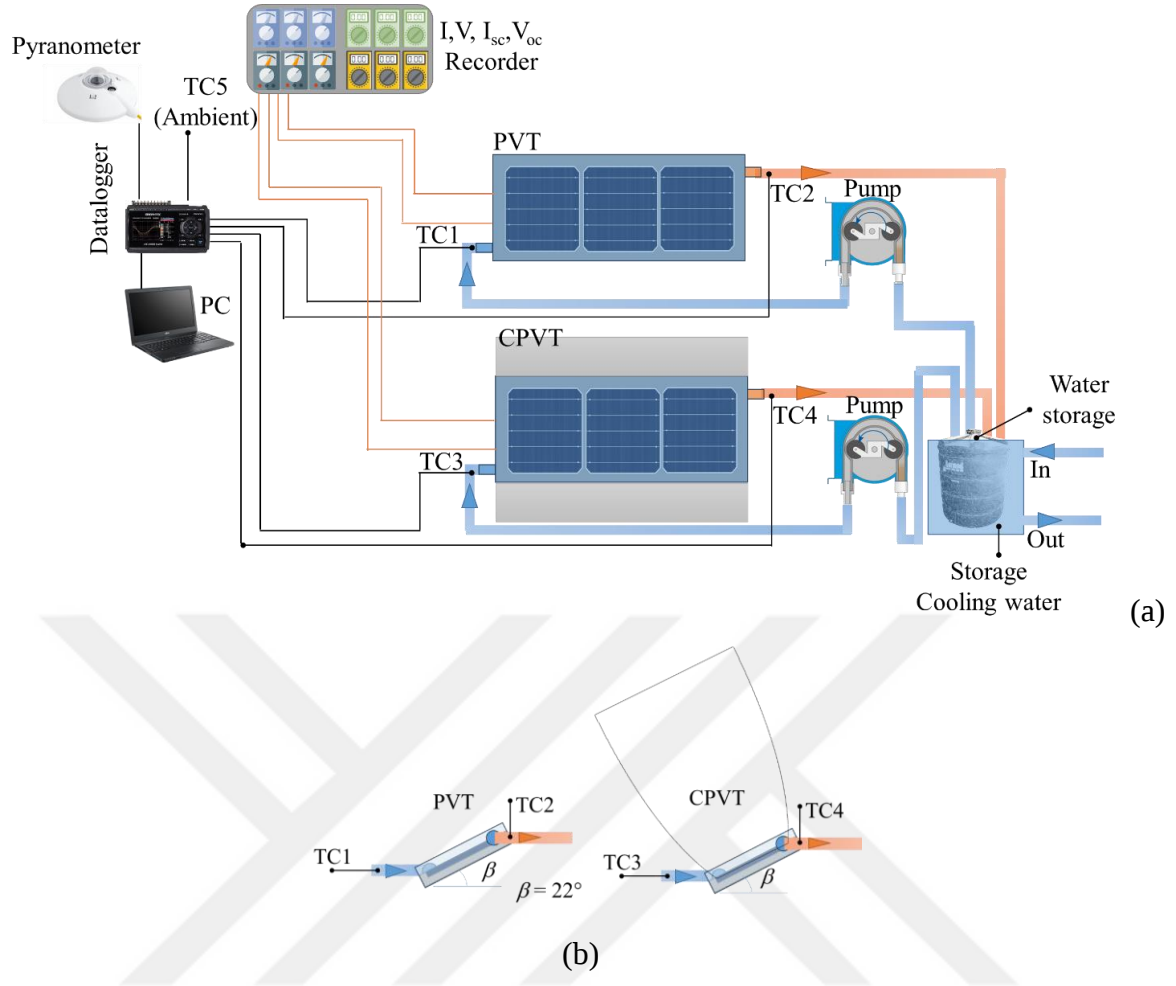
Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, bileşik parabolik yoğunlaştırıcı (CPC) ve spektral olarak seçici optik filtreler ile entegre edilen CPVT sisteminin, incelenen diğer konfigürasyonlara kıyasla belirgin bir performans üstünlüğüne sahip olduğunu ortaya

koymuştur. Geleneksel PV ve PVT sistemleri ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda, CPVT sisteminin hem elektriksel hem de termal enerji ıktıları bakımından daha yüksek değerlere ulaştığı ve bu durumun toplam enerji dönüşüm verimliliğinde kayda değer bir artış sağladığı belirlenmiştir.

Söz konusu performans iyileşmesi; güneş işınımının etkin biçimde yoğunlaştırılması, fotovoltaik hücre sıcaklığının düşürülmesi ve spektral enerji yönetiminin başarılı bir şekilde uygulanmasıyla ilişkilendirilmektedir. Elde edilen bulgular, optik ve termal kontrol yaklaşımlarının CPVT sistemlerine entegre edilmesinin, sistem performansını önemli ölçüde geliştirdiğini doğrulamakta ve bu tür hibrit yapıların yüksek verimli güneş enerjisi uygulamaları için güçlü bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir.

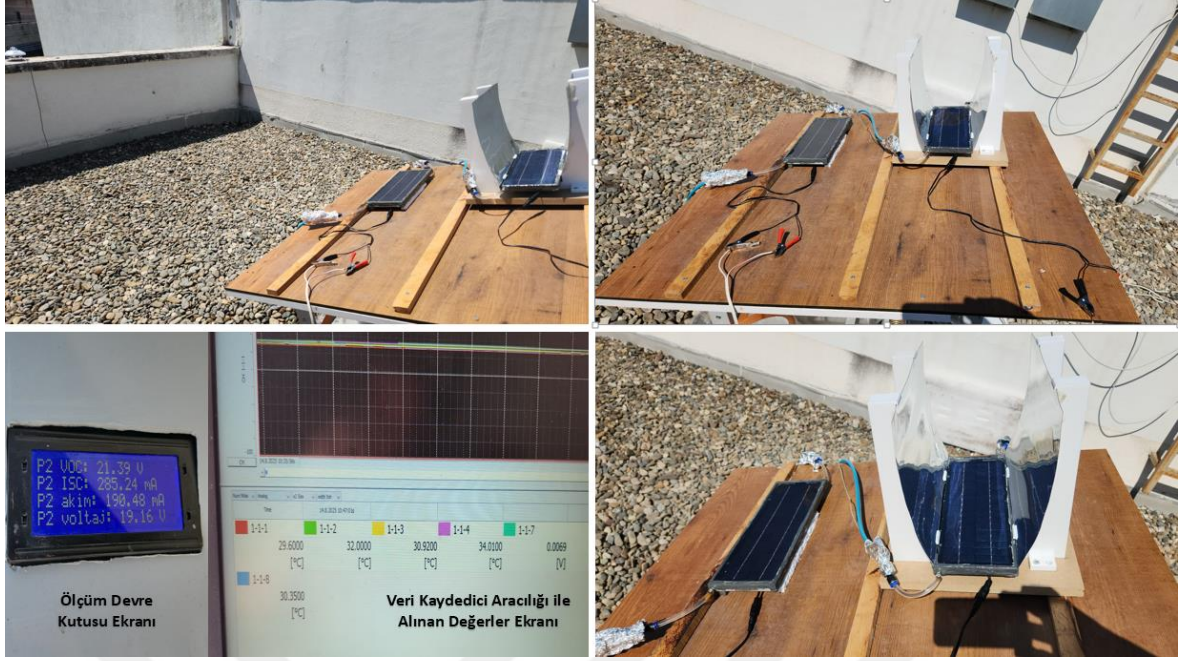
nc model PVT-CPVT için; PVT nitesinin hemen yanına aynı özelliklere sahip yoğunlaştırıcı düzeneği ile donatılmış ikinci bir CPVT panel yerleştirilmiştir. Bu ikili panelin ayrı ayrı gerilim, akım ve sıcaklık verileri de eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Böylece, klasik bir PV modül, optik filtre destekli ve sıvı soğutmalı PVT modül ve yoğunlaştırıcı optik filtre destekli ve sıvı soğutmalı CPVT modül performansları doğrudan karşılaştırılmış, elde edilen farklar ayrıntılı olarak grafikler üzerinden değerlendirilmiştir.

Deneysel düzeneğin şematik gösterimi ve kesit görünümü şekil 4.12’de, kurulan deneysel düzeneğin ve ölçüm değerleri ekran fotoğrafı ise şekil 4.13’te sunulmaktadır.

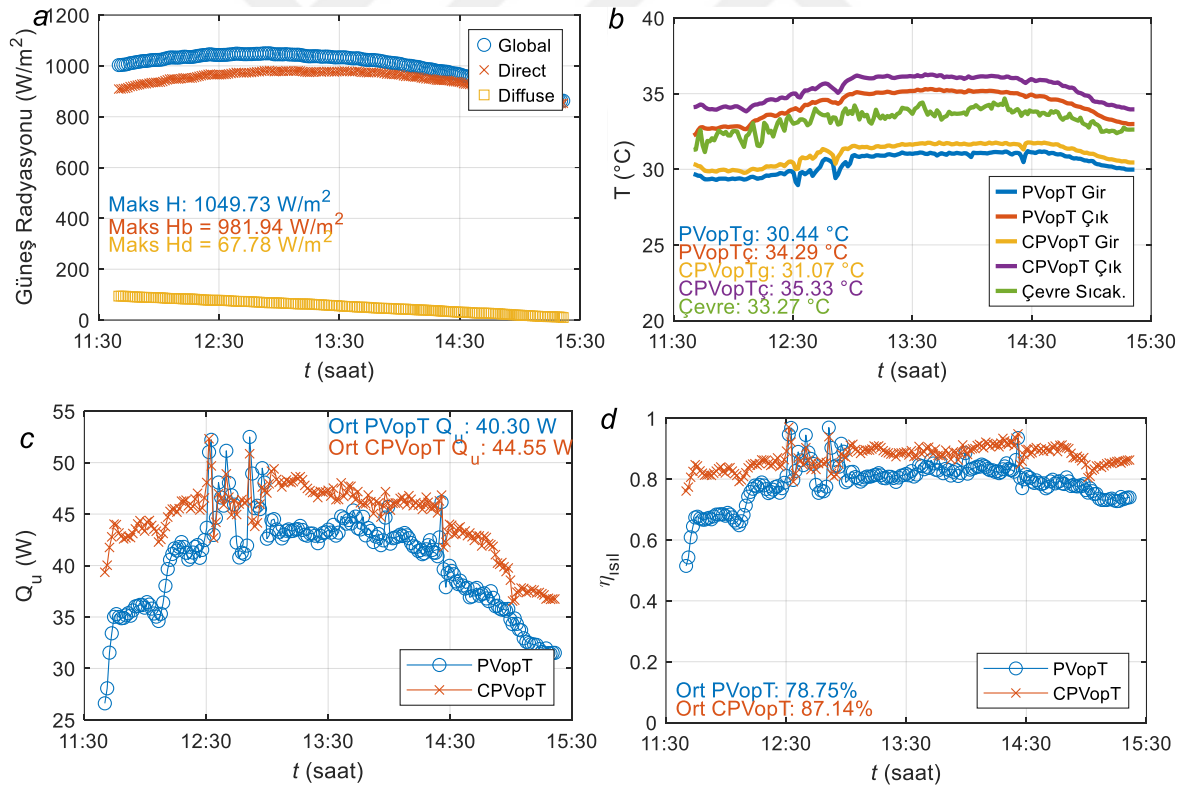


Şekil 4.12: Deney düzeneğinin şematik diyagramı (a) ve PVT ile CPVT modüllerinin kesit görünümü (b)

Üçüncü modelimiz ile gerçekleştirilen deney çalışması 14 Ağustos 2025 tarihinde yürütülmüştür. Değerlendirme sürecinde ise kaydedilen veriler üzerinden yapılan analizler, birinci ve ikinci model deney düzeneklerinde uygulanan yöntemlerle aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13: Deneysel düzeneğin ve ölçüm değerleri ekran fotoğrafı



Şekil 4.14: 150 ml/dak için CPC-PVT ve PVT sistemlerinin küresel, doğrudan ve dağınık radyasyonu (a), giriş, çıkış ve ortam sıcaklıkları (b), faydalı termal gücü (c) ve termal verimliliği (d).

Şekil 4.14 (a), 14 Ağustos 2025 tarihinde gerçekleştirilen deney sırasında ölçülen global (H), direkt (H_b) ve difüz (H_d) güneş radyasyonu değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Ölçümler yaklaşık 11:30–15:30 saatleri arasında gerçekleştirilmiş olup, radyasyon değerleri öğle saatlerine doğru artış göstermiş, yaklaşık 12:45–13:00 civarında maksimum seviyeye ulaşmış ve daha sonra kademeli olarak azalmıştır. Deney süresince ölçülen maksimum global radyasyon değeri 1049,73 W/m² olup, bunun 981,94 W/m²'lik kısmı direkt bileşenden, 67,78 W/m²'lik kısmı ise difüz bileşenden oluşmaktadır. Bu değerlere göre maksimum koşullarda global radyasyonun yaklaşık %93,6'sı direkt, yalnızca %6,4'ü difüz radyasyondan meydana gelmektedir. Bu dağılım, deney gününde atmosferin oldukça açık olduğunu ve bulutluluk etkisinin ihmal edilebilir seviyede kaldığını göstermektedir. Yüksek direkt radyasyon oranı, yoğunlaştırıcı sistemlerin optik performansını doğrudan destekleyerek hem ısı kazanımının hem de elektrik üretiminin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu sonuçlar, deneyin gerçekleştirildiği günün optik filtreli CPVT ve PVT sistemlerinin karşılaştırılması açısından uygun hava koşullarında olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.14 (b), gerçekleştirilen deney sırasında PVT (PVopT) ve CPC-CPVT (CPVopT) sistemlerine ait akışkan giriş–çıkış sıcaklıkları ile çevre sıcaklığının zamana bağlı değişimini göstermektedir. Ölçümler 11:30–15:30 saatleri arasında yapılmış olup, tüm sıcaklık eğrilerinin güneş radyasyonundaki değişime paralel bir eğilim sergilediği görülmektedir. Deney süresince PVT sisteminin giriş ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla ortalama 30,44 °C ve 34,29 °C olarak ölçülürken, CPVT sisteminde bu değerler 31,07 °C (giriş) ve 35,33 °C (çıkış) seviyelerine ulaşmıştır. Çevre sıcaklığı ise deney boyunca ortalama 33,27 °C civarında seyretmiştir. Her iki sistem için çıkış sıcaklıklarının giriş sıcaklıklarına kıyasla belirgin şekilde daha yüksek olması, optik filtre sisteminin etkin bir şekilde ısı kazancı sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, CPVT sisteminin çıkış sıcaklığının PVT sistemine göre yaklaşık 1,0–1,1 °C daha yüksek olması, yoğunlaştırıcı sistem sağladığı radyasyon kazanımının ısı performans üzerindeki etkisini doğrudan göstermektedir. Özellikle 12:30–14:00 saatleri arasında CPVT sisteminin hem giriş hem de çıkış sıcaklıklarının PVT sistemine kıyasla yüksek seviyelerde seyretmesi, yüksek direkt radyasyon oranlarının yoğunlaştırıcı sistem üzerinde pozitif etki oluşturmaktadır. Buna karşın, PVT sisteminde daha düşük çıkış sıcaklıkları elde edilmesi, optik filtreleme ve yoğunlaştırma etkisinin bulunmamasına bağlı olarak daha sınırlı ısı kazanıma işaret

etmektedir. Bu sonuçlar, optik filtreli CPC-CPVT sisteminin, çevre sıcaklığına rağmen daha yüksek sıcaklık artışı sağlayabildiğini ve özellikle yüksek direkt radyasyon koşullarında termal performans açısından avantajlı bir yapı sunduğunu açıkça göstermektedir.

Şekil 4.14 (c) faydalı ısı gücü (Q_u) değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Isıl güç üretiminin güneş radyasyonundaki değişimle uyumlu bir davranış sergilediği görülmektedir. Deney süresince PVT sisteminin ortalama faydalı ısı gücü 40.30 W olarak belirlenirken, CPVT sisteminde bu değer 44.55 W seviyesine ulaşmıştır. Buna göre, optik filtreli CPC-CPVT sisteminin, PVT sistemine kıyasla yaklaşık %10,5 daha yüksek ortalama ısı gücü ürettiği tespit edilmiştir. Özellikle 12:00–14:00 saatleri arasında CPVT sisteminin faydalı ısı gücü değerlerinin 45–50 W aralığında yoğunlaştığı, PVT sisteminde ise bu değerlerin çoğunlukla 40–45 W seviyelerinde kaldığı görülmektedir. Eğrilerde gözlenen kısa süreli dalgalanmalar rüzgar hızı gibi değişimi gibi çevresel etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

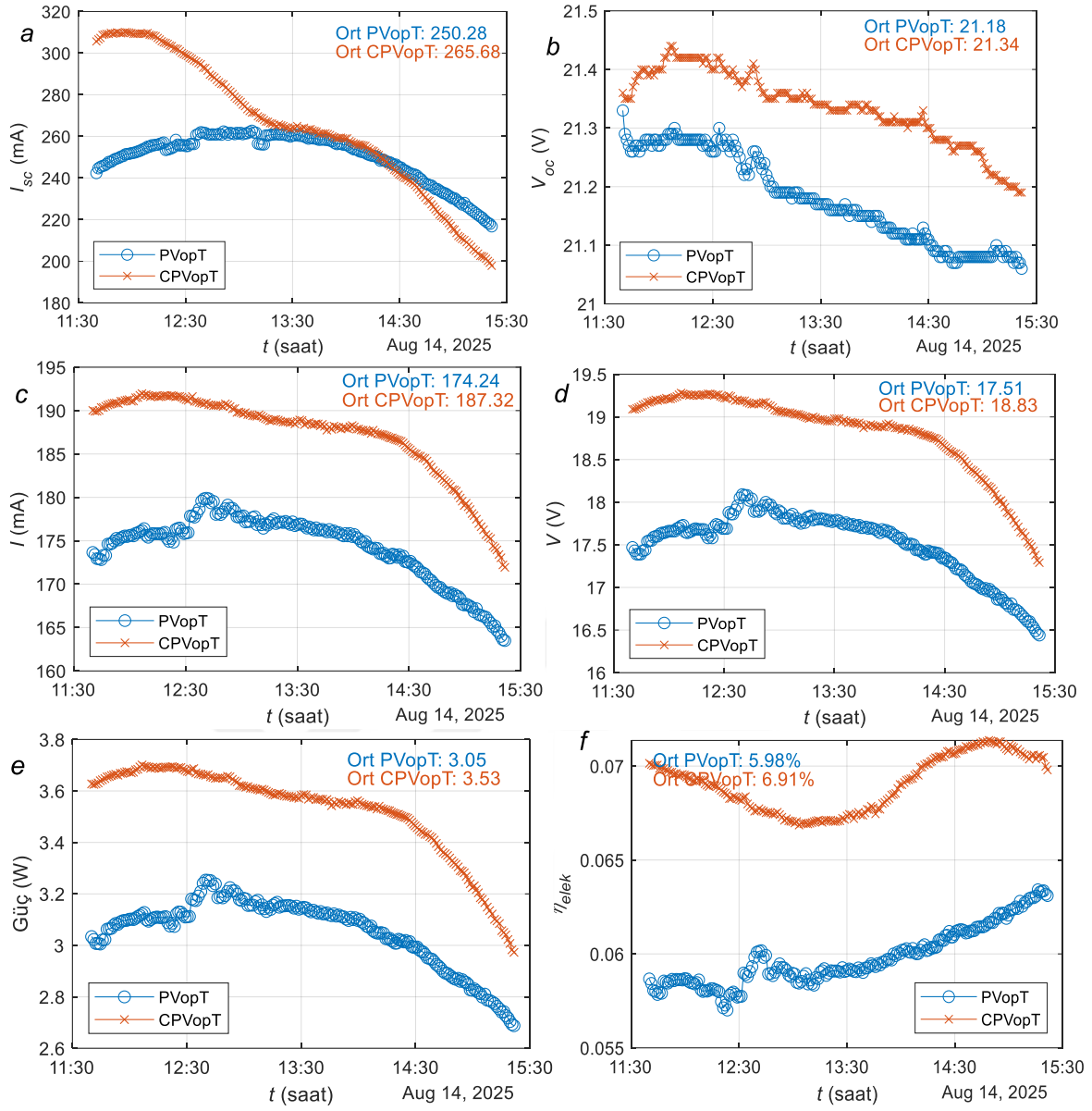
Deneyin başlangıç ve bitiş saatlerine doğru her iki sistemde de faydalı ısı gücünün azalması, global ve direkt güneş radyasyonundaki düşüşle doğrudan ilişkilidir. Ancak bu azalma sürecinde dahi CPVT sisteminin Q_u değerlerinin PVT sisteminin üzerinde kaldığı, yoğunlaştırıcı ve optik filtreleme etkisinin gün boyunca sürdürülebilir bir ısı avantaj sağladığını göstermektedir. Bu sonuçlar, yüksek direkt radyasyon oranına sahip açık atmosfer koşullarında, optik filtreli CPC-CPVT sisteminin yalnızca elektriksel değil, termal performans açısından da belirgin bir üstünlük sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.14 (d), termal verimin (η_{th}) zamana bağlı değişimini göstermektedir. Deney süresi boyunca PVT sisteminin ortalama termal verimi %78,75, CPVT sisteminin ortalama termal verimi ise %87,14 olarak hesaplanmıştır. Buna göre, optik filtreli CPC-CPVT sisteminin, PVT sistemine kıyasla yaklaşık %10,7 oranında daha yüksek termal verim sağladığı belirlenmiştir. Özellikle öğle saatleri (12:30–14:00) arasında CPVT sisteminin termal veriminin %88–92 aralığında seyrettiği, PVT sisteminde ise bu değerlerin çoğunlukla %75–85 bandında kaldığı görülmektedir. CPVT sisteminin daha yüksek ve daha kararlı bir termal verim profili sergilemesi, yoğunlaştırıcı yapının sağladığı ek ışıınım kazanımı ile birlikte optik filtreleme sayesinde PV yüzeyindeki aşırı ısınmanın sınırlandırılmasına bağlanabilir. Deneyin başlangıç ve bitiş saatlerinde her iki sistemde de termal verimde kısmi bir düşüş

gözlenmiş olsa da, bu süreçte CPVT sisteminin termal veriminin PVT sisteminin üzerinde kaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum, optik filtreli CPC-CPVT yapısının değişken ışınım koşulları altında daha verimli bir ısı toplama mekanizması sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar optik filtre entegrasyonunun CPC-CPVT sistemlerinin termal performansını anlamlı ölçüde iyileştirdiğini açıkça göstermektedir.

Şekil 4.15 (a–f) PVT (PVopT) ve optik filtreli CPC-CPVT (CPVopT) sistemlerine ait kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), akım, gerilim, güç üretimi ve elektriksel verimin zamana bağlı değişimini göstermektedir. Ölçülen elektriksel parametreler incelendiğinde, CPVT sisteminin tüm deney süresince PVT sistemine kıyasla daha yüksek elektriksel performans sergilediği görülmektedir. Ortalama kısa devre akımı PVT için 250,28 mA, CPVT için 265,68 mA olarak ölçülmüş olup, CPVT sisteminde yaklaşık %6,1’lik bir artış sağlanmıştır.

Açık devre gerilimi açısından bakıldığında ise PVT sisteminde ortalama 21,18 V, CPVT sisteminde 21,34 V değerleri elde edilmiş ve CPVT sisteminin daha yüksek ve daha kararlı bir V_{oc} profili sunduğu belirlenmiştir. Bu iyileşme, optik filtreleme sayesinde PV hücreye yönlendirilen faydalı spektral banttaki foton sayısının artırılması ve PV yüzey sıcaklığının düşürülmesine bağlı olarak ısı kaynaklı elektriksel kayıpların azaltılması ile ilişkilendirilmektedir.



Şekil 4.15: 150 ml/dak debi durumunda CPC-PVT ve PVT sistemlerinin kısa devre koşulundaki akımı (a), açık devre koşulundaki gerilimi (b), akımı (c), gerilimi (d), güç üretimi (e) ve elektriksel verimliliği (f).

Ortalama çalışma akımı PVT için 174,24 mA, CPVT için 187,32 mA olarak ölçülmüş ve CPVT sisteminde yaklaşık %7,5'lik bir artış sağlanmıştır (Şekil 4.15(c)). Benzer şekilde, ortalama çalışma gerilimi PVT sisteminde 17,51 V, CPVT sisteminde ise 18,83 V olarak belirlenmiş olup, CPVT sistemi yaklaşık %7,6 daha yüksek gerilim üretmiştir (Şekil 4.15(d)).

Akım ve gerilimde eş zamanlı gözlenen bu iyileşme, yoğunlaştırıcı yapı sayesinde PV

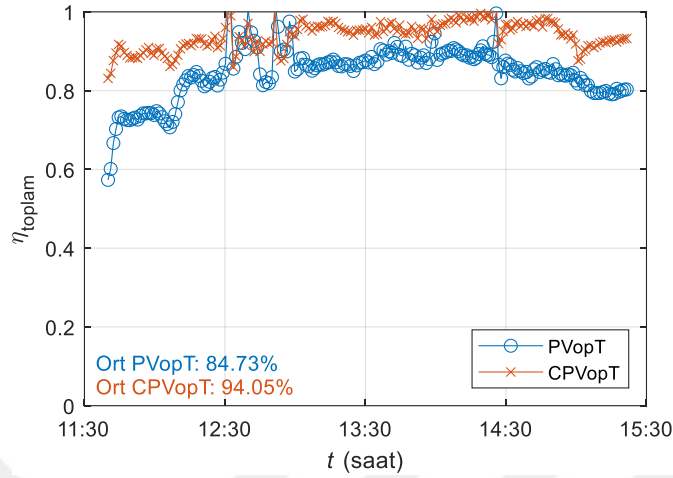
yüzeyine ulaşan etkin ışıyım yoğunluğunun artırılması ile birlikte eşit bir ışıyım dağılımı sağlanması ve optik filtreleme ile sağlanan daha dengeli termal koşulların, sıcaklık kaynaklı elektriksel kayıpları sınırlandırması ile ilişkilendirilmektedir. Bu durum, CPVT sisteminin değişken ışıyım koşulları altında dahi daha stabil ve yüksek elektriksel çıktı sağlayabildiğini açıkça göstermektedir.

Şekil 4.15 (e) deki güç üretimi eğrileri incelendiğinde, CPVT sisteminin PVT sistemine kıyasla deney süresinin tamamında daha yüksek elektriksel güç çıktısı sağladığı görülmektedir. Ortalama güç değeri PVT için 3,05 W, CPVT için 3,53 W olarak belirlenmiş olup, CPVT sisteminde yaklaşık %15,7 oranında bir güç artışı elde edilmiştir. Özellikle öğle saatlerinde CPVT sisteminin güç üretiminin 3,6–3,7 W seviyelerine ulaştığı, PVT sisteminde ise güç değerlerinin 3,1–3,3 W aralığında kaldığı dikkat çekmektedir. Bu belirgin fark, yoğunlaştırıcı yapı sayesinde artırılan etkin ışıyım yoğunluğunun akım ve gerilimde eş zamanlı artış sağlamasıyla ilişkili olduğu düşünülmüştür. CPVT sisteminin elektriksel açıdan daha verimli olduğunu göstermektedir.

Elektriksel verim eğrileri, CPVT sisteminin PVT sistemine kıyasla deney süresinin tamamında daha yüksek ve daha kararlı bir elektriksel verim sunduğunu göstermektedir (Şekil 4.15(f)). Ortalama elektriksel verim PVT için %5,98, CPVT için %6,91 olarak hesaplanmıştır. CPVT sisteminde yaklaşık %15,6 oranında bir verim artışı elde edilmiştir. CPVT sisteminde verimin gün boyunca %6,7–7,2 aralığında seyrettiği, PVT sisteminde ise bu değer in çoğunlukla %5,7–6,3 bandında kaldığı görülmektedir. Bu iyileşme, yoğunlaştırıcı yapı sayesinde artırılan etkin ışıyım yoğunluğunun yanı sıra, optik filtreleme ile sağlanan daha dengeli termal koşulların sıcaklık kaynaklı elektriksel kayıpları azaltılmasından kaynaklanmaktadır.

Toplam verim eğrileri incelendiğinde, optik filtreli CPC-CPVT sisteminin deney süresinin tamamında PVT sistemine kıyasla daha yüksek bir toplam enerji dönüşüm performansı sergilediği açıkça görülmektedir. Ortalama toplam verim PVT sistemi için %84,73, CPVT sistemi için ise %94,05 olarak hesaplanmış olup, CPVT sisteminde yaklaşık %11’lik bir iyileşme sağlanmıştır. (Şekil 4.16). CPVT sisteminin toplam veriminin gün boyunca %90 üzerinde seyrettiği, PVT sisteminde ise bu değerin çoğunlukla %75–90 bandında kaldığı gözlenmektedir. Bu belirgin fark, yoğunlaştırıcı yapı ile artırılan ışıyım kazanımının, optik

filtreleme sayesinde dengelenen termal ve elektriksel çıktılarla birlikte sistemin toplam enerji kullanım etkinliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

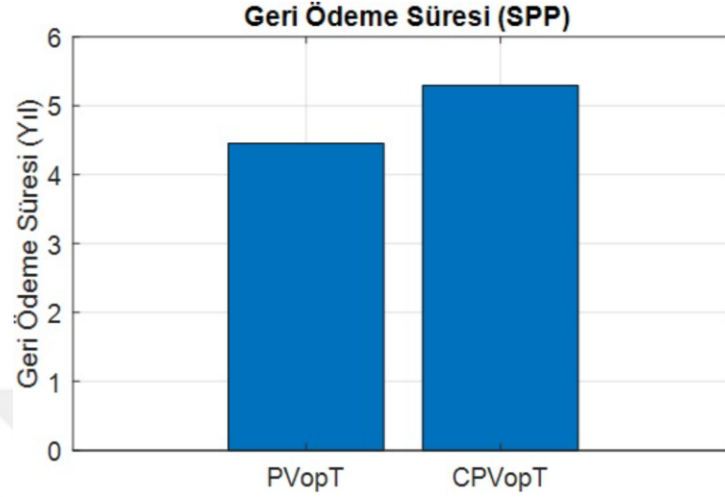


Şekil 4.16: CPC-PVT ve PVT sistemlerin toplam verimliliği.

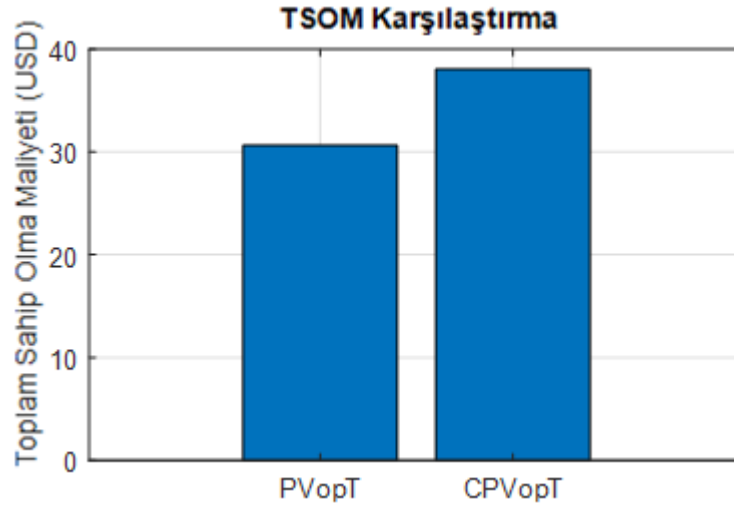
Ekonomik analiz sonuçları, optik filtreli CPC-CPVT (CPVopT) sisteminin daha yüksek ilk yatırım maliyetine rağmen, artırılmış elektriksel ve ısı enerjisi üretimi sayesinde daha yüksek yıllık ekonomik getiri sağladığını göstermektedir. İlk yatırım maliyeti PVT (PVopT) sistemi için 20,65 USD, CPVT sistemi için 28,07 USD olarak alınmış, her iki sistem için yıllık bakım maliyeti 0,5 USD ve sistem ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.19'da sunulan aylık enerji üretim profilleri incelendiğinde, CPVT sisteminin yılın tüm aylarında hem elektrik hem de ısı enerjisi üretimi açısından PVT sistemine kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Yıllık bazda değerlendirildiğinde, elektrik üretimi PVT için 9,66 kWh, CPVT için 11,17 kWh olup, CPVT sistemi yaklaşık %15,6 daha fazla elektrik enerjisi üretmiştir. Benzer şekilde, yıllık ısı enerjisi üretimi PVT sisteminde 123.31 kWh, CPVT sisteminde 138,86 kWh olarak hesaplanmış ve CPVT sistemi yaklaşık %12,6 oranında daha yüksek ısı enerjisi üretimi sağlamıştır.

Bu artan enerji üretimi, ekonomik performans göstergelerine doğrudan yansımış ve yıllık toplam tasarruf PVT sistemi için 5,14 USD, CPVT sistemi için 5,80 USD olarak belirlenmiştir. Ancak CPVT sisteminin daha yüksek ilk yatırım maliyeti nedeniyle, basit geri ödeme süresi (SPP) Şekil 4.17'de görüldüğü üzere PVT sisteminde 4,45 yıl, CPVT sisteminde ise 5,29 yıl olarak hesaplanmış; bu durum CPVT sisteminde geri ödeme süresinin

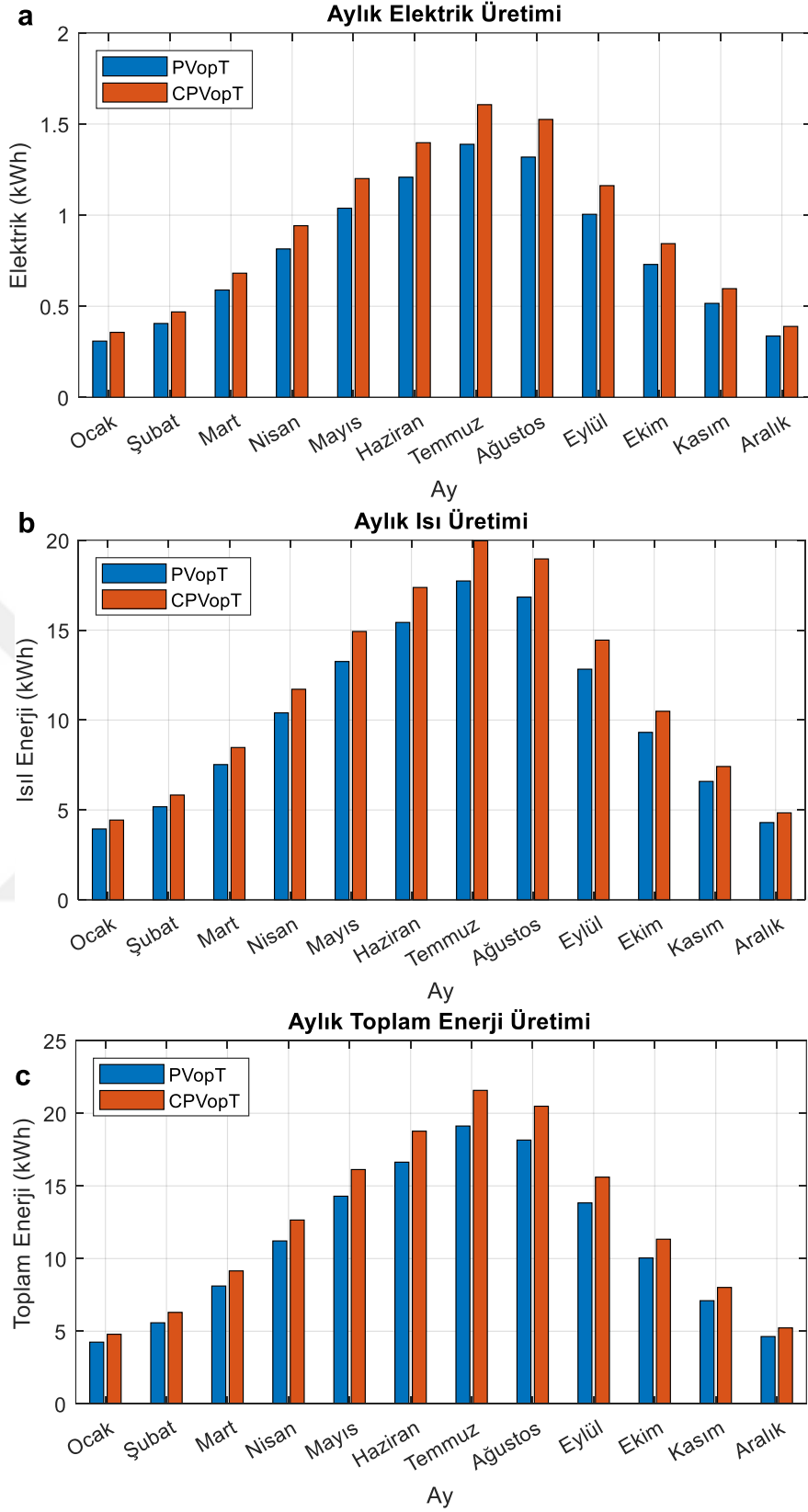
bir miktar daha uzun olduğunu göstermiştir. Toplam sahip olma maliyeti (TCO) açısından yapılan değerlendirme sonuçları ise Şekil 4.18’de sunulmuş olup, PVT sistemi için 30.65 USD, CPVT sistemi için 38.07 USD değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.17: CPC-PVT ve PVT sistemlerin basit geri ödeme süreleri



Şekil 4.18: CPC-PVT ve PVT sistemlerin toplam sahip olma maliyeti



Şekil 4.19: CPC-PVT ve optik filtreli PVT'nin aylık elektrik, termal ve toplam güç üretimi (kWh).

Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, PVT sistemi daha kısa geri ödeme süresiyle düşük başlangıç maliyetine duyarlı uygulamalar için avantaj sağlarken, optik filtreli CPC-CPVT sistemi, Şekil 4.19 (c)'de gösterilen daha yüksek aylık ve yıllık enerji üretimi ile uzun vadede daha yüksek toplam performans ve ekonomik getiri potansiyeli sunarak, özellikle enerji yoğun ve uzun süreli kullanım senaryolarında ekonomik açıdan rekabetçi bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, optik filtreli CPC-CPVT sistemi, daha yüksek ilk yatırım maliyetine rağmen sağladığı üstün elektriksel, ısı ve toplam enerji performansı sayesinde uzun vadede enerji üretimi ve ekonomik getiri açısından belirgin bir avantaj sunmaktadır. Bu yönüyle CPVT sistemi, özellikle yüksek enerji talebine sahip, uzun süreli ve performans odaklı uygulamalar için, konvansiyonel PVT sistemlerine kıyasla teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir ve rekabetçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

5. TARTIŞMA

Tartışma bölümü, elde edilen bulguların literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amacıyla yedi alt başlık altında ele alınmıştır. Bu bölümde incelenen konular aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

5.1. Elektriksel Performansın Literatür ile Karşılaştırılması

Bu çalışmada, optik filtre entegrasyonunun yoğunlaştırıcı fotovoltaiik termal (CPVT) sistemlerde elektriksel verimlilik üzerinde önemli bir iyileştirme sağladığı gözlemlenmiştir.(PVT-CPVT) Elde edilen yaklaşık %15,6 oranındaki verimlilik artışı, Moharram vd. (2013) ön yüzey su püskürtme yöntemi ile rapor ettiği yaklaşık değerlere ve Hamdan ve Abdelhafez'in (2022) sıvı bazlı optik filtre kullanımıyla sağladığı %11.3'lük artışa paralellik göstermektedir. Bu sonuçlar, önerilen optik filtre tasarımının ve sistem entegrasyonunun literatürdeki başarılı uygulamalarla uyumlu olduğunu ve yöntemimizin güvenilirliğini desteklediğini ortaya koymaktadır.

Elektriksel performanstaki artışın temel mekanizması, optik filtrenin kızılötesi spektrum bileşenlerini PV hücreden uzaklaştırarak hücre sıcaklığını yaklaşık ortalama 8,7 °C daha düşük seviyede tutmasıdır(PV-PVT). Sıcaklık kontrolündeki bu iyileşme, PV hücrelerin açık devre gerilimi (Voc) ve dolayısıyla maksimum güç çıkışını olumlu yönde etkileyerek özellikle yüksek ışıyım değerlerinin gözlemlendiği öğle saatlerinde verimlilik farkının daha belirgin hale gelmesini sağlamıştır. Bu durum, sıcaklığa bağlı elektriksel parametrelerin dinamiklerini ortaya koyan önceki çalışmaları destekler niteliktedir ve sistem tasarımında termal yönetimin kritik önemini vurgulamaktadır.

5.2. Termal Performansın Literatür ile Karşılaştırılması

Bu çalışmada, optik filtre entegrasyonu sayesinde termal toplayıcı verimliliğinde yaklaşık %10,7 oranında bir artış elde edilmiştir(PVT-CPVT). Benzer şekilde Chemisana vd. (2018) doğrudan daldırılmış PVT sistemlerde sıvı bazlı filtrelerin, termal verim üzerinde geçirgenliğe bağlı olarak iyileşme sağladığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca benzer

uygulamalar arasında Wang vd.'nin (2022) nanofluid bazlı filtre kullanımıyla sağladığı yaklaşık %10'luk iyileşme değerleriyle uyumlu bulunmuştur. Bu paralellik, önerilen filtre malzemesi ve tasarımının literatürdeki benzer yaklaşımlar kadar etkin olduğunu göstermektedir.

Optik filtrenin temel işlevi, kızılötesi (IR) spektrum bileşenlerini doğrudan PV hücreden uzaklaştırıp termal toplayıcıya yönlendirmektir. Böylece PV hücre üzerinde oluşan termal yük azaltılırken, termal toplayıcıda toplanan ısı enerjisi maksimum seviyeye çıkarılmaktadır. Bu çift yönlü etki, CPVT sistemlerde elektriksel performans ile termal enerji üretiminin dengelenmesini sağlayarak toplam sistem verimliliğinin optimizasyonuna önemli katkı sunmaktadır. Literatürde belirtilen termal yönetim yaklaşımlarından farklı olarak, sıvı bazlı optik filtrelerin dinamik spektral kontrolü sayesinde termal ve elektriksel performans arasındaki optimal denge sağlanabilmekle birlikte toplam verimi artırmaktadır. Bu da sistemlerin uygulama alanlarını genişletmekte ve sürdürülebilir enerji dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

5.3. Optik Filtre Tasarımının Etkileri

Çalışmada kullanılan sıvı bazlı optik filtre, hem geçirgenlik hem de sınırlı absorpsiyon özellikleri açısından sistem performansını etkilemiştir. Saf su, görünür ışık bölgesinde yüksek geçirgenlik (%90'dan fazla) sunarken, kızılötesi (IR) bölgede absorpsiyon kapasitesi oldukça düşüktür. Bu nedenle, filtreleme etkisi sınırlı kalmış ancak yüksek geçirgenliği sayesinde PV hücre üzerine düşen ışının azaltılmadan yönlendirilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada uygulanan sıvı bazlı optik filtre tasarımı, sistemin spektral enerji yönetimi ve ısı kontrol performansı açısından önemli bir bileşen olmuştur. Filtrasyon ortamı olarak kullanılan saf su, görünür dalga boyu aralığında (%90 ve üzeri) yüksek optik geçirgenliğe sahip olup, kızılötesi (IR) bölgede ise sınırlı absorptif özellik göstermektedir. Bu spektral geçirgenlik profili sayesinde;

PV hücrelere ulaşan faydalı ışınım kayıpsız iletilmiş, elektriksel dönüşüm verimliliği desteklenmiştir.

IR bileşenin bir kısmı sıvı ortam tarafından taşınıp uzaklaştırılarak hücre yüzey sıcaklığının düşürülmesine katkı sağlanmıştır.

PV hücre yüzey sıcaklığının belirgin şekilde düşürülmesi ile IR bileşenlerinin filtre tarafından emilip termal toplayıcıya yönlendirilmesi, PV hücrelerin termal yükünü azaltarak performans düşüşlerinin önüne geçmiştir.

Termal toplayıcı tarafından yakalanan enerji miktarının artırılması ile saf su bazlı filtrelerde, IR spektrumunun aktarımı nanofluidlere kıyasla daha düşük olsa da, suyun yüksek geçirgenlik ve düşük absorpsiyon özellikleri toplam termal enerji üretimini makul seviyede desteklemektedir. Ayrıca, saf su filtrelerin yapısal olarak optimize edilmesi, sistemin uzun vadeli kararlılığı ve bakım kolaylığı açısından avantaj sağlar. Bu nedenle, saf su bazlı optik filtre tasarımı, CPVT sistemlerde elektriksel ve termal performansı artıran işlevsel bir bileşen olarak değerlendirilebilir.

Bu yaklaşım, geleneksel soğutma yöntemlerinin ötesinde, tayfsal yönetim stratejisi olarak da değerlendirilebilir. Literatürde Mojiri vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, tayfsal ayırma prensibinin uygulandığı CPVT sistemlerde toplam verimlilikte yaklaşık %7-9 arasında iyileşme sağlandığı rapor edilmiştir. Bizim çalışmamızda elde edilen iyileşme oranları, bu değerlerle yakın uyumlu olup, filtre tasarımının performansı üzerindeki belirgin etkisini doğrulamaktadır.. Böylece, optik filtre tasarımı, hem elektriksel hem de termal performans açısından CPVT sistemlerin verimli çalışmasını sağlayan yenilikçi bir bileşen olarak öne çıkmaktadır.

5.4. Bulguların Fiziksel Yorumu

Araştırma kapsamında elde edilen veriler doğrultusunda, çalışmada ele alınan hipotezler büyük ölçüde doğrulanmıştır. Elektriksel ve termal performans analizleri, optik filtre kullanılan sistemlerde anlamlı düzeyde verim artışı sağlandığını göstermiştir. Özellikle öğle saatlerinde güneş ışınımının en yoğun olduğu zaman dilimlerinde, filtreli sistemlerin PV hücre sıcaklıklarını daha düşük seviyelerde tutabildiği ve buna bağlı olarak elektriksel verimin yükseldiği gözlemlenmiştir.

Termal performanstaki artış ise, filtrelerin kızılötesi (IR) bileşenleri PV hücrelerden uzaklaştırarak doğrudan termal toplayıcıya yönlendirmesiyle ilişkilendirilmiştir. Ayrıca bu tayfsal yönetim yaklaşımı, sistemin toplam enerji dönüşüm verimliliğini artırarak, entegre enerji üretim sistemlerinin potansiyel faydasını öne çıkartmaktadır. Yapılan istatistiksel testler de bu farkların tesadüfi olmadığını, sistem tasarımındaki iyileştirmelerin doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, CPVT sistemlerde optik filtre entegrasyonu, hem akademik hem de uygulamalı anlamda önemli bir katkı sağlamaktadır.

5.5. Sistem Avantajları

Çift yönlü verimlilik artışı sağlanmıştır; Optik filtre entegrasyonu sayesinde, elektriksel ve termal çıktılar paralel biçimde optimize edilerek sistemin toplam enerji dönüşüm verimliliği anlamlı şekilde artırılmıştır.

Hibrit soğutma yaklaşımı sayesinde; filtrenin gerçekleştirdiği pasif tayfsal ayırım, termal toplayıcı üzerinden gerçekleştirilen aktif soğutma mekanizmasıyla entegre edilerek PV hücre sıcaklıkları daha stabil düzeyde tutulmuştur.

Yapısal uyumluluk sağlanmıştır. Önerilen sistem tasarımı, mevcut CPVT altyapılarına minimal modifikasyon ile entegre edilebilmekte; bu durum, uygulama kolaylığı ve maliyet açısından önemli avantaj sunmaktadır.

İklimsel adaptasyon kabiliyeti mevcuttur. Filtre içerisinde ihtiyaç olur ise nanoparçacık konsantrasyonlarının eklenmesi olanağı sistemin farklı coğrafi ve iklimsel koşullara adapte edilebilmesini mümkün kılmaktadır.

5.6. Sınırlamalar

Filtre malzemesinin termal ve ışımsal kararlılığı çerçevesinde optik filtre ortamı olarak kullanılan saf su, yüksek sıcaklık ve yoğun güneş ışıınımı altında zamanla buharlaşma, çözünmüş minerallerin birikimi ve mikrobiyolojik kontaminasyon gibi fiziksel ve kimyasal

değişimlere maruz kalabilir. Bu durum, suyun optik geçirgenliğini azaltarak sistemin ısıtım iletim kapasitesinde düşüğe ve dolayısıyla fotovoltaiik-termal performansta kayıplara yol açabilir. Ayrıca sistemin kapalı devre olmaması durumunda, su seviyesindeki azalma da filtre etkinliğini olumsuz etkileyebilir.

Ek optik kayıplar değerlendirildiğinde filtre camı yüzeyinde meydana gelebilecek yansıma ve saçılma etkileri, sistemin toplam spektral iletim verimini düşürebilir. Bu kayıplar düşük düzeyde olsa da, özellikle yüksek hassasiyetli uygulamalarda enerji verimliliğini sınırlayıcı bir faktör oluşturabilir.

Meteorolojik koşullara bağımlılık değerlendirildiğinde ise bulutlu hava, düşük güneş ışıını ve değişken atmosferik koşullar altında, spektral ayırma kapasitesi potansiyel fayda durumu azaldığından yeterince aktive edilemeyebilir. Bu durumda filtre entegrasyonunun sağladığı elektriksel ve termal performans iyileştirmeleri sınırlı kalabilir.

5.7. Uygulama Potansiyeli ve Geliştirme Önerileri

Bu çalışmada geliştirilen sıvı bazlı optik filtre yaklaşımı, özellikle yüksek güneşlenme potansiyeline ve sıcak iklim koşullarına sahip bölgelerde CPVT sistemlerinin performansını artırma açısından uygulanabilir ve yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Sistem entegrasyonu ve yaygınlaştırılması açısından aşağıdaki geliştirme alanları öne çıkmaktadır;

Spektral seçiciliğin optimize edilmesi kapsamında filtre verimliliğini daha da artırmak amacıyla farklı nanoparçacık türleri (örneğin TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 ve karbon nanotüpler) ile optik özelliklerin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, ışık tayfının daha hassas yönetilmesine katkı sağlayabilir.

Çok katmanlı filtre tasarımları ile IR ve görünür ışık spektrumlarının daha etkin ayrılması için çok katmanlı ve selektif geçirgenliğe sahip filtre yapılarının geliştirilmesi, termal ve elektriksel verimliliği aynı anda maksimize etme potansiyeli taşımaktadır.

Tekno-ekonomik analiz kapsamında sistemin uygulama alanlarındaki maliyet-etkinliğini değerlendirmek üzere yatırım geri dönüş süresi, birim enerji üretim maliyeti (LCOE) ve

toplam fayda-maliyet oranı gibi ekonomik metriklerin detaylı analizi gereklidir. Bu analiz, sistemin ticarileşebilirliğini ortaya koymak açısından kritik önem taşır.

Uzun süreli saha testlerinin gerçek çevresel koşullar altında gerçekleştirilmesi; saf suyun stabilitesi, optik performansın zamana bağlı değişimi ve sistemin genel güvenilirliği gibi operasyonel kriterlerin değerlendirilmesi açısından önerilmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç ve öneriler bölümü, çalışmadan elde edilen temel bulguların özetlenmesi ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik önerilerin sunulması amacıyla dört alt başlık altında ele alınmıştır. Bu bölümde incelenen konular aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

6.1. Çalışmadan Elde Edilen Temel Bulgular ve Çıkarımlar

Çalışmada elde edilen bulgular aşağıda yer alan başlıklar altında analiz edilmiştir.

Spektral Yönetimin Önemi

CPVT sistemlerde uygulanan tayfsal (spektral) yönetim stratejilerinin, yalnızca PV hücrelerin etkin bir şekilde soğutulmasına katkı sağlamakla kalmadığı; aynı zamanda elektriksel ve termal çıktıların birlikte optimize edilmesine olanak tanıyarak sistemin toplam enerji dönüşüm verimliliğini anlamlı düzeyde artırdığı belirlenmiştir.

Optik Filtrelerin Etkisi

Kızılötesi (IR) spektrumundaki ışıının seçici olarak soğurulması sayesinde, saf su bazlı optik filtrenin termal toplayıcının etkinliğini artırdığı ve buna bağlı olarak ısı kazanımında belirgin iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir.

Elektriksel Performans Üzerindeki Etki

PV hücre yüzey sıcaklığındaki azalmanın, özellikle açık devre gerilimi (Voc) üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu; bunun sonucunda elektriksel güç üretiminin arttığı ve sistemin genel performans katsayısının yükseldiği gözlemlenmiştir.

Entegrasyon Kolaylığı

Geliştirilen optik filtre yaklaşımının, mevcut CPVT sistem yapılarına yalnızca sınırlı yapısal modifikasyonlar ile entegre edilebildiği; bu özelliği sayesinde uygulama kolaylığı ve maliyet etkinliği açısından önemli bir avantaj sunduğu değerlendirilmiştir.

6.2. Bilimsel ve Endüstriyel Katkılar

Bu çalışma, optik filtre destekli CPVT sistemlerin performansına yönelik özgün bir yaklaşım sunarak, hem bilimsel literatüre hem de uygulamalı enerji teknolojilerine önemli katkılar sağlamaktadır. Yoğunlaştırıcı uygulaması ile termal verimin artış gösterdiği, sıcaklığın artmasına rağmen spektral yönetim stratejileri sayesinde PV hücre sıcaklığını düşürerek elektriksel verimliliğin artış gösterdiği deneysel olarak ortaya konmuştur. Ayrıca, saf su bazlı optik filtrenin kızılötesi (IR) ışımasını sınırlı ölçüde yönlendirme kabiliyeti sayesinde, pasif soğutma etkisiyle sistemin termal dengesine katkı sağlandığı gözlemlenmiştir. Yani ispatlanan kabullere göre termal verim ile elektriksel verim arasında ters orantılı bir durum varken bu durumu optimum dengede hem termal hem de elektriksel verimin artış gösterdiği faydalı sonuçlara getirmiştir.

Endüstriyel açıdan bakıldığında, önerilen sistemin mevcut CPVT yapılarıyla kolay entegre edilebilmesi, düşük maliyetli yapısı ve bakım gereksinimlerinin minimal olması uygulama potansiyelini artırmaktadır. Özellikle sıcak iklim bölgelerinde enerji üretim verimliliğini termal ve elektriksel anlamda artıracak bu tür kompakt çözümler, sürdürülebilir enerji politikaları açısından da anlamlı ve değerlidir.

6.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Spektral Ayrımın Optimizasyonu

Farklı türde nanofluidlerin (örneğin Al_2O_3 , TiO_2 , CNT) değişen konsantrasyonlarda kullanımı ile optik filtrenin görünür ve IR spektrumlarındaki geçirgenlik/absorpsiyon profili optimize edilerek, tayfsal yönetim daha etkin hale getirilebilir. Bu alanda karşılaştırmalı bir çalışma yapılabilir.

Uzun Süreli Dayanıklılık Testleri

Saha koşullarında gerçekleştirilecek uzun dönemli testlerle, filtre malzemesinin optik stabilitesi, termal kararlılığı ve fiziksel dayanımı detaylı olarak incelenmelidir. Bu kapsamda ayrı bir çalışma yapılması Endüstriyel alanda uygulama bulması açısından da önemlidir.

Gelişmiş Filtre Kabı Tasarımları

Filtrenin barındırıldığı optik ortamda çok katmanlı cam sistemleri, anti-reflektif kaplamalar ve/veya yansıma önleyici yüzey teknolojileri kullanılarak optik kayıplar minimize edilebilir.

Yoğunlaştırma Teknolojileriyle Uyum

Geliştirilen filtre teknolojisinin farklı yoğunlaştırıcı sistemlerle (CPC, parabolik oluklar, Fresnel lensler vd.) entegrasyonu araştırılarak, sistem tasarım esnekliği ve performans uyumu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir.

Ekonomik Verimlilik Analizi

Filtre entegrasyonunun maliyet-fayda analizleri yapılmalı, yatırımın geri dönüş süresi (payback period) ve sistemin toplam enerji üretimine katkısı üzerinden ekonomik fizibilitesi belirlenmelidir. Bu konuda ayrı bir çalışma konusu olarak ele alınabilir.

Soğutucu Farklı Akışkanların Kullanımı

Geliştirilen filtre teknolojisinde kullanılan saf suya dışında farklı nanoakışkanların test edilerek performans uyumu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir.

İklimsel Etki Analizi

Çeşitli iklim koşullarına sahip coğrafi bölgelerde sistemin performansı test edilerek, sıcaklık, nem ve ışıyım değişkenlerinin sistem verimliliği üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmelidir.

6.4. Sonuç

Bu çalışma, sıvı bazlı optik filtrelerin CPVT (Yoğunlaştırılmalı Fotovoltaik-Termal) sistemlere entegre edilmesi ile daha doğrusu kapalı çevrim bir dolaşım ile sıvı bazlı optik filtre sistemi entegre edilerek oluşturulan CPVT (Yoğunlaştırılmalı Fotovoltaik-Termal) bir sistemde, elektriksel ve termal performansta eşzamanlı iyileşmeler sağladığı deneysel veriler ile ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar, bu yöntemin özellikle yüksek güneşlenme potansiyeline ve sıcak iklim koşullarına sahip bölgelerde sistem verimliliğini anlamlı ölçüde artırabildiğini göstermektedir.

Filtrenin, kızılötesi dalga boylarını termal toplayıcıya yönlendirip görünür ışığın PV hücreler tarafından kullanılmasına olanak sağlaması, tayfsal yönetim açısından etkili bir çözüm sunmuştur. Bu yapı PV üzerinde sıcaklığı artıran kızılötesi dalga boylarını PV den uzaklaştırıp, termal toplayıcıya ulaştırdığı için bu sayesinde hücre sıcaklıklarında azalma sağlanmış, termal fayda artırılmış dolayısıyla daha verimli termal ve elektriksel çıktı elde edilmiştir. Elde edilen yaklaşık % 15 elektriksel (PVT-CPVT) ve % 10 termal (PVT-CPVT) verim artışı, literatürdeki benzer çalışmalarla tutarlı olup, uygulanan yöntemin sistem performansı üzerindeki pozitif etkisini doğrulamaktadır.

Genel olarak, optik filtre destekli CPVT sistemlerin hem bilimsel araştırmalar hem de pratik uygulamalar açısından sürdürülebilir enerji üretimi hedeflerine önemli katkılar sunabileceği sonucuna varılmıştır. Bu yaklaşım, hibrit güneş enerjisi sistemlerinde tayfsal yönetimi esas alan yeni nesil tasarımlar için yol gösterici niteliktedir.

Öte yandan, filtre stabilitesi, optik kayıplar ve çevresel koşullara duyarlılık gibi bazı sınırlamalar tespit edilmiştir. Ancak bu sınırlamaların, önerilen teknik iyileştirmelerle aşılabileceği değerlendirilmektedir.

Elektriksel Performans

Elektriksel performans açısından, filtreli sistemde günlük ortalama verimlilik % 6,91 olarak ölçülmüş; filtersiz sistemde kaydedilen % 5,98 'lik verimliliğine kıyasla yaklaşık % 15,6 oranında bir artışa karşılık gelmektedir.

Termal Performans

Termal verimlilik ise; filtreli sistemde % 87,14 filtresiz sistemde % 78,75 olarak ölçülmüş, bu sonuç ise yaklaşık % 10,7'luk bir artış olarak kaydedilmiştir.

Toplam Sistem Verimliliği

Elektriksel ve termal çıktılar birleştirildiğinde, filtreli sistemde ortalama %94,05 filtresiz sistemde % 84,73 verim elde edilmiştir. Bu durumda toplam verimde yaklaşık 9,2 puanlık bir iyileşme sağlanmıştır. Diğer bir ifade ile toplam sistem verimliliğinde, filtreli sistem filtresiz sisteme göre yaklaşık % 10,9 oranında daha verimli sonuç ortaya koymuştur.

Sıcaklık Kontrolü

Optik filtre uygulaması sonucunda PV hücre yüzey sıcaklığı ortalama 8,8 °C oranında azaltılmıştır. Bu sıcaklık düşüşü, özellikle yüksek güneş ışınımı koşullarında elektriksel verimliliğin korunmasına ve hücre performansının stabil kalmasına doğrudan katkı sağlamıştır. Sıcaklığa bağlı verim kayıplarının önlenmesi, sistemin genel enerji çıktısını olumlu yönde etkilemiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla paralellik göstermektedir (Moharram vd., 2013; Hamdan ve Abdelhafez, 2022; Chemisana vd., 2018). Bu durum, kullanılan deneysel yöntemin geçerliliğini ve uygulama açısından güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdelrazik, A. S. (2023). Water liquid compatibility as a spectral-splitting optical filtration fluid to six types of photovoltaic solar cells under high solar concentrations. *Energy Conversion and Management*, 294, 117557. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117557>
- Boes, E. C., Hall, I. J., Prairie, R. R., Stromberg, R. P., ve Anderson, H. E. (1976). Distribution of direct and total solar radiation availabilities for the USA. *Solar Energy*, 18(5), 431–439.
- Bukar, A. M., Almerbati, A., Shuja, S. Z., ve Zubair, S. M. (2025). Enhancing solar PV panel performance through active and passive cooling techniques: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 216, 115611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115611>
- Chaichan, M. T., Kazem, H. A., Al-Waeli, M. A., Al-Mamari, A. A., Mohammed, T. A., Al-Abri, A. K., Al-Badi, A., Al-Wahaibi, A. S., ve Al-Busaidi, F. A. (2023). Optimizing MWCNT-based nanofluids for photovoltaic/thermal cooling through preparation parameters. *ACS Omega*, 8(33), 29910–29925. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07226>
- Chemisana, D., Fernández, E. F., Riverola, A., ve Moreno, A. (2018). Fluid-based spectrally selective filters for direct immersed PVT solar systems in building applications. *Renewable Energy*, 123, 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.018>
- Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 87(2), 365–379. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>
- Crisostomo, C. P., Yao, L.-Z., Huang, Z.-Q., Hsu, C.-H., Chuang, F.-C., Lin, H., Albao, M. A., ve Bansil, A. (2015). Robust large gap two-dimensional topological insulators in hydrogenated III–V buckled honeycombs. *Nano Letters*, 15(10), 6568–6574. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02293>
- Duffie, J. A., ve Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- Elharoun, O., Tawfik, M., El-Sharkawy, I. I., ve Zeidan, E. (2023). Experimental study of photovoltaic performance under a compound parabolic solar concentrator with a nanofluid spectral filter. *Mansoura Engineering Journal*, 48(4). <https://doi.org/10.58491/2735-4202.3049>
- Energy Market Regulatory Authority (EPDK). (2025). Elektrik piyasası aylık sektör raporları. EPDK. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/elektrikaylik-sektor-raporlar> (10.03.2025).

- Erdoğan, İ., Bilen, K., ve Kıvrak, S. (2024). Experimental investigation of the efficiency of solar panel over which water film flows. *Politeknik Dergisi*, 27(2), 699–707. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1163785>
- Farag, H., Hamid, A., AlMallahi, A., ve Elgendi, A. (2024). Towards highly efficient solar photovoltaic thermal cooling by waste heat utilization: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103570. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100671>
- Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (4th ed.). Sage Publications.
- Goetzberger, A., ve Hoffmann, V. U. (2005). *Photovoltaic solar energy generation*. Springer.
- Hale, G. M., ve Querry, M. R. (1973). Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region. *Applied Optics*, 12(3), 555–563. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>
- Hamdan, M., ve Abdelhafez, E. (2022). The impact of optical liquid filters on PV panel performance. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 23988–23993. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17728-4>
- Hasan, A., Sarwar, J., ve Shah, A. H. (2018). Concentrated photovoltaic: A review of thermal aspects, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 835–852. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.014>
- Hecht, E. (2017). *Optics* (5th ed.). Pearson.
- Huang, G., ve Markides, C. N. (2021). Spectral splitting hybrid PV thermal solar collectors employing semi-transparent solar cells as optical filters. *Energy Conversion and Management*, 248, 114776. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114776>
- Hunn, B. D., ve Calafell, D. O. (1977). Determination of average ground reflectivity for solar collectors. *Solar Energy*, 19(2), 113–118. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90092-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90092-5)
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., ve Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- International Energy Agency (IEA). (2025). Renewable energy systems. IEA. <https://www.iea.org/energy-system/renewables> (15.06.2025).
- International Organization for Standardization. (2008). *Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)* (ISO/IEC Guide 98-3). ISO.

- Jin, X., ve Jing, Y. (2017). A novel liquid optical filter based on magnetic electrolyte nanofluids for hybrid photovoltaic thermal solar collector application. *Solar Energy*, 148, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.030>
- Kalogirou, S. (2009). Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. *Solar energy*, 83(1), 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.005>
- Karmalawi, A. (2023). Characterization, traceability, and uncertainty estimation of reference solar panel module measurements using pulsed solar simulators and reference solar cells. *Acta IMEKO*, 12(3). <https://doi.org/10.21014/actaimeko.v12i3.1525>
- Liu, B. Y. H., ve Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1)
- Liu, Y., Zhang, H., ve Chen, H. (2020). Experimental study of an indirect-expansion heat pump system based on solar low-concentrating photovoltaic/thermal collectors. *Renewable Energy*, 157, 718–730. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.090>
- Marques Lameirinhas, R. A., Torres, J. P. N., ve de Melo Cunha, J. P. (2022). A photovoltaic technology review: History, fundamentals and applications. *Energies*, 15(5), 1823. <https://doi.org/10.3390/en15051823>
- Jailany, A. T., El-Al, A., ve Rashwan, M. A. (2016). Effect of water cooling on photovoltaic performance. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 33(1), 257-268.
- Moharram, K. A., Abd-Elhady, M. S., Kandil, H. A., ve El-Sherif, H. M. (2013). Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), 869–877. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.005>
- Mojiri, A., Stanley, C., Rodriguez-Sanchez, D., Everett, V., Blakers, A., ve Rosengarten, G. (2016). A spectral-splitting PV–thermal volumetric solar receiver. *Applied Energy*, 169, 63-71.
- Peters, M., Goldschmidt, J. C., Löper, P., Groß, B., Üpping, J., Dimroth, F., Wehrspohn, R.B ve Bläsi, B. (2010). Spectrally-selective photonic structures for PV applications. *Energies*, 3(2), 171-193.
- Resch, A., ve Höller, R. (2021). Electrical efficiency increase in CPVT collectors by spectral splitting. *Energies*, 14(23), 8128.
- Safan, Y. M., Abdelrazik, A. S., Elmohlawy, A. E., Abdel-Moneim, S. A., ve Salem, M. R. (2024). Investigating the performance of photovoltaic panels using optical water spectral splitting filter: An experimental and computational analysis. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 16(4). <https://doi.org/10.1063/5.0215914>
- Segelstein, D. J. (1981). The complex refractive index of water. Yüksek Lisans Tezi. University of Missouri–Kansas City.

- Sharaf, M., Yousef, M. S., ve Huzayyin, A. S. (2022). Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 26131–26159. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025). Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA). Genel Enerji İşleri Dairesi. <https://gepa.enerji.gov.tr> (01.06.2025).
- Turkish Electricity Transmission Corporation (TEİAŞ). (2025). Türkiye elektrik üretim ve iletim istatistikleri. TEİAŞ Genel Müdürlüğü. <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> (01.03.2025).
- Turkish State Meteorological Service (MGM). (2025). 2024 güneş radyasyonu istatistikleri. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/resmi-istatistikler/parametreAnalizi/2024-gunes-radyasyonu.pdf> (15.06.2025).
- Ustaoğlu, A., Buyukpatpat, H., Kaya, H., Kursuncu, B., Karaagac, M. O., ve Okajima, J. (2025). Experimental performance investigation of high reflective and diffuse reflective concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems using non-imaging concentrators from energy, exergy, and economic viewpoint. *Applied Thermal Engineering*, 263, 125355. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125355>
- Ustaoğlu, A., ve Sungur, S. B. (2026). Küresel Isınma ve Güneş Enerjisi: Türkiye ve Lider Ülkeler Üzerine Bir Analiz. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- URL-1 (2025). <https://www.gunesten.net/blog/gunes-paneli-hucre-cesitleri-nelerdir.html> (01.07.2025)
- Wang, G., Zhang, Z., Jiang, T., Lin, J., ve Chen, Z. (2022). Thermodynamic and optical analyses of a novel solar CPVT system based on parabolic trough concentrator and nanofluid spectral filter. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, 101948. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101948>
- Ju, X., Xu, C., Liao, Z., Du, X., Wei, G., Wang, Z., ve Yang, Y. (2017). A review of concentrated photovoltaic-thermal (CPVT) hybrid solar systems with waste heat recovery (WHR). *Science bulletin*, 62(20), 1388-1426. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.10.002>
- Yadav, A. K., Malik, H., ve Chandel, S. S. (2014). Selection of most relevant input parameters using WEKA for artificial neural network based solar radiation prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 509-519.. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.008>

EKLER

Ek 1: Yapay zekâ kullanım tablosu

No	Yapay Zekâ Aracı	Kullanım Amacı	Kullanıldığı Bölüm	Kullanım Şekli
1	: ChatGPT	Bilgi özetleme	literatür taraması	Literatürdeki görüşleri özetlemek amacıyla yönlendirici sorular yöneltilmiştir ve otomatik olarak üretilen metin doğrudan kullanılmamıştır.
2	Grammarly	İngilizce özet yazımında dil hatalarının kontrolü	Abstract	
3				
4				
5				

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Tayfun ALTIOK
Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
Makine Eğitimi

Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği

Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği

Yüksek Lisans Öğrenimi : Bülent Ecevit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü
İş Sağlığı ve Güvenliği (Tezsiz)

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine
Mühendisliği Anabilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

Bilimsel Faaliyet/Yayınlar : Ustaoglu, A, Altıok, T., Büyükpatpat, H., Kaltakkıran, Ş. (2025). Fotovoltaik Termal Sistemlerde Kullanılan Optik Filtre Sıcaklığının Elektriksel Performansa Etkisinin Deneysel İncelenmesi. Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences, 8(1), 280-292. <https://doi.org/10.55930/jonas.1739753>

Abid Ustaoglu, M. Sabri Gok, Bülent Yeşilata, Kasım Ozacar, Zeyad Amjed, Tayfun Altiok, Alaattin M. Kaya, Fatih Kocyigit. (2026) Experimental and Machine Learning Investigation of a Solar Air Heater with a Novel Compact Thermal Absorber Design. Solar Energy Materials and Solar Cells.

Ustaoglu, A., Kursuncu, B., Altiok, T., Buyukpatpat, H., Karaagac, M. O., Okajima, J., Enhancing Thermal and Electrical Performance of CPC-Based CPVT Systems Using Spectrally Selective Optical Filters, Proceedings of Twenty-second International Conference on Flow Dynamics ICFD2025, (2025), November 10 – 13, Sendai, Japan.

İş Deneyimi

Çalıştığı Kurumlar

: Ford Otosan A.Ş. (2001-2002)
Gölcük Otomobil Fabrikası (Üretim Planlama)

Karayolları 15. Bölge Müdürlüğü (2007-2008)
Yol Bakım ve Onarım Hizmetleri Müdürlüğü

Tüvtürk Araç Muayene İstasyonları İşletim A.Ş.(2008-2022) İşletmeler Yönetimi_Şube Müdürü

Mescier Demir Çelik A.Ş. 2022 - devam ediyor
Genel Müdürlük_Koordinasyon ve Operasyon Müdürü

İletişim

E-Posta Adresi/Tel

:

Tarih

: 28/11/2025

