

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK BİLİM DALI**

**NANOPARTİKÜL KATKILI GİZLİ ISI DEPOLAMA ÜNİTESİ ENTEGRELİ
GÜNEŞ ENERJİLİ ISIL SİSTEMLERİN TASARIMI VE DENEYSEL ANALİZİ**

Ceylin ŞİRİN

**Danışman
Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL**



MANİSA-2022

Ceylan ŐIRIN

**NANOPARTİKÜL KATKILI GIZLI ISI DEPOLAMA ÜNİTESİ ENTEGRELİ
GÜNEŞ ENERJİLİ ISIL SİSTEMLERİN TASARIMI VE DENEYSEL ANALİZİ**

2022

TEZ ONAYI

Ceylin ŞİRİN tarafından hazırlanan "NANOPARTİKÜL KATKILI GİZLİ ISI DEPOLAMA ÜNİTESİ ENTEGRELİ GÜNEŞ ENERJİLİ ISIL SİSTEMLERİN TASARIMI VE DENEYSEL ANALİZİ" adlı tez çalışması 08/04/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak savunulmuş ve **oybirliği** ile başarılı olarak kabul edilmiştir.

Danışman

Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP

Fırat Üniversitesi

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Ali YURDDAŞ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ceylin ŞİRİN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ	1
2. GÜNEŞ DESTEKLİ ISIL SİSTEMLER	3
2.1. Güneş Kollektörleri	3
2.1.1. Düşük Sıcaklıklı Güneş Kollektörleri	3
2.1.2. Konsantre Güneş Kollektörleri	6
2.1.3. Hibrit Fotovoltaik-Termal (PVT) Kollektörler	9
2.2. Seralar ve Sera Kurutucular	10
2.3. Güneş Destekli Su Arıtma Sistemleri	11
2.4. Diğer Güneş Destekli Isıl Sistemler	12
2.4.1. Güneş Bacaları	12
2.4.2. Güneş Mimarisi	13
2.4.3. Güneş Havuzları	13
3. ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ.....	15
3.1. Duyulur Isı Depolama	16
3.2. Gizli Isı Depolama.....	16
3.2.1. Faz Değiştiren Malzemeler	17
3.3. Termokimyasal Isı Depolama	19
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	20
5. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	25
5.1. Deney Düzenekleri	25
5.1.1. Nanopartikül Katkılı Gizli Isı Depolama Ünitelerinin ve Yutucu Yüzey Kaplama Boyasının Hazırlanması	25
5.1.2. Hibrit Fotovoltaik-Termal Kollektör Deney Düzeneği	28
5.1.3. Sera Kurutucu Deney Düzeneği	31
5.1.4. Güneş Destekli Su Arıtma Sistemi Deney Düzeneği	34
5.2. Deney Prosedürü	36
5.2.1. Hibrit Fotovoltaik-Termal Kollektör Deney Prosedürü	37
5.2.2. Sera Kurutucu Deney Prosedürü	37
5.2.3. Güneş Destekli Su Arıtma Sistemi Deney Prosedürü.....	38
6. TEORİK HESAPLAMALAR.....	39
6.1. Hibrit Fotovoltaik-Termal Kollektörlerin Teorik Analizi	39
6.2. Sera Kurutucuların Teorik Analizi	42
6.3. Güneş Destekli Su Arıtıcıların Teorik Analizi.....	45
6.4. Belirsizlik Analizi.....	46
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
7.1. PVT Kollektör Performans Bulguları.....	48
7.2. Sera Kurutucuların Performans Bulguları	54
7.3. Güneş Destekli Su Arıtma Sistemi Performans Bulguları	61
8. SONUÇLAR	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	83

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

AC	Alternatif akım
CuO	Bakır oksit
DC	Doğru akım
GSA	Güneş destekli su arıtıcı
GSA/IED	Isıl enerji depolama üniteli güneş destekli su arıtıcı
GSA/NIED	Nanopartikül katkılı ısıl enerji depolama üniteli güneş destekli su arıtıcı
GSA/NIED-SB	Nanopartikül katkılı ısıl enerji depolama üniteli ve nanopartikül katkılı mat siyah boyalı güneş destekli su arıtıcı
PSK	Parabolik sera kurutucu
PSK/IED	Isıl enerji depolama üniteli parabolik sera kurutucu
PSK/NIED	Nanopartikül katkılı ısıl enerji depolama üniteli parabolik sera kurutucu
PVT	Fotovoltaik termal kollektör
PVT/IED	Isıl enerji depolama üniteli fotovoltaik termal kollektör
PSK/NIED	Nanopartikül katkılı ısıl enerji depolama üniteli fotovoltaik termal kollektör
SEM	Taramalı elektron mikroskopu
XPS	Ekstrüde polistren

SEMBOLLER

α	Yutuculuk
v	Hız (m/s)
λ_{fg}	Gizli ısı (kJ/kg)
τ	Geçirgenlik
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
ψ	Akış ekserjisi
η	Verim (%)
A	Alan (m ²)
c_p	Özgül ısı kapasitesi (kJ/kg.K)

D_h	Hidrolik çap (m)
DR	Kuruma hızı ($g_{su}/g_{kuru\ madde}\cdot dk$)
E	Tüketilen elektrik enerjisi (kWh)
\dot{E}	Enerji (W)
\dot{E}_x	Ekserji (W)
FF	Dolum faktörü
\dot{G}	Güneş ışınım yoğunluğu (W/m^2)
\dot{G}_{ef}	Efektif güneş ışınımı (W)
h	Isı transfer katsayısı ($W/m^2.K$)
\bar{h}	Entalpi (kJ/kg)
I	Elektriksel akım (A)
k	Isıl iletkenlik ($W/m.K$)
\dot{m}	Kütleli debi (kg/s)
MC	Nem miktarı ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
MC_0	İlk durum nem miktarı ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
M_d	Son durum nem miktarı ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
MC_{db}	Kuru bazda nem miktarı ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
MC_e	Denge durumu nem miktarı ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
MC_t	“t” anındaki nem miktarı ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
MC_{t+dt}	“t+dt” anındaki nem miktarı ($g_{su}/g_{kuru\ madde}$)
M_i	İlk durum nem kütlesi (g)
MR	Nem oranı (%)
m_s	Saatlik kümülatif temiz su üretkenliği (kg)
m_{wt}	Uzaklaştırılan nem kütlesi (kg)
Nu	Nusselt sayısı
P	Elektriksel güç (W)
\bar{P}	Hava basıncı (kPa)
R	Belirsizlik fonksiyonu
\bar{R}	Evrensel gaz sabiti (kJ/kg K)
Re	Reynolds sayısı
s	Entropi (kJ/kg.K)
SEC	Özgül enerji tüketimi (kWh/kg)
SI	Sürdürülebilirlik indeksi

SMER	Özgül nem çekme oranı (kg/kWh)
T	Sıcaklık (°C)
V	Elektriksel gerilim (V)
w_1, w_2, w_n	Bağımsız değişkenlerin belirsizlikleri
W_R	Toplam belirsizlik (%)

ALT İNDİSLER

a	hava
amb	çevre
c	konveksiyon
des	yıkım
ef	efektif
elc	elektriksel
ex	ekserji
f	sürtünme
in	giriş
ls	kayıp
m	kütle
mp	ürün nemi
max	maksimum
oc	açık devre
ou	çıkış
r	radyasyon
sc	kısa devre
sun	güneş
t	toplam
thr	termal
wt	su

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Su dolaşımli düzlemsel örnek bir güneş kollektörünün bileşenleri	4
Şekil 2.2. Hava dolaşımli düzlemsel örnek bir güneş kollektörünün bileşenleri	5
Şekil 2.3. Vakum tüplü bir güneş kollektörünün şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.4. Parabolik oluk tipi bir kollektörün şematik gösterimi	6
Şekil 2.5. Lineer fresnel reflektör sisteminin şematik gösterimi	7
Şekil 2.6. Silindirik alıcılı parabolik çanak tipi kollektöre ait görsel.....	8
Şekil 2.7. Helisel alan kollektörünün şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.8. PVT kollektörlerin sınıflandırılması	9
Şekil 2.9. Sıvı dolaşımli bir PVT kollektörün bileşenleri	10
Şekil 2.10. Farklı tipteki sera geometrileri.....	11
Şekil 2.11. Farklı tipteki güneş destekli su arıtıcı geometrileri	12
Şekil 2.12. Güneş bacası şematik gösterimi (sol) ve fotoğrafı (sağ).....	13
Şekil 3.1. Isıl enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması.....	15
Şekil 3.2. Faz değiştiren malzemelerdeki ısı depolama süreci.....	17
Şekil 3.3. Farklı faz değiştiren malzeme uygulamalarındaki sıcaklık aralıkları .	18
Şekil 5.1. Kullanılan nanopartiküllere ait SEM görüntüsü	26
Şekil 5.2. Nanopartikül katkıli modifikasyonların hazırlanma adımları.....	28
Şekil 5.3. Geliştirilen PVT kollektörlerin ölçüleri	29
Şekil 5.4. PVT kollektör deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	30
Şekil 5.5. (a) PVT kollektörlerin içyapısı, (b) deney düzeneği fotoğrafı.....	31
Şekil 5.6. Parabolik sera kurutucuların ölçüleri	32
Şekil 5.7. Sera kurutucu deney düzeneğinin şematik gösterimi	33
Şekil 5.8. Parabolik sera kurutucuların ölçüleri	33
Şekil 5.9. İmal edilen arıtıcıların ölçüleri.....	34
Şekil 5.10. Güneş destekli su arıtıcı deney düzeneği şematik gösterimi	35
Şekil 5.11. Güneş destekli su arıtıcı deney düzeneği fotoğrafı	35
Şekil 5.12. Manisa ve Türkiye güneş ışınımı haritası	36
Şekil 7.1. PVT kollektör deneyleri için çevre sıcaklığı ve ışınımın zamana bağlı değişimi	48
Şekil 7.2. PVT kollektörlere ait çıkış havası sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi	49
Şekil 7.3. PVT kollektörlere ait elektriksel güç değerlerinin zamana bağlı değişimi	50
Şekil 7.4. PVT kollektörlere ait ısı verim değerlerinin zamana bağlı değişimi .	51
Şekil 7.5. PVT kollektörlere ait elektriksel verim değerlerinin zamana bağlı değişimi	51
Şekil 7.6. PVT kollektörlere ait toplam ekserji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi	52
Şekil 7.7. PVT kollektörlere ait ortalama sürdürülebilirlik indeksi ve toplam verim değerlerinin değişimi.....	52
Şekil 7.8. PVT kollektörlerin ekserji verimlerinin literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması	53
Şekil 7.9. Sera kurutucu deneylerindeki çevresel parametrelerin zamana bağlı değişimi	55
Şekil 7.10. Sera kurutucu çıkış havası sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi ...	56
Şekil 7.11. Sera kurutucu ekserji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi....	57
Şekil 7.12. Ürün nem içeriği değerlerinin zamana bağlı değişimi.....	58

Şekil 7.13. SEC değerlerinin zamana bağlı değişimi	59
Şekil 7.14. Kuruma hızı değerinin zamana bağlı değişimi	60
Şekil 7.15. Elde edilen SMER değerlerinin literatürdeki benzer araştırmalarla karşılaştırılması	60
Şekil 7.16. Sera kurutuculara ait termal kamera görüntüsü	61
Şekil 7.17. Su arıtma sistemi deneylerindeki çevresel koşulların zamana bağlı değişimi	62
Şekil 7.18. Su arıtıcı üretkenlik değerinin zamana bağlı değişimi.....	64
Şekil 7.19. Su arıtıcı kümülatif üretkenlik değerinin zamana bağlı değişimi	65
Şekil 7.20. Arıtıcı enerji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi	66
Şekil 7.21. Arıtıcı ekserji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi.....	67
Şekil 7.22. Ortalama sürdürülebilirlik indeksi ve saatlik üretkenlik değerlerinin gösterimi.....	68



TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Kullanılan bakır oksit nanopartiküllerin özellikleri.....	27
Tablo 5.2. Kullanılan parafin mumunun özellikleri.....	27
Tablo 5.3. Kullanılan fotovoltaiik panellerin özellikleri.....	29
Tablo 5.4. Deneylerde kullanılan ölçüm aletleri ve özellikleri.....	37
Tablo 6.1. Elde edilen belirsizlik değerleri	47
Tablo 7.1. Mevcut çalışmada elde edilen verim değerlerinin benzer çalışmalar ile karşılaştırılması	54



TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL'e ve öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2020/088 proje numarası ile desteklenmiştir. Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi'ne desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Ceylin ŞİRİN
Manisa, 2022



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Nanopartikül Katkılı Gizli Isı Depolama Ünitesi Entegreli Güneş Enerjili Isıl Sistemlerin Tasarımı ve Deneysel Analizi

Ceylin ŞİRİN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

Bu tez çalışmasında, nanopartikül katkılı gizli ısı enerji depolama ünitesi kullanımının farklı güneş destekli ısı sistemlerin performansına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada hava dolaşımli hibrit fotovoltaik-termal (PVT) kollektörler, sera kurutucular ve güneş destekli su arıtma sistemleri incelenmiştir. Her bir sistemin, konvansiyonel, parafin bazlı ısı enerji depolama ünitesi ve bakır oksit (CuO) nanopartikül katkılı ısı enerji depolama ünitesi versiyonları imal edilmiş ve eş zamanlı olarak test edilmiştir. Ek olarak, güneş destekli su arıtma sistemine yutucu yüzey kaplama malzemesi olarak CuO nanopartikül katkılı mat siyah boya da uygulanmıştır. Bu bağlamda, nanopartiküllerin kombine kullanımının etkisi de araştırılmıştır. PVT kollektör deneyleri ve sera kurutucu deneyleri sırasıyla 0,007-0,014 kg/s ve 0,009-0,014 kg/s aralığındaki kütleli debilerde test edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, nanopartikül katkılı modifikasyon kullanılması, PVT kollektörün ısı ve ekserji verimi değerlerini konvansiyonel sisteme oranla sırasıyla %9,22-14,19 ve %13,61-19,01 oranında arttırmıştır. Ek olarak PVT kollektörlerin elektriksel verimleri %10,00-13,30 aralığında bulunmuştur. Sera kurutucu deneylerinde tarımsal ürün kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül katkılı modifikasyonun sera kurutucuda kullanılması ile kuruma süresi 120-140 dakika aralığında kısaltılmıştır. Ek olarak sera kurutucuda nanopartikül katkılı modifikasyon kullanımı özgül enerji tüketimi değerini %23,79 azaltmıştır. Sera kurutucuların özgül nem çekme oranı 0,67-1,29 kg/kWh aralığında hesaplanmıştır. Güneş destekli su arıtma sistemi deneylerinde toplamda dört farklı sistem incelenmiştir. Nanopartiküllerin hem ısı enerji depolama ünitesine hem de yutucu yüzey kaplama malzemesine entegre edilmesi, konvansiyonel su arıtma sistemine oranla kümülatif üretkenlik değerlerini %26,77 oranında arttırmıştır. Ek olarak arıtıcıların ısı ve ekserji verimi değerleri sırasıyla %15,96-19,30 ve %1,25-2,01 aralığında bulunmuştur. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar, nanopartikül katkılı ısı enerji depolama ünitesi kullanımının farklı güneş destekli ısı sistemlerin performansını önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: PVT kollektör, sera kurutucu, güneş destekli su arıtıcı, nanopartikül, gizli ısı depolama

2022, 82 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Design and experimental analysis of nanoparticle-enhanced latent heat storage unit-integrated solar thermal systems

Ceylin ŞİRİN

**Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

In this thesis, the effect of utilizing nanoparticle-enhanced latent heat thermal energy storage unit on the performance of various solar-thermal systems has been analyzed experimentally. In the study, hybrid photovoltaic-thermal (PVT) air collectors, greenhouse dryers and solar desalination systems have been investigated. Conventional, paraffin-based thermal energy storage unit modified and copper oxide (CuO) nanoparticle-enhanced paraffin-based thermal energy storage unit modified versions of each system have been manufactured and simultaneously tested. In addition, CuO nanoparticle-enhanced matt black paint has been applied to the solar still as absorber coating material. In this context, the effect of combined utilization of nanoparticles has been investigated. PVT collector and greenhouse dryer tests have been performed at between 0.007-0.014 kg/s and 0.009-0.014 kg/s mass flow rates, respectively. According to experimentally obtained results, utilizing nanoparticle-enhanced modification increased thermal and exergy efficiencies of PVT collector between 9.22-14.19% and 13.61-19.01%, respectively in comparison to the conventional system. Moreover, electrical efficiency values of PVT collectors were found between the range of 10.00-13.00%. Agricultural products have been dried in greenhouse dryer tests. Utilizing nanoparticle-enhanced modifications in greenhouse dryer reduced drying time between 120-140 minutes. In addition, employing nanoparticle-enhanced modification decreased specific energy consumption as 23.79%. Specific moisture extraction rate values of greenhouse dryers were calculated between the range of 0.67-1.29 kg/kWh. Four different systems in total have been analyzed in solar desalination system experiments. Integrating nanoparticles in both thermal energy storage unit and absorber surface coating material improved accumulated productivity value as 26.77%. Also, thermal and exergy efficiency values of solar stills were attained between the ranges of 15.96-19.30% and 1.25-2.01%, respectively. The obtained findings of this study showed that using nanoparticle-enhanced thermal energy storage unit significantly improved the performances of various types of solar-thermal systems.

Keywords: PVT collector, greenhouse dryer, solar still, nanoparticle, latent heat storage

2022, 82 pages

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusu, ekonomik kalkınma ve buna bağlı olarak artış gösteren enerji talebi, enerjinin etkin kullanımı ve alternatif enerji kaynakları ile ilgili araştırmaların yaygınlaştırılması konularını ön plana çıkarmıştır. Dünya çapındaki fosil enerji kaynaklarının kısıtlı oluşu, ülkeleri temiz-tükenmez enerji sistemlerinin kullanımına ve enerji politikalarının gözden geçirilerek düzenlenmesine yönlendirmektedir. Buna ek olarak, çevresel endişelerin de bu değişiklikler üzerine etkili olduğu söylenebilir. Sürdürülebilir kalkınma ve gelecek için zararlı emisyonların azaltılması ve küresel ısınmanın yol açtığı olumsuz etkilerin engellenmesi önemli bir husustur. Konu ile ilgili gerekli önlemlerin alınması, sadece gelecek nesiller için değil tüm ekosistem için bir gerekliliktir. Fosil yakıt rezervlerinin kısıtlılığı enerji üretim maliyetlerini arttırdığından, konunun ekonomik boyutu da üzerinde durulması gerektiğini açık biçimde göstermektedir.

Sürdürülebilir kalkınmanın hedeflerinden biri olan, herkes için sürdürülebilir, güvenilir, karşılanabilir ve modern enerjiye erişimin sağlanması hususu tüm ülkeler için önem arz etmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel enerji üretimi içerisindeki payının arttırılması gerekmektedir. lkeler bu amaç ile yenilenebilir enerjiler, enerji verimliliği araştırmaları, gelişmiş ve temiz yakıt uygulamalarını da içeren enerji çalışmalarına olan yatırımları ve uluslararası işbirliklerini arttırmaya yönelik pek çok çalışma yapmaktadır. Konu ile ilgili göstergeler ise elektrik enerjisine erişebilen nüfus oranı, evsel ve endüstriyel uygulamalarda temiz-tükenmez yakıt ve uygulamaların kullanan nüfus oranı, yenilenebilir enerjilerin toplam nihai enerji tüketimindeki oranı, enerji yoğunluğu ve bu bağlamda yapılan yatırımların gayrisafi yurt içi hasılaya oranı olarak sıralanabilir.

Güneş enerjisi yenilenebilir, temiz ve tükenmez enerji kaynaklarından bir tanesidir. Güneş enerjisi sistemleri, dünyanın pek çok bölgesinde kullanım potansiyeline sahip ve zararlı emisyonları azaltabilecek önemli bir alternatiftir. Güneş enerjisinden fotovoltaik sistemler kullanılarak elektriksel anlamda faydalanılabileceği gibi ısıl enerji de elde edilebileceği bilinmektedir. Elde edilen ısıl enerji de güneş bacaları ve parabolik sistemler yardımıyla elektrik enerjisi

üretilebilir. Ek olarak üretilen ısı enerjisi, mahal ısıtma, soğutma uygulamaları ve kurutma sistemleri gibi pek çok alanda kullanılabilir.

Enerji sistemlerinin performansının artırılabilmesi ve güneş destekli sistemler için kullanılabilirlik süresinin artırılabilmesi adına ısı enerjisi depolama teknolojisi son yıllarda oldukça popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu teknoloji, temel olarak faz değiştiren malzemelerin gizli ısı depolama yeteneğini kullanmaktadır. Ancak, bilineceği üzere faz değiştiren malzemelerin pek çoğunun ısı iletkenlikleri düşük olduğundan büyük ısı transferi yüzey alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu olumsuzluk, faz değiştiren malzemelere yüksek ısı iletkenliğe sahip nano malzemelerin ilave edilmesi ile giderilebilir.

Bilineceği üzere, mevcut enerji sistemlerinin etkinliğinin artırılması enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik adına oldukça önemli bir konudur. Bahsi geçen enerji sistemlerini sadece elektriksel anlamda değerlendirmek doğru olmayacaktır. Hem ısı hem de elektriksel enerji sistemlerinin performanslarının geliştirilmesinin ekonomik, beşeri ve çevresel pek çok olumlu katkıları bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, üç farklı güneş destekli enerji sistemi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan tasarım çalışmasında, hibrit fotovoltaik-termal kollektör, sera kurutma sistemi ve güneş destekli su arıtma sistemi nanopartikül katkılı faz değiştiren malzemeler ile geliştirilmiştir. Deneysel çalışmada ise her bir güneş destekli enerji sistemi için, üç farklı konfigürasyon eşzamanlı olarak test edilmiş ve sonuçları rapor edilmiştir. Bu tez çalışmasının temel amacı, farklı güneş destekli enerji sistemlerinin performansının nanopartikül katkılı faz değiştiren malzemeler ile iyileştirilmesidir.

2. GÜNEŞ DESTEKLİ ISIL SİSTEMLER

Bu bölümde güneş destekli ısı sistemleri hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Tez kapsamında üç farklı güneş destekli ısı uygulama deneysel olarak analiz edildiğinden, bu üç sistem ile birlikte güneş enerjisinin ısı anlamında kullanıldığı en temel uygulama olan güneş kolektörleri üzerine yoğunlaşmıştır. Diğer uygulamalar ile ilgili özet bilgilere yer verilmiştir.

2.1. Güneş Kolektörleri

Güneş kolektörleri, güneş ışınımını faydalı ısı enerjiye dönüştüren ve yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. Temel olarak güneş kolektörleri yutucu yüzeylerine gelen güneş ışınımını bünyelerine alarak ısı enerjiye dönüştürmekte, sonrasında elde edilen bu faydalı ısı enerjisi çalışma akışkanına aktarmaktadır. Güneş kolektörlerinde hava ve su gibi akışkanların yanı sıra nanoakışkanlar ve endüstriyel yağlar da iş akışkanı olarak kullanılabilir [1,2]. Güneş kolektörleri iki kısımda incelenebilir. Bunlar düşük sıcaklıklı (sabit) ve konsantre (odaklanabilen) güneş kolektörleridir. Düşük sıcaklıklı sistemler genelde 40-200 °C arası çalışma sıcaklıklarına sahip olmakla birlikte düzlemsel ya da silindirik (vakum tüplü sistemler) geometriye sahiptir [3]. Bu kolektörler güneş ışınımını odaklayamaz. Konsantre güneş kolektörleri ise genelde konkav (içbükey) geometriye sahiptir.

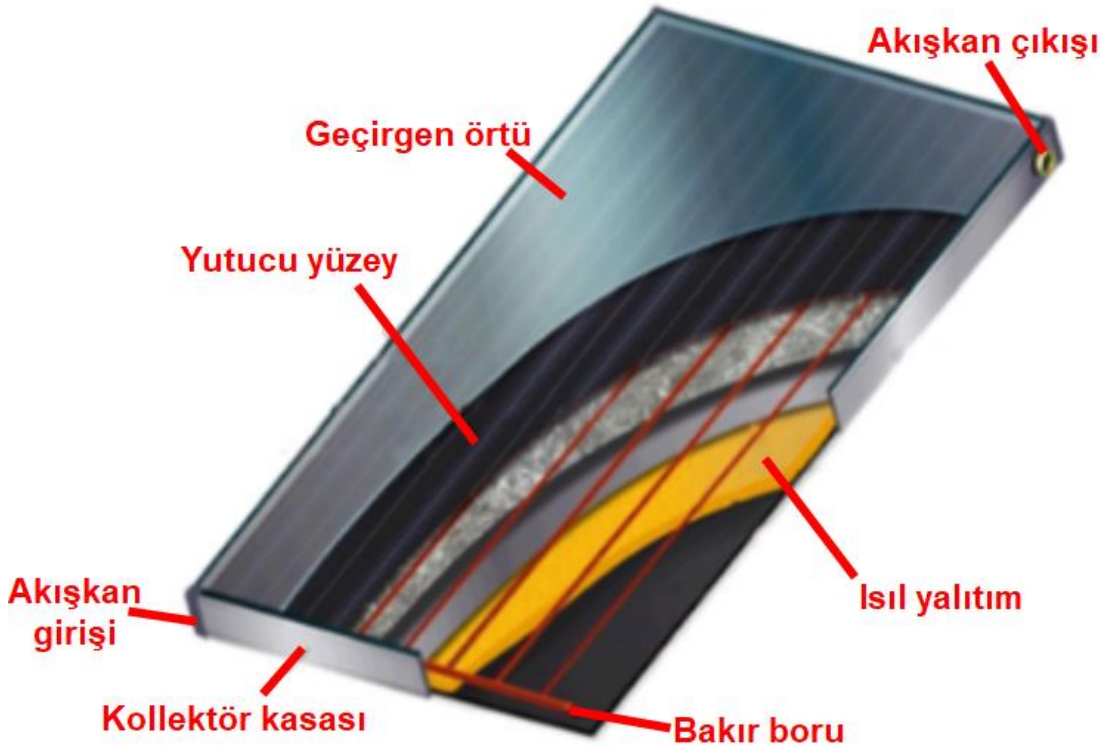
2.1.1. Düşük Sıcaklıklı Güneş Kolektörleri

Düşük sıcaklıklı güneş kolektörleri, odaklanamayan (sabit) güneş kolektörleri olarak bilinmektedir. Bunlar temelde düzlemsel ve vakumlu güneş kolektörleri olarak iki kısımda incelenebilir.

Düzlemsel Güneş Kolektörleri

Düzlemsel güneş kolektörleri, yutucu ve kolektör yüzey alanı neredeyse aynı olan ve optik yoğunlaştırıcı bulundurmayan sistemlerdir. Farklı tip akışkanların kullanılabilirdiği bu tip kolektörlerde, su dolaşımı uygulamaları genelde evsel sıcak su temini için kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de su dolaşımı düzlemsel bir güneş kolektörünün bileşenleri gösterilmiştir [2]. Buna göre su dolaşımı güneş düzlemsel kolektörü temel olarak kolektör kasası içine yerleştirilmiş ısı yalıtım malzemesi

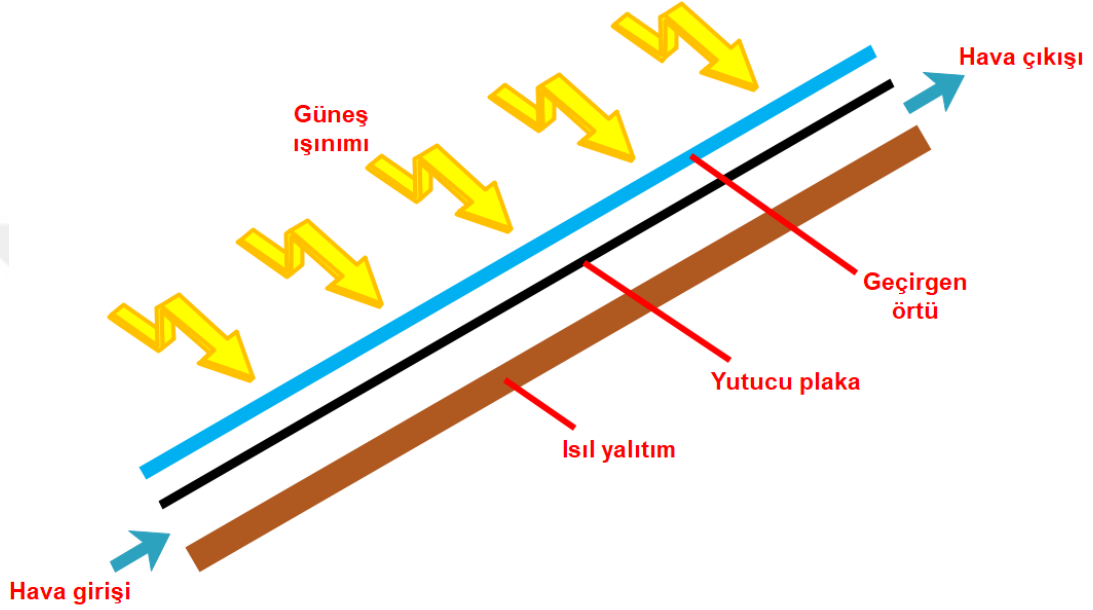
üzerine konumlandırılmış yutucu yüzey ve akışkan dolaşımının sağlandığı boruları içermektedir. Ek olarak kollektörün güneş ışınımını alan üst yüzeyinde de bir geçirgen örtü bulunmaktadır. Geçirgen örtü bulundurmeyen uygulamalarına da rastlamak mümkündür [4]. Yutucu yüzey ve akışkanın dolaştığı boruların üretiminde genelde alüminyum, bakır ve paslanmaz çelik gibi yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemeler tercih edilmektedir [5,6]. Düzlemsel güneş kollektörlerinde ise geçirgen örtü olarak cam ve plastik katkılı (polivinil klorür, polikarbonat vs.) malzemeler kullanılabilir. Sıvı dolaşımli kollektörlerde genel olarak su tercih edilmesinin yanında, yağ ve yüksek ısıl iletkenlik değerine sahip nanopartiküllerin kullanıldığı nanoakışkanlar da performans artırıcı modifikasyonlar olarak kullanılabilir. Ancak bu modifikasyonlar geliştirme aşamasında olup, yaygın bir yöntem olmadığı bilinmektedir [2].



Şekil 2.1. Su dolaşımli düzlemsel örnek bir güneş kollektörünün bileşenleri [2]

Hava dolaşımli düzlemsel güneş kollektörleri ise mahal ısıtma, tarımsal ürün kurutma gibi farklı amaçlarda kullanılabilir [7,8]. Bu kollektörler doğal taşınım ile çalıştırılabilir gibi, fan gibi yardımcı elemanların kullanımı ile zorlanmış taşınım ile de faaliyet gösterebilmektedirler [9]. Hava dolaşımli güneş

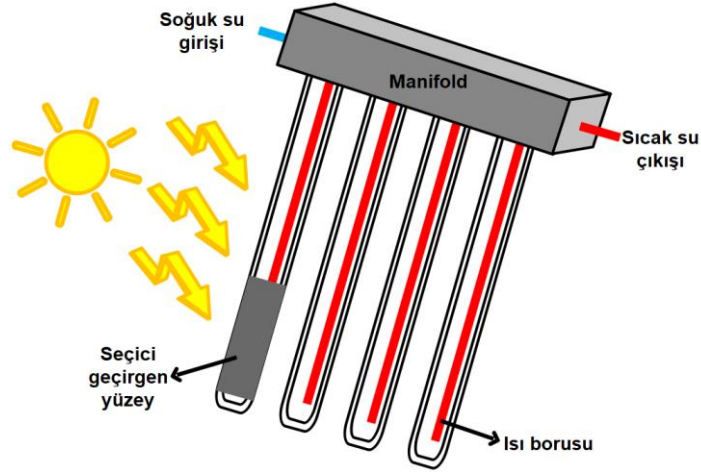
kollektörlerinde mevcut hava kanalı sayısı artırılarak çoklu geçiş özelliği sağlanabilmekte, ek olarak çeşitli kanatçıklar ve dolgu malzemeleri eklenerek performansın artırılması mümkün olabilmektedir [7,10]. Şekil 2.2’de örnek bir hava dolaşimli düzlemsel güneş kollektörüne ait şematik gösterim sunulmuştur [11]. Düzlemsel güneş kollektörleri imalatı kolay, ağır olmayan ve uzun ömürlü sistemler olarak bilinmektedir [7].



Şekil 2.2. Hava dolaşimli düzlemsel örnek bir güneş kollektörünün bileşenleri [11]

Vakumlu Güneş Kollektörleri

Vakumlu camların kullanıldığı bu tip güneş kollektörlerinde, ek olarak yansıtıcılar da kullanılabilir. Çıkış sıcaklıkları düzlemsel kollektörlere göre daha yüksektir [12]. Temel olarak iç içe eş eksenli cam boruların kullanıldığı sistemde, iki cam arasındaki hava sistemin verimini arttırmak için vakumlanmıştır. Dıştaki cam saydam olup, güneş ışınlarının içteki boruya gelmesine olanak sağlamaktadır. İçteki boru ise yüksek yutuculuğa sahip olup, dış borudan gelen ışınımı toplayarak içerisindeki suyu ısıtmaktadır. İçteki siyah yüzeyli boru yerine yutucu plaka da kullanılabilir. Bu tip kollektörler 50-200 °C arası çalışma sıcaklığına sahiptir [3]. Şekil 2.3’te vakum tüplü güneş kollektörüne ait şematik bir görsel sunulmuştur [13].



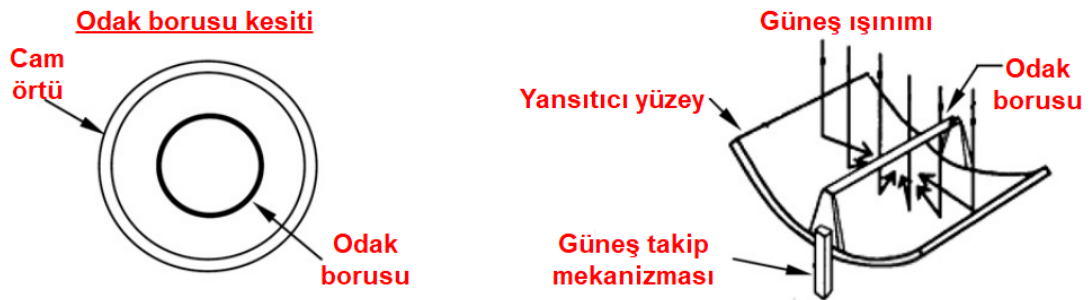
Şekil 2.3. Vakum tüplü bir güneş kolektörünün şematik gösterimi [13]

2.1.2. Konsantre Güneş Kolektörleri

Parabolik Oluk Tipi Güneş Kolektörleri

Bu tip kolektör sistemlerinde, parabolik kesite sahip olan reflektörler kullanılmaktadır. Bu sayede güneş ışınımı kolektörün odağındaki yutucu bileşene yönlendirilmektedir. Güneş radyasyonunu doğrusal yönde yoğunlaştırmakta ve odaklamakta olan bu sistemler, ısı kaybının meydana geldiği bölgenin küçülmesi ve absorbe edilen güneş ışınımının artması sayesinde yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmektedir [14].

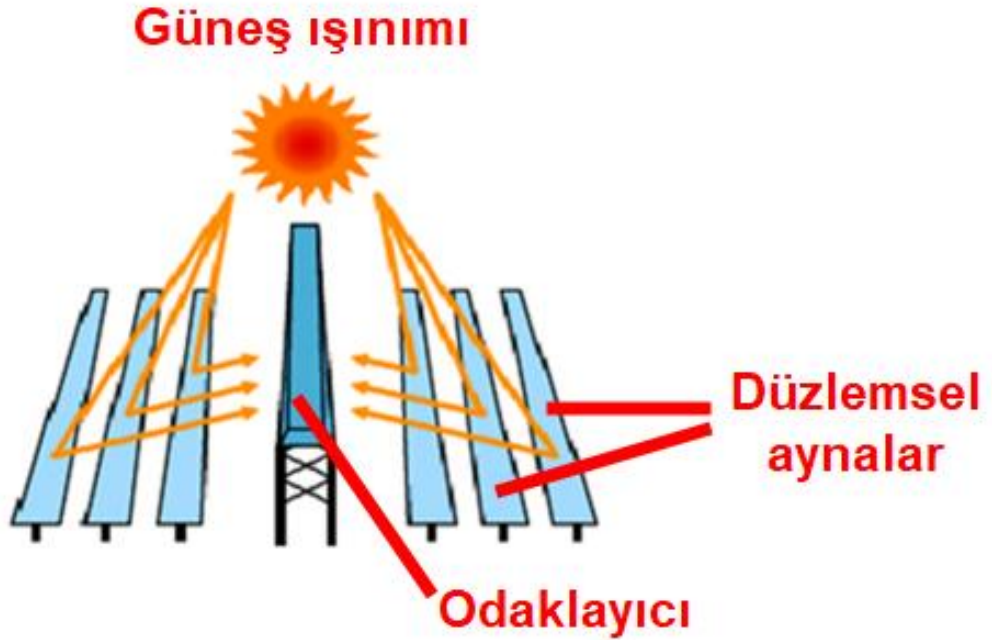
Parabolik oluk tipi kolektörlerde kullanılan yoğunlaştırıcı yüzeyler sayesinde, yansıyan güneş ışınları yansıtıcı yüzeyle aynı açı değerini sağlayarak odak borusuna yönlendirilmektedir. Bu prensip, sistem geometrisinin parabolik geometrisinden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.4'te bir parabolik oluk tipi kolektörün şematik gösterimi sunulmuştur [15].



Şekil 2.4. Parabolik oluk tipi bir kolektörün şematik gösterimi [15]

Lineer Fresnel Reflektörler

Lineer fresnel odaklayıcılar, parabolik yansıtıcı sistemlerinin küçük modülleri içeren bir türüdür. Bu sistemlerde yansıtıcı olarak düzlemsel aynalar kullanılmaktadır. Bu tip sistemlerin parabolik oluk tipi sistemlerden en büyük farkı yansıtıcı yüzeylerinin düzlemsel geometriye sahip oluşudur [16]. Bu tip sistemler güneşi tek bir ekseninde takip edebilmekte, bu nedenle performansları diğer yoğunlaştırıcı sistemlere oranla daha düşük seviyededir. Güneşi tek ekseninde takip ettiklerinden maliyetleri diğer sistemlere (güneşi çift ekseninde takip edebilen) oranla daha düşüktür. Şekil 2.5'te lineer fresnel reflektörlere ait şematik bir görsel verilmiştir [16].



Şekil 2.5. Lineer fresnel reflektör sisteminin şematik gösterimi [16]

Parabolik Çanak Tipi Kollektörler

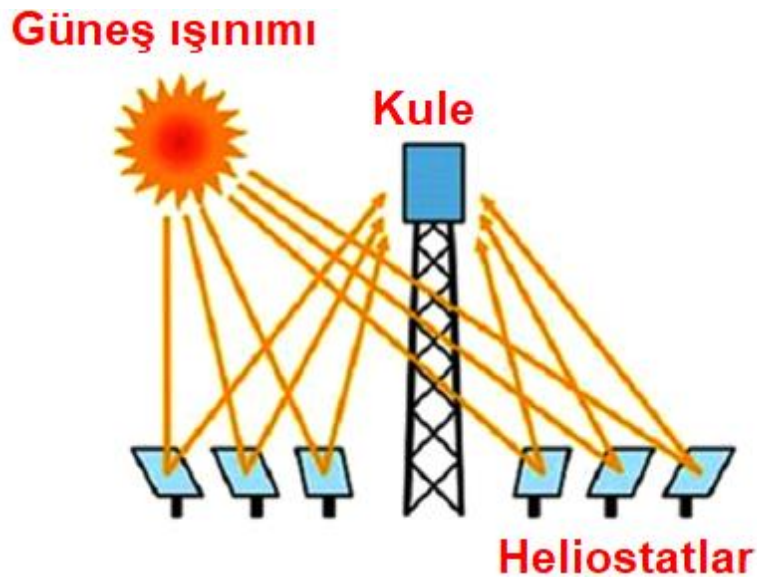
Bu tip kollektörler noktasal biçimde yoğunlaştırma yapmaktadır. Konkav aynaların yansıtıcı yüzey olarak kullanıldığı bu sistemlerde, sistemin odak noktasında bulunan Stirling motor sayesinde enerji elde edilmektedir [17]. Diğer bir yöntem olarak, odak bölgesinde bulunan bir iş akışkanına transfer edilen ısı enerjisi, Rankine çalışma prensibine dayalı bir çevrime de gönderilebilir. Bu sistemlerde, güneş iki ekseninde takip edilerek performansın artırılması mümkündür. Şekil 2.6'da örnek bir parabolik çanak tipi kollektöre ait fotoğraf sunulmuştur [18].



Şekil 2.6. Silindirik alıcılı parabolik çanak tipi kollektöre ait görsel [18]

Helisel Alan Kollektörleri

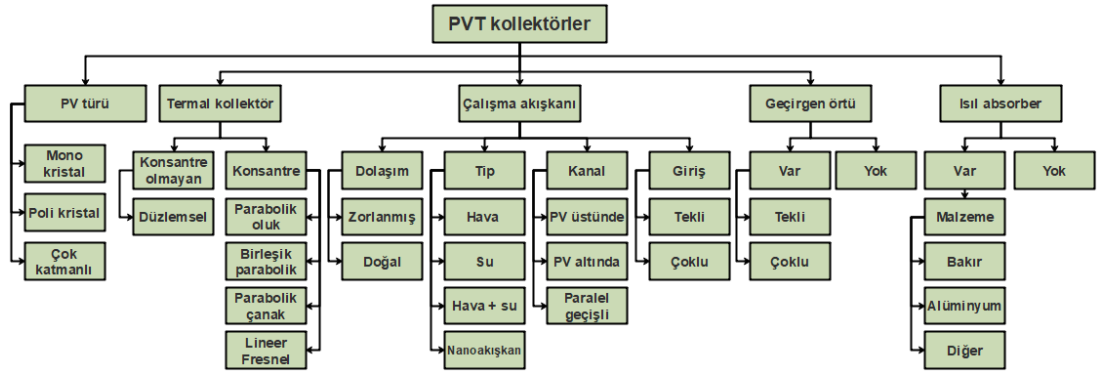
Bu tip kollektörler, merkezi alıcı sistemler olarak da bilinmektedir. Helisel alan kollektörlerinde, tek odaklama yapabilen ve heliostat olarak adlandırılan bileşenler kullanılmaktadır [16]. Bu bileşenler sistemin ilk enerjisini karşılamaktadır. Heliostatlara gelen ışınım, kuledeki istenen noktaya yönlendirilebilmektedir. Bu yansıtıcı bileşenler takip sistemleri kullanılarak, güneş radyasyonunun geliş doğrultusuna göre kendisini konumlandırabilmektedir. Yoğunlaştırılan güneş enerjisi, alıcıdan geçmekte olan akışkanı ısıtmaktadır. Sistemdeki iş akışkanı, ısınıp suya aktarmakta ve ortaya çıkan buhar kullanılarak buhar türbini yardımıyla elektrik enerjisi üretilmektedir. Şekil 2.7’de helisel alan kollektör sistemine ait şematik bir görsel verilmiştir [16].



Şekil 2.7. Helisel alan kollektörünün şematik gösterimi [18]

2.1.3. Hibrit Fotovoltaik-Termal Kollektörler

Hibrit fotovoltaik-termal (PVT) kollektörler kullanılarak hem ısı hem de elektriksel enerjinin eşzamanlı olarak üretilebilmesi mümkündür [19]. Aynı zamanda, PVT kollektörler fotovoltaik panel sıcaklığının düşürerek elektriksel performansın da artırılmasını sağlamaktadır. PVT kollektörler temel olarak bir çalışma akışkanı ile fotovoltaik panel üzerindeki ısı enerjinin çekilmesi ve ısı enerjisi üretilmesine, aynı zamanda panel sıcaklığının düşürülerek elektriksel performansın da artırılması esasına dayanmaktadır. Bu tip kollektörlerde çalışma akışkanı olarak düzlemsel güneş kollektörlerinde olduğu gibi hava, su, yağ ya da nanoakışkanlar kullanılabilir [20]. PVT kollektörler fotovoltaik panel türü, ısı kollektör türü, çalışma akışkanı türü, geçirgen örtü tipi ve yutucu yüzey türlerine göre sınıflandırılabilir. Şekil 2.8'de hibrit fotovoltaik termal kollektörlerin sınıflandırılması sunulmuştur [21].



Şekil 2.8. PVT kollektörlerin sınıflandırılması [21]

PVT kollektörlerin kullanımındaki temel iki amaç, fotovoltaik panelin yüzey sıcaklığını azaltarak elektriksel verimin iyileştirilmesi ve elektrik enerjisine ek olarak ısı enerjinin de eş zamanlı olarak üretilebilmesidir. Belirtilen bu amaçlar kapsamında, PVT sistemlerde fotovoltaik panel yüzeyin seçilecek bir iş akışkanı vasıtasıyla ısı uzaklaştırılmaktadır. İş akışkanı, sıvı ya da gaz fazda seçilebilmektedir. Su vb. iş akışkanlarının seçildiği sistemlerde, elde edilen ısı enerji evsel sıcak su üretimi amacıyla kullanılabilir. Hava kullanılan sistemlerde ise mahal ısıtma ve tarımsal ürün kurutma amacıyla üretilen ısı enerji kullanılabilir. PVT kollektörlerin verimlerinin artırılabilmesi için çeşitli tasarımlar mevcuttur. Bu tasarımların temelinde kullanılan malzeme tipi ve sistem geometrisi bulunmaktadır. Bilineceği üzere, yüksek ısı iletkenliğe sahip

malzemelerin kullanımı ısı transferini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bunun yanında, özellikle hava dolaşımı PVT kollektörler için, hava kanalı üzerinde yapılan farklı modifikasyonlar ile havanın sistem içerisinde kalış süresi ve akış boyunca ısı transfer yüzey alanı artırılarak ısı ve elektriksel performansın iyileştirilmesi mümkündür. Şekil 2.9'da sıvı dolaşimli bir PVT kollektörün bileşenleri gösterilmektedir [22].



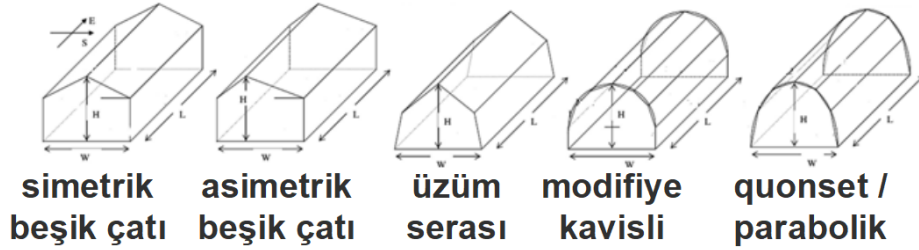
Şekil 2.9. Sıvı dolaşimli bir PVT kollektörün bileşenleri [22]

2.2. Seralar ve Sera Kurutucular

Kurutma işlemi, tarımsal ürünlerin saklanması için kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Bilindiği üzere, geleneksel kurutma yöntemleri yüksek enerji tüketimine sahiptir. Temiz ve tükenmez enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinin zirai ürünlerin kurutma uygulamalarında kullanımı efektif ve uygun maliyetli bir seçenektir [23]. Güneş destekli kurutma sistemleri direkt ve indirekt olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Temel olarak, indirekt sistemlerde harici bir ısıtma sisteminde elde edilen ısı enerjisinin bir kurutma odasına yönlendirilmesi ve kurutma işleminin gerçekleştirilmesi amaçlanır. Direkt kurutucularda ise kurutulan ürün doğrudan güneş ışınımına maruz bırakılmaktadır.

Seralar, temel olarak bitkilerin yetiştirilmesi amacıyla tasarlanmış ve çevre şartları kontrol edilebilen veya düzenlenebilen, güneş ışınımını geçiren kapalı sistemlerdir [24]. Direkt kurutucular sera biçiminde tasarlanabilir ve tarımsal ürünlerin kurutulması bu sistemlerde gerçekleştirilebilmektedir. Sera kurutucular da

direkt kurutma sistemleri sınıfında yer almakta ve uygun maliyetli sistemler olduğu bilinmektedir. Sera kurutucular doğal veya zorlanmış taşınım ile çalıştırılabilmektedir [24]. Ek olarak, seralar ve sera kurutucular farklı geometrilere tasarlanabilmektedir. Şekil 2.10'da farklı sera geometrileri görülebilmektedir [25].



Şekil 2.10. Farklı tipteki sera geometrileri [25]

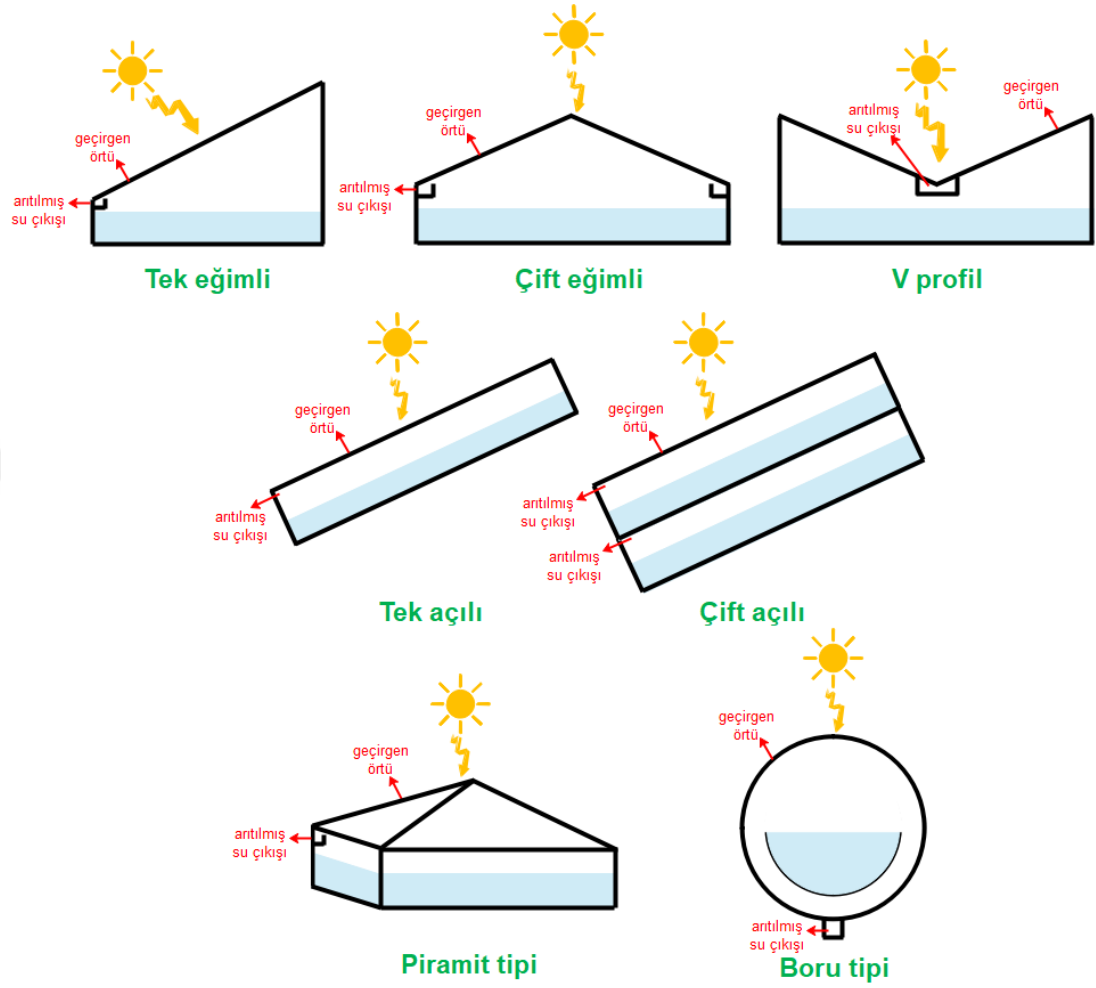
Sera kurutucuların performanslarının artırılması için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları, farklı kuzey duvarı modifikasyonları (kuzey yarımküredeki uygulamalar için), ek bir ısıtıcı ile giriş hava sıcaklığının artırılması, ısı depolama sistemlerinin kullanımı, geçirgen örtü modifikasyonları, seçici yüzey modifikasyonları, geometrik modifikasyonlar, hava giriş ve çıkış konumlandırma modifikasyonları, fotovoltaik sistemlerin kullanımı örnek olarak gösterilebilir [26].

2.3. Güneş Destekli Su Arıtma Sistemleri

Dünyadaki önemli ihtiyaçlardan birisi de kesintisiz temiz su teminidir. Bilindiği üzere, dünyadaki temiz su kaynakları kısıtlı olup, sürdürülebilir su arıtma çözümlerinin dünyanın temiz su ihtiyacının karşılanması için yaygınlaştırılması gerekmektedir. Bu durum kurak ve temiz suya olan ulaşımın kısıtlı olduğu yerler için daha büyük önem arz etmektedir [27].

Son yıllarda, güneş destekli su arıtma sistemlerindeki araştırmalar, sistemlerin uygun maliyetli ve kolay uygulanabilir özelliklerinden dolayı oldukça popüler bir hal almıştır [28,29]. Güneş destekli su arıtıcılar, temel olarak taban kısımdaki suyun buharlaşması ve eğimli yüzeyde yoğunlaşarak sistemden temiz su eldesi prensibine dayanmaktadır. Güneş destekli su arıtma sistemleri farklı geometrilere tasarlanıp, üretilmektedir. Şekil 2.11'de güneş destekli su arıtıcılarının farklı geometrileri sunulmuştur [30]. Güneş destekli su arıtıcılarındaki performans iyileştirme

yöntemlerinin başında tabanda bulunan su sıcaklığını arttırmak ve yoğuşma bölgesi yüzey alanının artırılması gelmektedir.



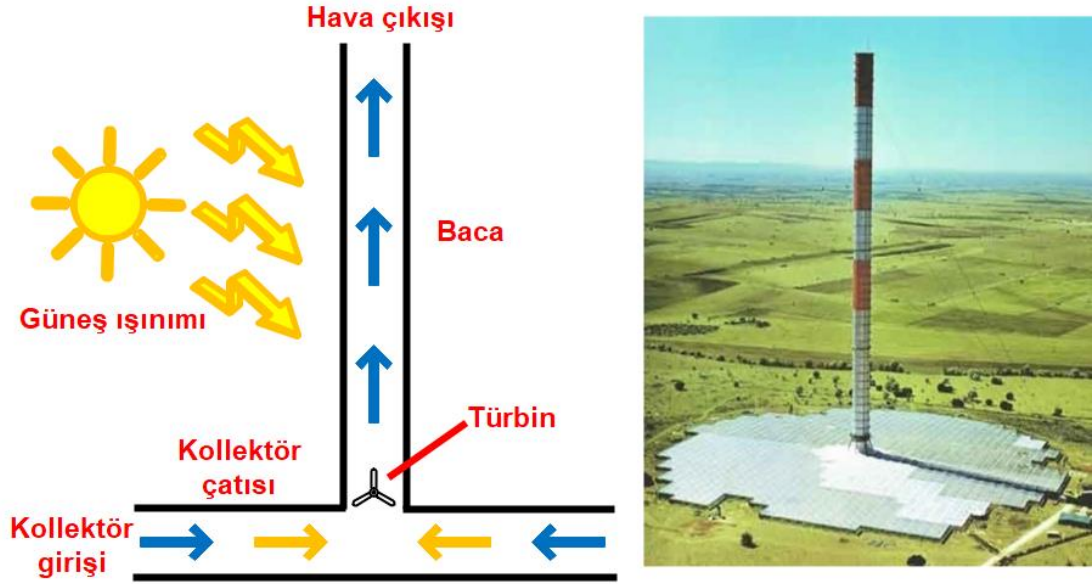
Şekil 2.11. Farklı tipteki güneş destekli su artııcı geometrileri [30]

2.4. Diğer Güneş Destekli Isıl Sistemler

2.4.1. Güneş Bacaları

Termal enerji ve elektrik enerjisi elde etmek için başvurulan bir diğer yöntem ise güneş bacalarıdır. Bir kollektör içerisinde bulunan havanın güneş enerjisi sayesinde ısıtılması sonucunda ısınan havanın yükselerek güneş bacasının taban kısmında yer alan türbin-jeneratör sistemi ile elektrik enerjisinin açığa çıkmasını sağlayan sistemlerdir [31]. Güneş bacası sistemleri temiz ve sürdürülebilir enerji üretimi için son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Fathi ve ark. [31] kollektör içerisindeki havanın sıcaklığını arttırmak amacıyla nükleer çevrimden elde edilen atık ısıyı sistem üzerinde değerlendirmiştir. Bu sayede güneş bacası sisteminden

elde edecekleri elektrik enerjisi miktarını da arttırmışlardır. Aynı zamanda sistem içerisinde yer alan havanın mevcut kinetik enerjisini ölçmek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve termal analizler üzerinde çalışılmıştır [31]. Tipik bir güneş bacasının şematik gösterimi (sol) ve fotoğrafı (sağ) Şekil 2.12’de gösterilmiştir [31].



Şekil 2.12. Güneş bacası şematik gösterimi (sol) ve fotoğrafı (sağ) [31]

2.4.2. Güneş Mimarisi

Güneş mimarisi, güneş enerjisi destekli yenilenebilir enerji sistemlerinin optik, termik ya da malzeme bazlı olarak çeşitli alanlarda incelenmesiyle ortaya çıkan mimari yaklaşımdır. Endüstri ve yapı alanlarında, güneş enerjisi sayesinde ısıtma ve soğutma, mahal/konut ısıtılması, sıcak su kullanım eldesi, su damıtma ve içme suyu eldesi, aydınlanma gibi enerjinin etkin kullanımına yönelik konular üzerinde yoğunlaşmaktadır [32].

2.4.3. Güneş Havuzları

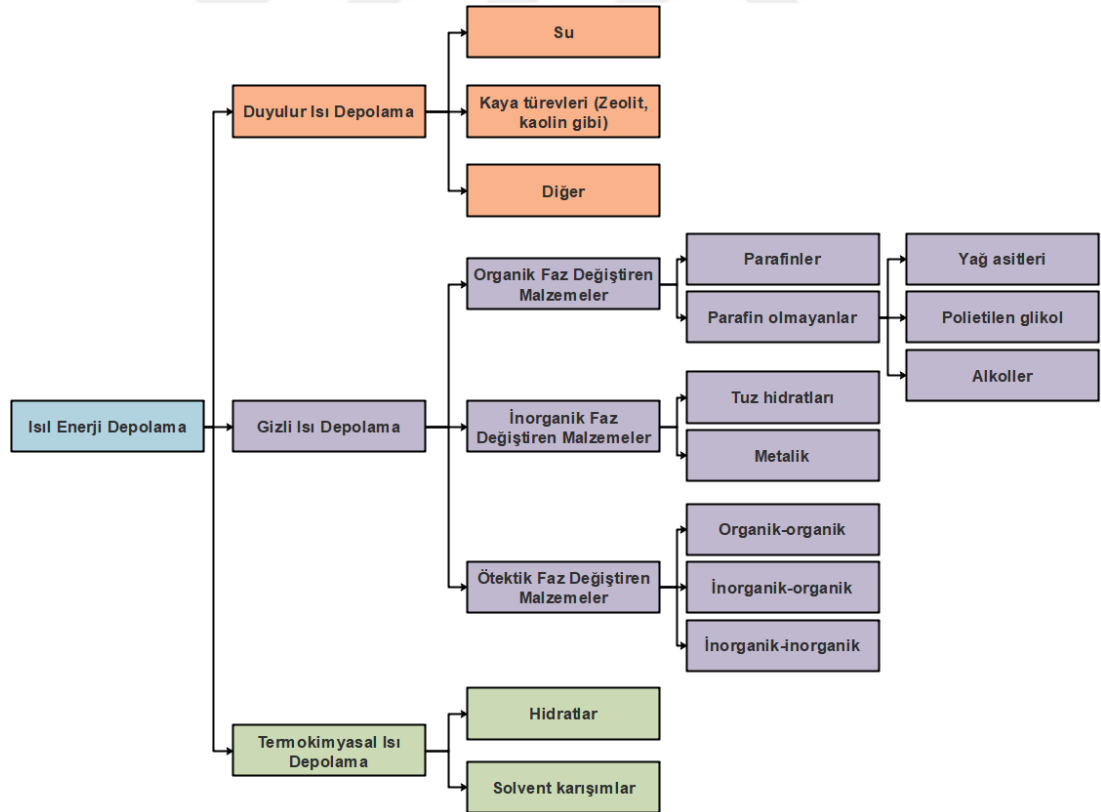
Güneş havuzları, güneş enerjisinin doğrudan toplanıp muhafaza edildiği uygulamalardan biridir. Havuzdaki ısının kontrolü, suya eklenen tuz konsantrasyonu ile belirlenerek konsantrasyon miktarı üst kısımdan alt bölgeye doğru artış göstermektedir. Havuza eklenen tuz, yoğunluk gradyenti oluşturarak depolama bölgesi ile yüzey arasında konveksiyon yoluyla oluşabilecek ısı iletimini önler. Bu prensipten dolayı depolama bölgesindeki suyun sıcaklığında, kaynama noktasına yakın sıcaklıkta bir artış görülür. Havuzdaki su miktarının azalmasını önlemek

amacıyla havuz, yüksek buharlaşma görülen bölgelerde su ile takviye edilir. Güneş havuzu sistemlerinin uygulama bölgelerinde ısı verim, suyun temiz ve berrak olma şartına bağlı olduğu için suyu mümkün olduğunca temiz tutmak konusuna dikkat edilmelidir [33]. Güneş havuzları çalışma prensibi olarak üç temel grupta incelenir; tuz katmanlı güneş havuzu, jel havuz, sıg güneş havuzu [34]. Tuz katmanlı güneş havuzu, su içerisinde belirli konsantrasyonlarda bulunan tuz miktarının yoğunluğu havuzun üst taraflarında havuzun dip kısmındaki tuz yoğunluğuna oranla daha düşüktür. Havuz tabanına yapılan çeşitli ısı transferi arttırıcı modifikasyonlar sonucu suyun sıcaklığında artma gözlemlenir. Havuzun üst tarafından alt tarafına doğru bir ısı iletimi gerçekleşir burada da ısı kaybı gerçekleşerek tuzlu su daha soğuk bir tabakayı aşamayıp altta kalır. Havuzun üst katmanlarındaki konveksiyonun önlenmesi, havuzun tabana yakın kısımlarında suyun sıcaklığının kaynama noktasına yakın bir değere ulaşmasını sağlamaktadır. Havuzdaki ısı kaybına karşı kullanılan diğer bir yöntem ise jel yöntemidir. Buradaki jel madde, yoğunluk bakımından sudan daha az ise ve optik olarak geçirgense güneş tarafından bu su kütlesi ısınmaya başlamaktadır. Güneş havuzlarındaki yüksek miktarda tuz ihtiyacının ortadan kaldırılması, jel kullanımının güneş havuzlarının uygulama alanlarına yönelik sağladığı bir başka pozitif etken olarak değerlendirilebilir. Sıg güneş havuzu sistemleri yaşlık adı verilen bir madde, geçirgen örtü ve yastık tanktan oluşmaktadır. Burada ısıtılacak olan su, gündüz yastık tanka pompalanır ve güneş tarafından ısıtılır. Gece ise bu tank depolama görevi görmektedir. Toplanan su aynı zamanda içilebilme özelliğinden dolayı bir avantaj olarak görülmektedir [34].

3. ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Hızlı ekonomik gelişmeler ve yaşam standartlarının artması, dünya genelindeki enerji kullanımını arttırmıştır. Ek olarak, kullanılan konvansiyonel enerji kaynakları zararlı kirleticilerin ortaya çıkmasına ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bunun yanında, konvansiyonel enerji kaynaklarına olan gereksinim, bu kaynakların hızlı bir biçimde tükenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, mevcut ve yeni enerji sistemlerinin verimli bir şekilde kullanılması oldukça önemli bir konudur. Isıl enerji depolama sistemleri de son yıllarda oldukça yaygın hale gelmiş bir araştırma konusudur. Bu uygulamalar, enerji sistemlerinin etkinliklerini önemli ölçüde arttırmaktadır.

Isıl enerji depolama sistemleri, duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal ısı depolama olarak üç kısımda incelenebilir. Şekil 3.1’de ısıl enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması sunulmuştur [35].



Şekil 3.1. Isıl enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması [35]

3.1. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama uygulamaları, sıcaklık değişimi sonucu depolanan ısı enerjisinin kullanımına dayanmaktadır. Duyulur ısı depolama malzemelerinde faz değişimi gerçekleşmemektedir. Bu sistemlerin önemli avantajları arasında düşük maliyet ve uzun çalışma stabilitesi bulunmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan malzemeler sıvı ve katı fazda bulunabilmektedir. En yaygın olarak kullanılan duyulur ısı depolama malzemesi sudur. Bilindiği üzere su yüksek ısı enerjisi depolama kapasitesine ve kolay ulaşılabilirliğe sahiptir. Ancak su kullanımının korozyon ve sızdırma, yüksek yalıtım maliyeti gibi dezavantajları da bulunmaktadır [35].

Petrol temelli yağlar ve eriyik tuzlar da su yerine kullanılabilen duyulur ısı depolama malzemeleridir [36]. Bu malzemeler aynı zamanda düşük buhar basıncına sahip olduklarından yüksek sıcaklık uygulamalarında da kullanılabilir. Ancak bu malzemelerin maliyeti yüksek olmakla birlikte stabiliteleri de kısıtlıdır.

Ahşap, kaya, beton, kireçtaşı gibi katı malzemeler de duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılabilir [35]. Bilindiği üzere, bu malzemelerin erime ve donma gibi faz değişim özellikleri bulunmamakta ve bu malzemeler hem yüksek hem de düşük sıcaklıklı sistemlerde kullanılabilir. Katı malzemelerin kullanımı, yüksek buhar basıncı ve sızdırma gibi sorunları da ortadan kaldırmaktadır. Ancak bu materyaller yüksek yoğunluğa sahip olduğundan uygulama esnasındaki sorunları açığa çıkarabilmekte ve yüksek maliyete neden olabilmektedir.

3.2. Gizli Isı Depolama

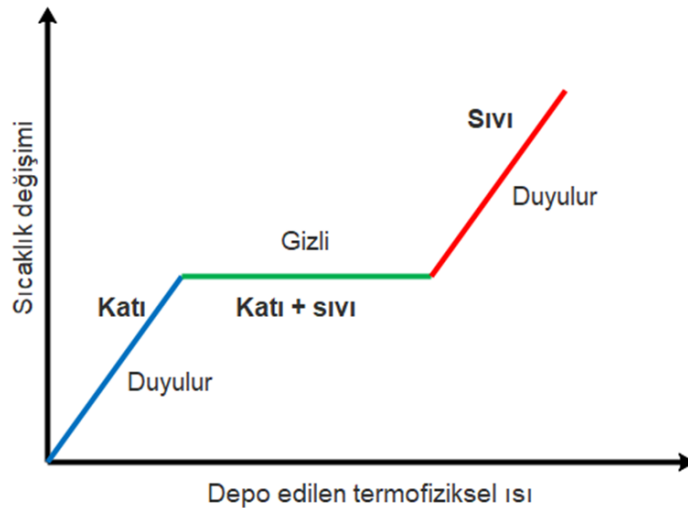
Gizli ısı depolama sistemleri erime gizli ısı temeline dayanmaktadır. Bu sistemlerde genel olarak katı-sıvı faz değişimi kullanılmaktadır. Sıvı fazdaki moleküllerin daha büyük oranda hareket özelliği bulunmakta ve böylelikle daha yüksek enerjiye sahip olmaktadır [35, 37]. Gizli ısı depolama uygulamalarında kullanılan malzemeler faz değiştiren malzemeler olarak bilinmektedir. Faz değiştiren malzemeler, ihtiva ettikleri gizli ısı sayesinde yüksek oranda ısı enerjisi depolayabilmektedir. Faz değiştiren malzemelerin gizli ısı depolama miktarları, sıvı

ve katı fazdaki özgül ısıları, ısı depolama alanının kütlesi, ilk ve erime sıcaklıkları arasındaki fark, son ve erime sıcaklıkları arasındaki fark ve erime ısısı gibi faktörlere bağlıdır [37].

3.2.1. Faz Değiştiren Malzemeler

Faz değiştiren malzemeler gıda ürünlerinin soğutulması, ısı geri kazanım sistemleri, güneş enerjisi santralleri, mikro elektroniklerin ısı olarak korunması ve tekstil endüstrisi gibi farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [35,38,39].

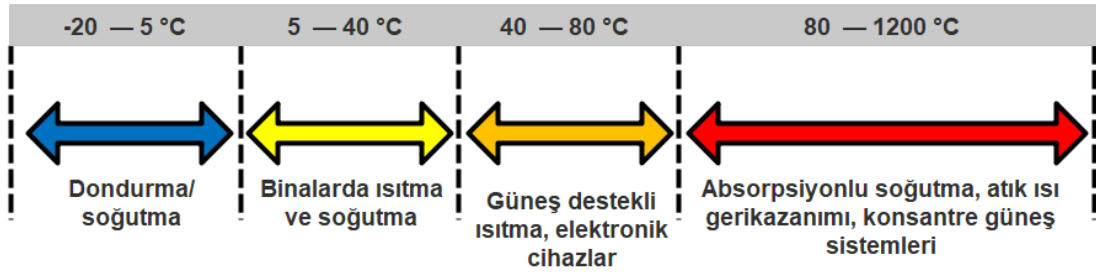
Faz değiştiren malzemeler, ısı enerjinin yutulması, saklanması ve salınımı özelliklerine sahiptir. Erime sırasında malzeme içerisinde ısı enerjisi depolanmakta ve donma sürecinde ise salınmaktadır [40]. Faz değiştiren malzemelerin erime ve donma olayı, malzemenin yerleştirildiği çevrenin sıcaklığı ile alakalıdır. Bulunduğu sıcaklık malzemenin erime sıcaklığından yüksek olduğunda, malzeme içerisindeki kimyasal bağlar ayrılarak endotermik bir reaksiyonla malzeme enerji absorblamaktadır. Bulunduğu sıcaklık erime noktasının altına düştüğünde ise, faz değiştiren malzeme içerisinde bulunan ısıyı egzotermik bir süreç ile salarak katı hale geçmektedir. Şekil 3.2’de faz değiştiren malzemedeki ısı depolama süreci gösterilmektedir [41].



Şekil 3.2. Faz değiştiren malzemelerdeki ısı depolama süreci [41]

Faz değiştiren malzemeler, organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç kısımda incelenmektedir [35]. Ötektik faz değiştiren malzemeler organik-organik, inorganik-inorganik ya da bunların ikili kombinasyonu olabilmektedir. Bu faz değiştiren malzeme türüne ait termofiziksel özellik bilgiler oldukça kısıtlıdır [42].

Literatürdeki bilimsel yayınlar incelendiğinde, parafin mumunun güneş enerjisi sistemlerindeki ısı depolama uygulamalarında en yaygın kullanılan faz değiştiren malzeme tipi olduğu söylenebilir [43]. Parafinin uzun süreli kimyasal stabilite, ticari anlamda uygun maliyetli ve ulaşılabilir oluşu, uyumlu faz değişimi, aşırı soğuma etkilerinin önlenmesi, arzu edilen sıcaklık aralıklarına uygun pek çok alternatifinin olması ve aşındırma (korozif) etkilerinin bulunmaması gibi pek çok avantajı bulunmaktadır [44]. Ancak bu malzemenin düşük ısı iletkenliğe sahip olması bir dezavantaj olarak nitelendirilebilir. Ek olarak, faz değiştiren malzemeler kullanılacakları uygulamadaki sıcaklık aralıklarına göre seçilmelidirler. Şekil 3.3'te faz değiştiren malzemelerin bazı uygulamadaki sıcaklık aralıkları gösterilmektedir [45].



Şekil 3.3. Farklı faz değiştiren malzeme uygulamalarındaki sıcaklık aralıkları [45]

Bu dezavantajın önlenmesi adına ısı enerji depolama ünitelerine nano partiküller eklenebilir [46]. Yüksek ısı iletkenliğe sahip nano partiküllerin eklenmesi ile ısı enerji depolama ünitelerinin ısı iletkenlikleri artırılabilir [47-50]. Algarni ve ark. [51] tarafından yapılan çalışmada, vakumlu güneş kolektörüne nanopartikül katkılı ısı depolama ünitesi yerleştirilmiştir. Bu uygulama ile ısı verim yaklaşık %32 artırılmıştır. Diğer bir çalışmada, Elarem ve ark. [52] kanat modifikasyonlarına sahip vakumlu bir güneş kolektörü tasarlamış ve bakır nanopartikül katkılı ısı enerji depolama ünitesi ile sistem verimini arttırmayı hedeflemişlerdir. Kumar ve Mysamy [53] tarafından gerçekleştirilen araştırma da

bir güneş kolektörüne nanopartikül entegre edilmiş faz değiştiren malzeme uygulaması yapılmıştır. Alshukri ve ark. [54] ısı borulu güneş kolektöründe farklı nano partikül katkılı ısı enerji üniteleri eklemiş ve deneysel olarak incelemiştir. Alüminyum oksit [55], Silisyum dioksit [56] ve Grafen oksit [57] gibi farklı nanopartiküllerin güneş destekli su arıtma sistemlerindeki ısı enerji depolama ünitelerinde kullanıldığı bazı çalışmalar da literatürde mevcuttur.

3.3. Termokimyasal Isı Depolama

Termokimyasal ısı depolama, kimyasal bileşenlerin kimyasal bağlarının ayrılması ya da form değiştirmesi ile ısı enerjisini absorblanması ya da salınımı olayıdır. Bu yöntemde, kimyasal bileşenlerdeki tersinir reaksiyonlardan faydalanılmaktadır. Bu uygulamalardaki en büyük avantaj ihmal edilebilecek seviyedeki kayıplardır. Ancak bu yöntem, çevresel zararları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmemektedir [35].

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tez çalışmasının bu kısmında, PVT kollektörler, sera kurutucular ve güneş destekli su arıtıcılar ile ilgili yakın zamanda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Ek olarak, bu sistemlerin performanslarının artırılmasının amaçlandığı modifikasyonlar ve ısı enerjisi depolama ünitelerinin bu sistemlerde nasıl kullanıldığı araştırılarak sunulmuştur. Tez çalışmasının devam eden bölümlerindeki tasarım ve test yöntemleri literatür araştırması sonucunda elde edilen bilgiler ışığında planlanmış ve uygulanmıştır.

Fotovoltaik termal (PVT) sistemler elektriksel ve ısı enerjisinin eş zamanlı olarak üretilebildiği teknolojilerdir. Bu kollektörlerin performanslarının artırılması için ısı enerjisi depolama sistemlerinin entegrasyonu son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Böylelikle hem fotovoltaik panelin ısı anlamında yönetimi sağlanmakta ve buna bağlı olarak elektriksel performansı artırılmakta, hem de ısı enerjisinin depolanarak daha uzun süre kullanımı mümkün olmaktadır. Literatürde PVT kollektörlere faz değiştiren malzeme entegrasyonunun incelendiği pek çok çalışma mevcuttur. Fu ve ark. [58] tarafından yapılan çalışmada kapsüle edilmiş faz değiştiren malzemeler PVT sistemine entegre edilmiştir. Bu modifikasyon ile ısı ve elektriksel verimler sırasıyla %13,5 ve %0,8 artırılmıştır. Ahmadi ve ark. [59] doğal ve zorlanmış taşınım ile çalışan ve faz değiştiren kompozit ile modifiye edilmiş PVT kollektörleri analiz etmiştir. Isı enerjisi depolama sistemi kullanılarak elektriksel verim %14 artırılmıştır. Diğer bir çalışmada, Kazemian ve ark. [60] farklı PVT kollektörleri test etmiştir. Su, su-etilen glikol karışımı ve saf etilen glikol çalışma akışkanları olarak seçilmiştir. Ek olarak, PVT kollektörlere ısı enerjisi depolama üniteleri eklenmiştir. Sonuçlara göre, faz değiştiren malzeme kullanımı verimi önemli derecede arttırmıştır. Al Imam ve ark. [61] faz değiştiren malzemeler ile modifiye edilmiş konsantre bir PVT kollektörü analiz etmiştir. Hibrit kollektörün toplam verimi %46-63 arasında bulunmuştur. Tariq ve ark. [62] farklı çevresel koşullar altında hibrit bir kollektör sistemini ısı enerjisi depolama elemanı ile modifiye etmiş ve ısı verimi %13-17 aralığında bulmuştur. Nizetic ve ark. [63] fotovoltaik panel sıcaklığının kontrol edilebilmesi için faz değiştiren malzeme modifikasyonları yapmışlardır. Faz değiştiren malzeme eklenmesi elektriksel verimi %10'dan %20'ye, ısı verimi ise %30'da %70'e yükseltmiştir. Gaur ve ark. [64] faz

değiştiren malzeme destekli PVT kollektör sistemin sayısal olarak analiz etmiştir. Enerji ve ekserji analizlerinin yapıldığı çalışmada sistemin karakteristik eğrileri belirlenmiştir.

Literatürde PVT kollektörlerde nanopartikül katkılı ısı enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı bazı çalışmalar mevcuttur. Al-Waeli ve ark. [65] tarafından yapılan çalışmada silika nanopartikülleri faz değiştiren malzemeye eklenmiş ve PVT kollektörün verimini arttırmak için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara göre elektriksel ve ısı verim değerleri sırasıyla %14 ve %72 olarak hesaplanmıştır. Literatürde silika nanopartiküllerin su dolaşımli PVT kollektörlerde kullanıldığı farklı çalışmalar da bulunmaktadır [66,67]. Farklı bir araştırmada, Kazemian ve ark. [68] alümina nanoparçacıkları ısı enerji depolama sistemine entegre etmiştir. Su dolaşımli PVT kollektörün tasarlandığı ve imal edildiği sistem, deneysel olarak analiz edilmiştir. Çinko oksit ve bakır oksit nanopartiküller de PVT kollektörlere entegre edilmiş gizli ısı depolama ünitelerinde kullanılmıştır [69,70]. Ancak bu çalışmalar su dolaşımli PVT kollektörleri içermektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, nanopartikül katkılı gizli ısı depolama sistemlerinin hava dolaşımli PVT kollektörlerde kullanıldığı çalışmalardaki eksiklik belirlenmiş ve bu bağlamda tez çalışmasındaki PVT kollektör hava akışkanlı olacak şekilde tasarlanmıştır.

Sera kurutma sistemleri direkt kurutma teknolojileri içerisinde değerlendirilmekle birlikte, son yıllarda bu sistemlerin performansının artırılması için çeşitli akademik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar genel olarak yutucu yüzey ve geçirgen örtü modifikasyonlarını, sisteme yardımcı bir ısıtma elemanı eklenmesini, güneş enerjisi ile birlikte farklı enerji kaynaklarının birlikte kullanıldığı modifikasyonları ve çeşitli kuzey duvarı tasarımlarını içermektedir [71]. Chauhan ve ark. [72] fotovoltaiik panellerle desteklenmiş pilot ölçekli bir sera kurutucuyu araştırmıştır. Sistem performansının artırılması için delikli bakır plaka kullanılmıştır. Khanlari ve ark. [73], sera kurutucunun performansının artırılması için düşük maliyetli boru tipi güneş destekli bir kollektörü yardımcı ısıtıcı olarak kullanmıştır. Kollektörün sisteme entegre edilmesiyle sıcaklık değerleri önemli ölçüde artırılmış ve kurutma süresi kısaltılmıştır. Tuncer ve ark. [74] tarafından yapılan araştırmada ise, dört geçişli güneş destekli bir hava ısıtıcı imal edilerek sera

kurutma sistemine entegre edilmiştir. Özgül nem çekme oranı değerli modifiye edilmiş ve konvansiyonel sistem için sırasıyla 0,23-0,36 ve 0,21-0,25 kg/kWh aralığında hesaplanmıştır. Chauhan ve Kumar [75] tarafından yapılan çalışmada, kuzey duvarı ısı olarak yalıtılmış bir sera kurutucu doğal ve zorlanmış taşınım koşulları altında denenmiştir. Sera kurutucunun kullanılması, güneşte açık olarak kurutma yöntemine kıyasla nem içeriği değerini %34-41 oranında azaltmıştır.

Isıl enerji depolama sistemlerinin seralarda ve sera kurutucularda uygulanması son yıllarda popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir [76]. Ayyappan ve Mayilamy [77], kaya dolgulu bir duyulur ısı depolama ünitesi tasarlamış ve sera kurutucu sistemine entegre etmiştir. Deneysel sonuçlara göre ısı depolama ünitesinin kullanımı kurutucu verimini %2-3 oranında arttırmıştır. Aumporn ve ark. [78] tarafından yapılan sayısal çalışmada, faz değiştiren malzemelerin sera kurutma sistemine entegrasyonu incelenmiştir. Çalışmada parafin mumu faz değiştiren malzeme olarak kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, verim değeri konvansiyonel ve modifiye edilmiş sera kurutucu için sırasıyla %8-28 ve %12-38 aralıklarında bulunmuştur. Ayyapan ve ark. [79] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, farklı duyulur ısı depolama ünitelerinin sera kurutma sisteminin performansına etkileri incelenmiştir. Kum, kaya ve beton bazlı depolama modifikasyonları kurutma süresini güneşte kurutma yöntemine göre sırasıyla 66, 53 ve 174 saat kısaltmıştır. Pankaew ve ark. [80] modüler ısı depolama üniteleri tasarlamış ve sera kurutma sistemine entegre etmiştir. Diğer bir çalışmada, Berroug ve ark. [81] kuzey duvarına faz değiştiren malzeme yerleştirilen sera sistemini sayısal olarak incelemiştir. Sera kurutucuları içeren literatür taraması dikkate alındığında, geliştirilen faz değiştiren malzeme temelli ısı depolama ünitelerinde nanopartiküllerin kullanılmadığı göze çarpmaktadır.

Güneş enerjisi ile temiz su elde edilmesi, sürdürülebilir gelecek için oldukça önemli bir konudur. Bu bağlamda, tasarlanan ve işletilen sistemlerin yüksek verime sahip olması, enerjinin etkin kullanımı ve elde edilecek temiz su miktarının artması anlamında dikkat edilmesi gereken bir husustur. Bilimsel literatür incelendiğinde, güneş destekli su arıtma sistemlerinin taban materyali modifikasyonu ve farklı yardımcı ısıtıcılar eklenmesi gibi farklı iyileştirme teknikleri uygulanarak analiz edildiği çalışmalar görülebilir [82]. Hassan [83] tarafından yapılan çalışmada, güneş

destekli su arıtma sistemlerine parabolik oluk tipi kollektör eklenmiş ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Tek eğimli ve çift eğimli güneş destekli su arıtıcılar deneysel çalışmada kullanılmıştır. Sonuçlara göre, çift eğimli ve parabolik kollektör ile desteklenmiş arıtıcı sistemi ortalama %49,09 verim ile en iyi performansı göstermiştir. Alwan ve ark. [84] tarafından yapılan çalışmada, güneş destekli su arıtma sisteminin performansının artırılması amacıyla su dolaşımını bir güneş kollektörü ile birleştirilmiştir. Sonuçlara göre yardımcı ısıtma elemanının kullanılması temiz su üretkenliğini büyük ölçüde arttırmıştır. Raj Kamal ve ark. [85] tarafından yapılan araştırmada ise güneş destekli su arıtıcı bir elektrikli ısıtma sistemi ile desteklenmiştir. Isıtıcı kullanımı ile su sıcaklığı yaklaşık %15 arttırılmıştır. Ek olarak, günlük üretkenlik değeri $5,78 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{gün}$ seviyesinden $6,72 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{gün}$ 'e yükseltilmiştir. Abdullah ve ark. [55] farklı fotovoltaik panel ile çalıştırılan ısıtıcı sistemlerini ve oluklu yutucu yüzey geometrilerini güneş destekli su arıtma sisteminin performansını arttırmak için kullanmıştır. Yapılan modifikasyonlar ile üretkenlik değeri önemi ölçüde arttırılmıştır.

Nanopartiküller, güneş destekli arıtıcıların performansının artırılması için ısı enerjisi depolama sistemlerinde kullanılabilir. Konu ile ilgili literatürde pek çok araştırma bulunmaktadır. Elbar ve Hassan [86] fotovoltaik modül ve faz değiştiren malzemeler ile desteklenmiş güneş destekli su arıtma sistemini analiz etmiştir. Günlük üretkenlik değeri faz değiştiren malzemeler kullanılarak %19,4 arttırılmıştır. Tabrizi ve ark. [87] tarafından yapılan deneysel çalışmada kaskad tip güneş destekli su arıtıcı sistemini gizli ısı enerjisi depolama ünitesi ile geliştirmiştir. Deneyler güneşli ve kısmen güneşli hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre faz değiştiren malzeme destekli sistemin yüksek verim değerine sahip olması özelliğinden kısmen güneşli bölgeler için uygun olduğu belirtilmiştir. Benhammou ve Sahli [88], geliştirdiği güneş enerjisi destekli su arıtıcıya gizli ısı depolama ünitesi yerleştirmiştir. Geliştirilen sistem konvansiyonel arıtıcı ile karşılaştırılmıştır. Vigneswaran ve ark. [89] tarafından yapılan çalışmada da faz değiştiren malzemeler kullanılmış, ekserji verimi değeri %3,23-3,92 aralığında hesaplanmıştır. Abdelaziz ve ark. [90] tasarladıkları boru tipi güneş destekli su arıtma sistemini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada boru tipi arıtıcılar nanopartikül katkılı ısı enerjisi depolama ünitesi ve oluklu taban plakası ile modifiye edilmiştir. Ekonomik analiz sonuçlarına göre bahsedilen modifikasyonlar kullanılarak arıtıcı maliyeti %22

azaltılabilmektedir. Diğer bir çalışmada, Yang ve ark. [91] güneş destekli su arıtma sistemini bakır oksit ve çinko oksit nanoparçacıkları ısı enerjisi depolama ünitesine entegre ederek arttırmışlardır. Depolama ünitesi içerisindeki faz değıştiren malzemenin ısı iletkenliği nanopartikül katkısı ile %6-13 arasında arttırılmıştır. Benoudina ve ark. [92] tarafından yapılan çalışmada ise mikro ve nano boyuttaki alüminyum oksit parçacıklar güneş destekli su arıtıcılara eklenmiştir. Farklı nanopartikül konsantrasyonlarının verime etkisinin incelendiği çalışmada, günlük üretkenlik nanopartikül katkısı ile önemli oranda arttırılmıştır. Kandeal ve ark. [93] çift eğimli bir güneş destekli su arıtıcı tasarlamış ve sistemde nanoakışkanlar, nanopartikül katkılı ısı enerjisi depolama ünitesi ve bakır kırıntıları kullanmıştır. Bahsi geçen geliştirme yöntemleri ile temiz su üretim maliyeti %35 azaltılmıştır. Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, nanoparçacıkların hem yüzey kaplama malzemesi hem de ısı enerjisi depolama ünitesinde kombine olarak kullanıldığı çalışmaların olmadığı tespit edilmiş olup, bu tez çalışmasında geliştirilen güneş destekli su arıtma sistemleri bu eksiklik göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.

5. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu bölümde parafin temelli ve nanopartikül katkılı parafin temelli gizli ısı depolama ünitelerinin imalatı, üç farklı güneş destekli sisteme ait deney düzeneklerinin tasarımı ve üretimi, kullanılan cihaz ve ölçüm aletlerinin özellikleri ve deney prosedürleri detaylı olarak sunulmuştur.

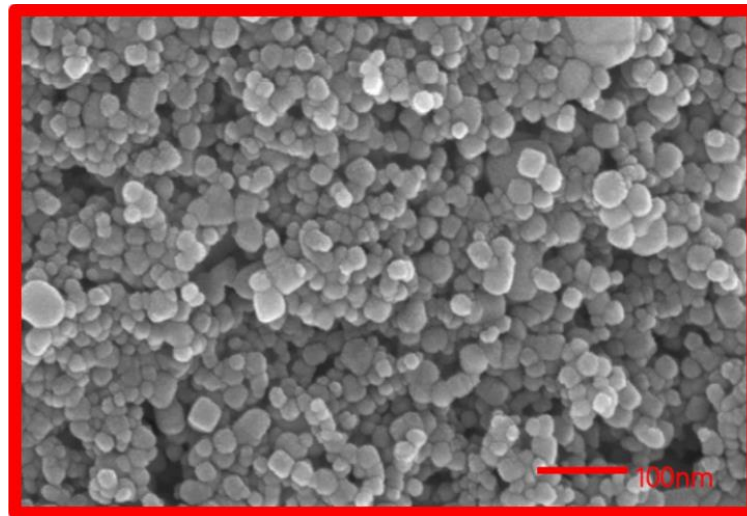
5.1. Deney Düzenekleri

5.1.1. Nanopartikül Katkılı Gizli Isı Depolama Ünitelerinin ve Yutucu Yüzey Kaplama Boyasının Hazırlanması

Bu çalışmada, üç farklı güneş destekli sistemde kullanılmak üzere ısı enerjisi depolama üniteleri tasarlanmış ve imal edilmiştir. Öncelikle faz değiştiren malzemelerin yerleştirildiği alüminyum kasalar tasarlanmıştır. PVT kolektörler için 2 adet 62x59x2,5 cm ölçülerinde, sera kurutucular için 2 adet 87x30x2,5 cm ölçülerinde ve güneş destekli su arıtıcılar için 2 adet 45x35x2,5 cm ölçülerinde alüminyum tekne üretilmiştir. İmalatta 0,1 cm kalınlığında alüminyum sac kullanılmıştır. Köşelerin sızdırmazlığı epoksi yapıştırıcı ve sıvı conta yardımıyla sağlanmıştır. Faz değiştiren malzeme olarak parafin seçilmiştir. Bilindiği üzere parafinler organik faz değiştiren malzemeler kapsamında değerlendirilmektedir [35]. Parafin düşük erime noktasına sahip olduğundan düşük sıcaklıklı güneş enerjili sistemlerde kullanılabilir. Ancak, parafinin düşük ısı iletkenliğe sahip olması, yeterli ısı transferinin sağlanabilmesi için daha büyük ısı transferi yüzey alanına ihtiyaç duyulmaktadır [35, 94, 95]. Bu tez çalışmasında tasarlanan depolama üniteleri de büyük ısı transferi yüzey alanına sahiptir. Güneş destekli su artıma sistemleri ve sera kurutucuların taban alanının tamamına yakını kaplayan ısı enerjisi depolama üniteleri, PVT kolektörlerde ise PV panelin altındaki alanın büyük bir kısmını kaplayacak şekilde tasarlanmıştır. PVT kolektörde panelin altının tamamen kaplanmasının nedeni ise bağlantı kutusunun zarar görmesini engellemektir. Her üç sistemin geometrilerine ait detaylı açıklamalar, tezin deney düzeneklerini içeren bölümünde verilmiştir.

Isı depolama üniteleri, her bir güneş enerjisi destekli sistem için iki adet üretilmiştir. İlk ısı depolama ünitesi yalnızca parafin içermektedir. Bu ısı depolama

ünitesinin hazırlanması için parafin malzemesi 60 °C sabit sıcaklıkta bir ısıtıcı yardımıyla eritilmiş ve hazırlanan alüminyum tekelere dikkatli bir biçimde aktarılmıştır. Tasarlanan diğer ısı enerji depolama ünitelerine ise nanopartiküller entegre edilmiştir. Bu amaçla bakır oksit (CuO) nanopartiküller kullanılmıştır. Nanopartikül katkılı faz değıştiren malzeme hazırlama sürecinde iki adım yöntemi kullanılmıştır [67, 96]. Nanopartiküllerin entegre edildiği sistem için ilk aşamada, parafin mum eritilmiş ve nanopartiküller erimiş olan faz değıştiren malzemeye eklenmiştir. Nanopartiküller kütlece %1 oranında kullanılmıştır. Sonrasında karışım MTOPS marka MS3040 model mekanik karıştırıcı kullanılarak ısı kaynağı üzerinde 500 rpm hızda 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Homojen bir karışım elde edilebilmesi için nanopartikül katkılı parafine bu işlemden sonra 3 saat boyunca ultrasonik karıştırma işlemi uygulanmıştır. Kullanılan ultrasonik banyo ALEX Machine marka AXUY-02 modeldir. Tüm bu bahsedilen işlemler 60 °C’de ve sıvı fazda yapılmıştır. Sonrasında elde edilen karışım alüminyum tekelere aktarılmıştır. Ek olarak, üretici tarafından belirtilen hacimce genişleme oranları göz önünde bulundurularak alüminyum tekelere %85’i faz değıştiren malzemeler ile doldurulmuştur. Bu sayede sızıntıların önlenmesi sağlanmıştır. Bütün hazırlama prosesleri literatürdeki benzer çalışmalar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir [97-100]. Kullanılan nanopartiküllere ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü Şekil 5.1’de verilmiştir. Ek olarak kullanılan nanopartiküller ve parafine ait özellikler sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Kullanılan nanopartiküllere ait SEM görüntüsü

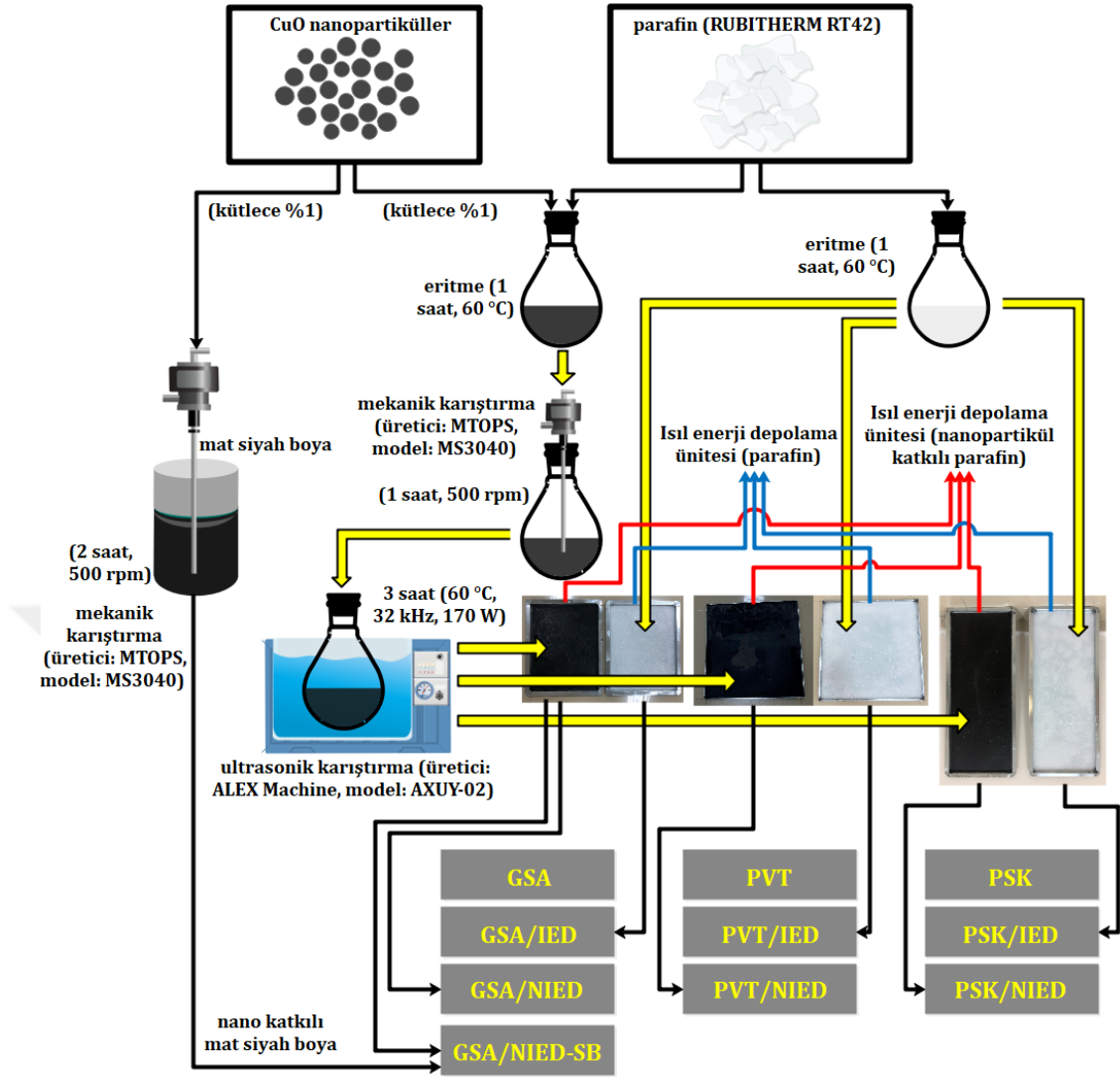
Tablo 5.1. Kullanılan bakır oksit nanopartiküllerin özellikleri

Özellik	Değer
Üretici	Nanografi Nano Teknoloji
Safılık	%99,5
Ortalama parçacık boyutu	<77 nm
Morfoloji	Küresel
Görünüm	Siyah toz
Özgül yüzey alanı	>20 m ² /g
Hacimsel yoğunluk	0,8 g/cm ³
Gerçek yoğunluk	6,5 g/cm ³

Tablo 5.2. Kullanılan parafin mumunun özellikleri

Özellik	Değer
Üretici	RUBITHERM
Model	RT42
Isı depolama kapasitesi	165 kJ/kg
Özgül ısı kapasite	2 kJ/kg.K
Yoğunluk	0,88 kg/l (katı), 0,76 kg/l (sıvı)
Isıl iletkenlik	0,2 W/m.K (tüm fazlar için)

Tez çalışmasının güneş destekli su arıtıcılarında olan kısmında nanoparçacıklar yutucu yüzey kaplama malzemesine de entegre edilmiştir. Bu bağlamda, ısı depolama ünitelerinde kullanılan aynı tip nanopartiküller endüstriyel mat siyah boya ile karıştırılarak iki saat boyunca mekanik karıştırılmıştır. Karıştırma işleminden sonra yutucu yüzeylere uygulanmıştır. Şekil 5.2’de ısı depolama üniteleri ve nanopartikül katkılı yüzey kaplama boyası hazırlanmasına ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 5.2. Nanopartikül katkıli modifikasyonların hazırlanma adımları

5.1.2. Hibrit Fotovoltaik-Termal Kollektör Deney Düzenegi

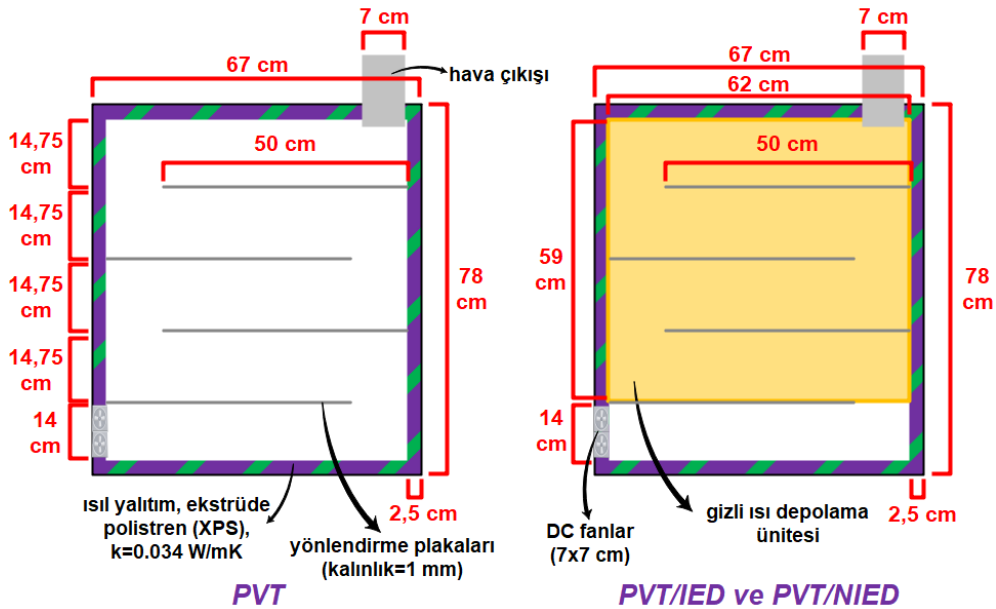
Çalışmanın hibrit fotovoltaik-termal sistemleri (PVT) içeren kısmında üç farklı kollektör tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bunun için 85 W gücünde üç fotovoltaik panel kullanılmıştır. Fotovoltaik panellerin özellikleri Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Üretilen ilk kollektör (PVT) bir kontrol grubu olarak üretilmiş olup içerisinde sadece yönlendirici plakalar barındırmaktadır. İkinci kollektör ise (PVT/IED) parafin bazlı ısı enerji depolama ünitesi içermektedir. Üçüncü kollektörde (PVT/NIED) nanopartikül katkıli ısı enerji depolama ünitesi kullanılmıştır. PVT kollektörlerin ölçüleri Şekil 5.3'te gösterilmektedir. İlk PVT kollektör 9,5 cm derinliğinde hava kanalına sahiptir. Diğer iki PVT kollektör ise (PVT/IED ve

PVT/NIED) 7 cm'lik hava kanalı içermektedir. Bunun nedeni ise 2,5 cm'lik kısmın ısı depolama ünitesinin kaplamasıdır. Diğer bir ifade ile gizli ısı depolama üniteleri fotovoltaik panel çerçevesine tam olarak denk gelecek şekilde imal edilmiştir. Depolama ünitesinin ölçüleri 62x50x2,5 cm'dir. Depolama üniteleri fotovoltaik panelin arka kısmına sabitlenmiştir. Depolama ünitelerinin sızdırmazlığı epoksi yapıştırıcı ve sıvı conta yardımıyla sağlanmıştır. Yönlendirme plakaları ve ısı depolama ünitesini oluşturan tekneler 0,1 cm kalınlığında alüminyum sacdan imal edilmiştir.

Tablo 5.3. Kullanılan fotovoltaik panellerin özellikleri

Özellik	Değer
Marka	Lexron
Model	LXR-85P
Ölçüler	67x78x2,5 cm
Ağırlık	7 kg
Hücre sayısı	36
Açık Devre Voltajı (V_{oc})	2,10 V
Maksimum Voltaj (V_{max})	18,00 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	4,86 A
Maksimum Akım (I_{max})	4,44 A

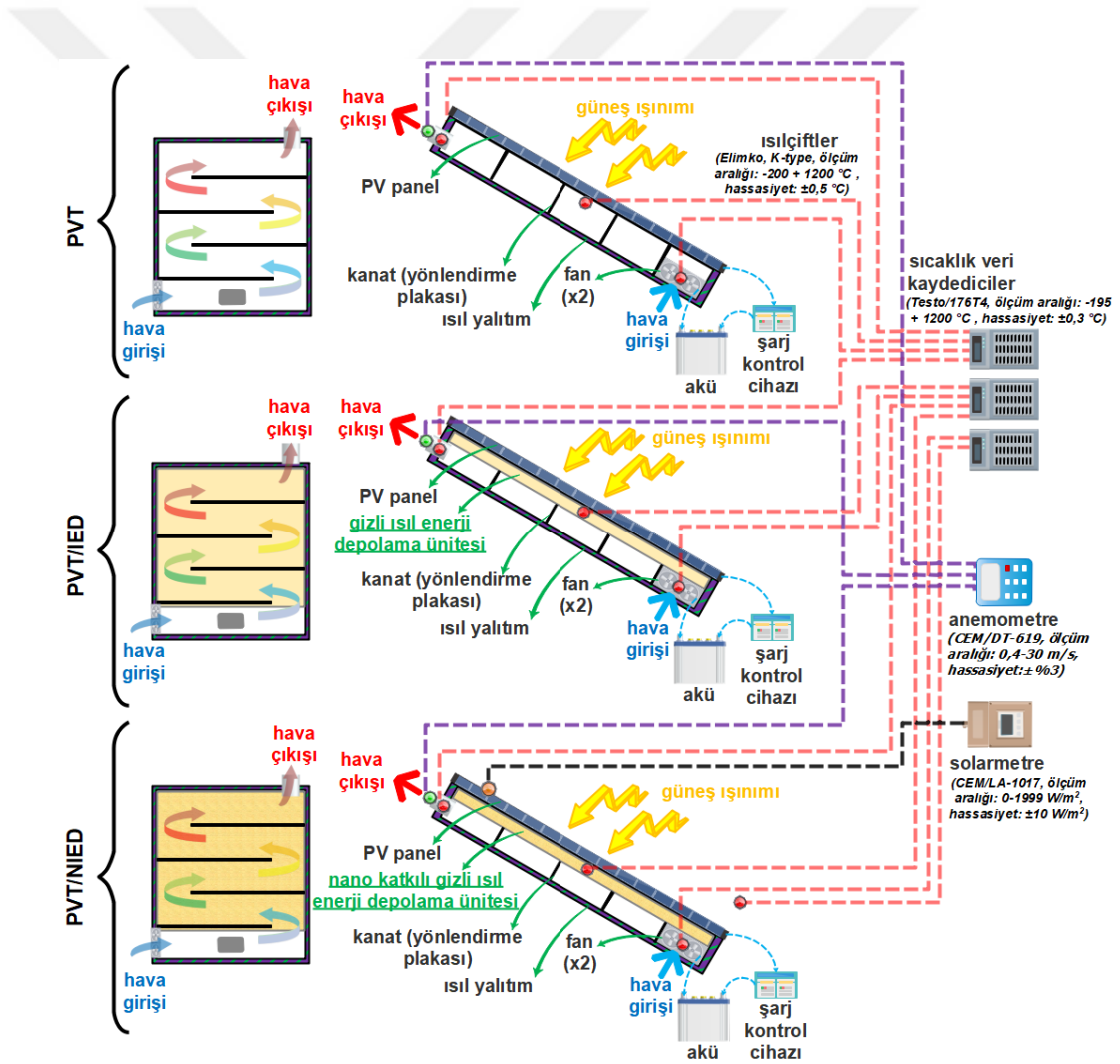


Şekil 5.3. Geliştirilen PVT kolektörlerin ölçüleri

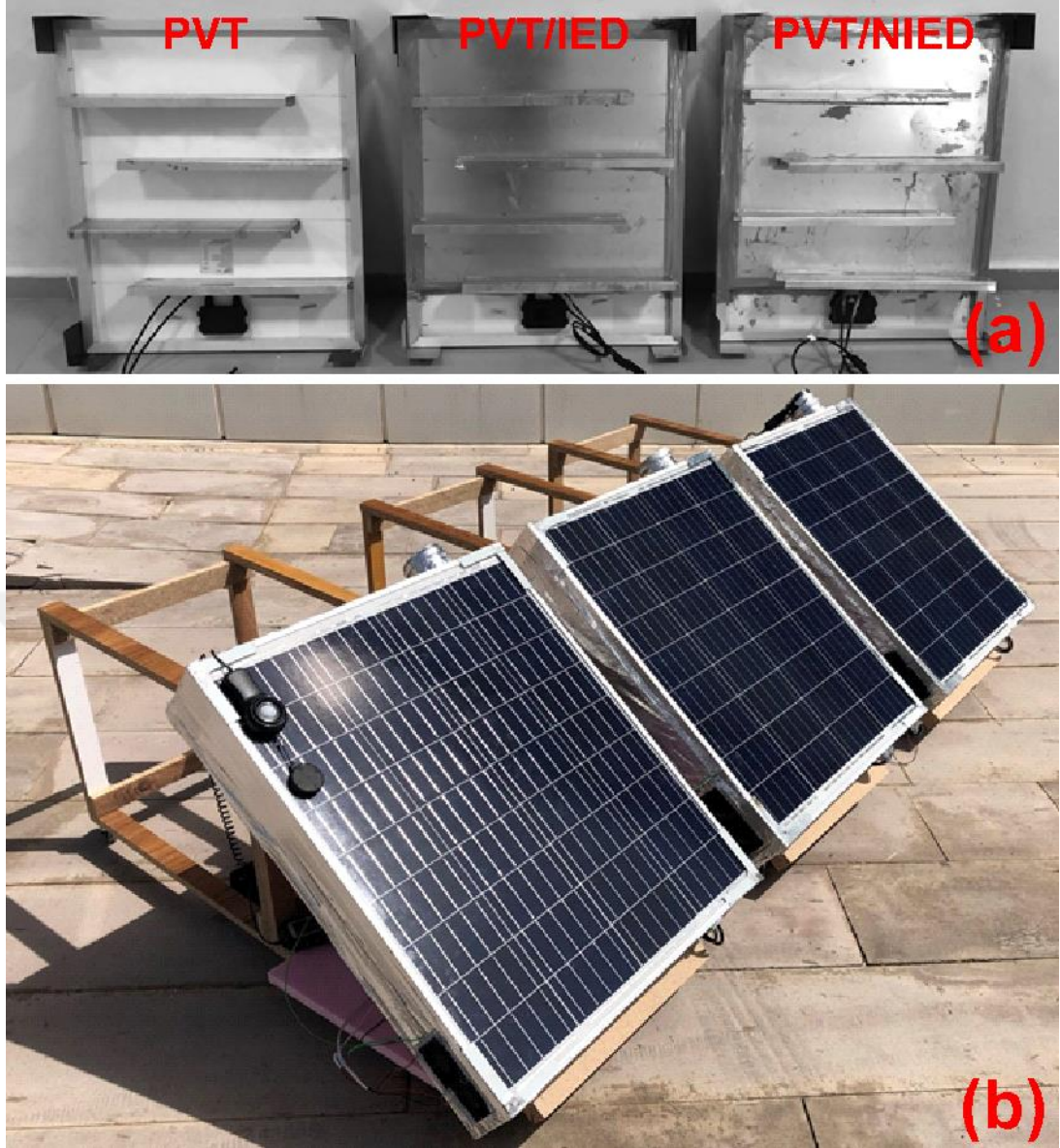
Bilindiği üzere hibrit PVT kolektörler hem ısı hem de elektrik enerjiyi aynı zamanda üretebilmektedir. Tez çalışmasının bu kısmında zorlanmış taşınım ile

çalışan PVT kollektörler geliştirilmiştir. Bu bağlamda hava akımı fanlar yardımıyla sağlanmıştır. Her bir kollektörde 7x7 cm ölçülerinde iki adet 12 V doğru akım (DC) fan kullanılmıştır. Ek olarak her bir PVT sistemi için bir şarj kontrol cihazı (marka: PWM, maksimum 10 A) ve bir batarya/kuru pil (marka: ttec, model: Base JP12, 7A, 12 V) kullanılmıştır.

Deneyel çalışmadaki ana amaçlardan birisi de tasarlanan PVT kollektörlerin aynı iklim koşulları altında denenmesidir. Bu kapsamda, aynı ölçülere sahip üç ahşap platform üretilmiştir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Ek olarak Şekil 5.5'te PVT kollektörlerin içyapısı ve deney düzeneğine ait birer görsel mevcuttur.



Şekil 5.4. PVT kollektör deney düzeneğinin şematik gösterimi

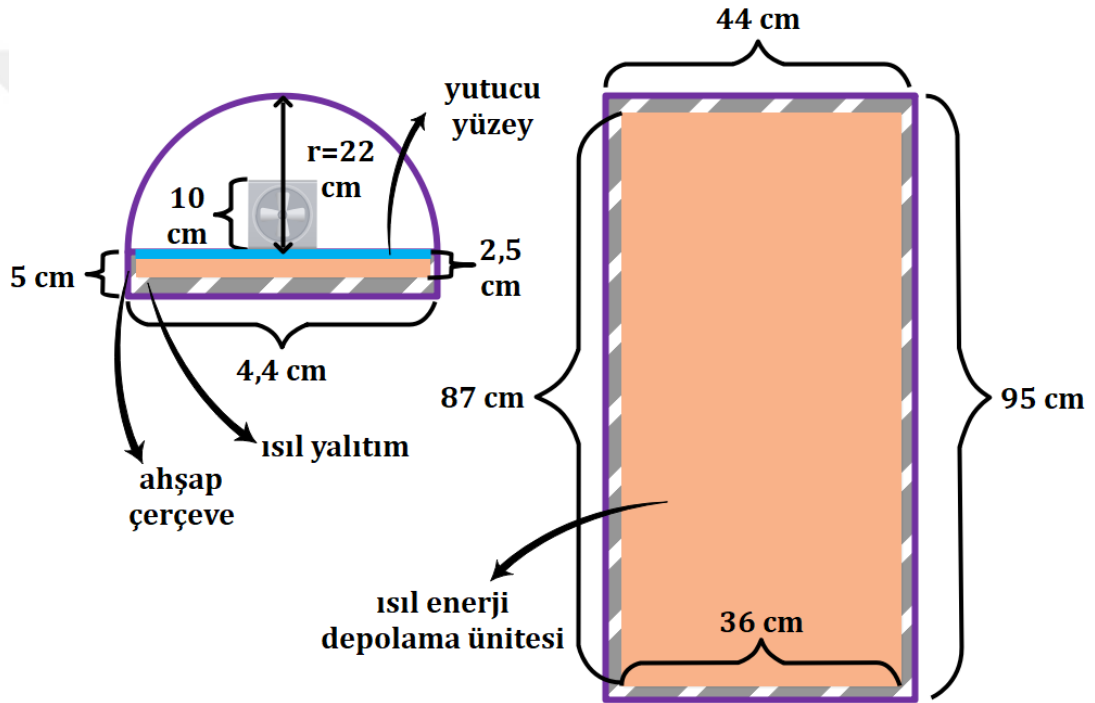


Şekil 5.5. (a) PVT kolektörlerin içyapısı, (b) deney düzeneği fotoğrafı

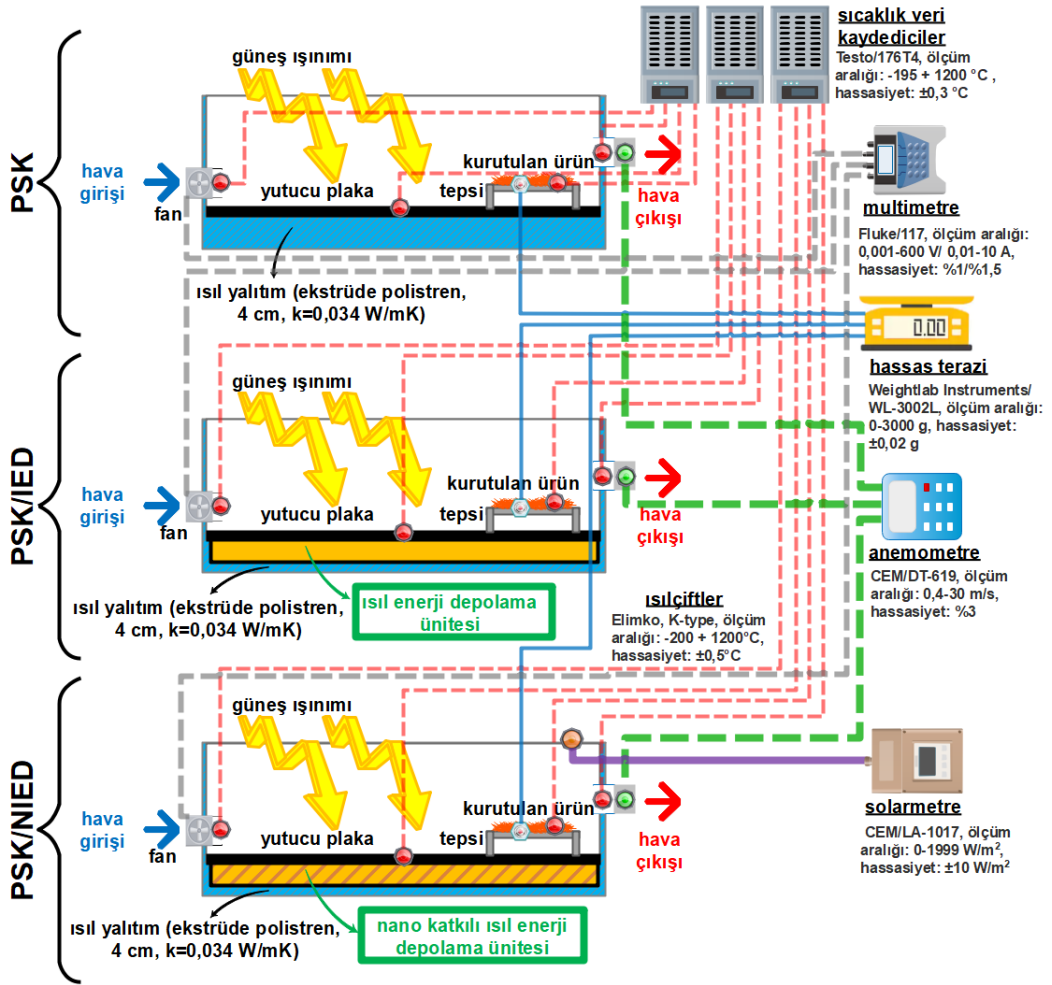
5.1.3. Sera Kurutucu Deney Düzeneği

Sera kurutucular da PVT kolektörlere benzer nitelikte üç adet üretilmiş ve aynı iklimsel koşullarda testleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, ilk parabolik sera kurutucu (PSK) konvansiyonel nitelikte olup, taban kısmında mat siyaha boyalı alüminyum sacdan imal edilmiş bir yutucu yüzey bulundurmaktadır. İkinci PSK (PSK/IED) parafin temelli bir ısı depolama ünitesine sahiptir. Üçüncü PSK ise (PSK/NIED) nanopartikül katkılı depolama ünitesi içermektedir. Isıl olarak yalıtılmış ahşap çerçeveler ısı depolama ünitelerinin ve taban plakalarının yerleştirilmesi için üretilmiştir. Sera kurutucuların çerçeveleri ahşaptan, kavisli (parabolik) bileşenleri ise sac metalden imal edilmiştir. Geçirgen örtü olarak %91

transmisivite (geçirgenlik) değerine sahip polietilen sera örtüsü kullanılmıştır. Bunun yanında, sera kurutucuların kuzey duvarları da 5 cm kalınlığında ısı yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Sera kurutucularında kullanılan ısı yalıtım malzemelerinin tümü ekstrüde polistren (XPS) olup, ısı iletkenlik değeri 0,034 W/m.K'dir. Her bir sera kurutucuya alternatif akım ile çalışan (AC) 50 W gücündeki fanlar ve hava hızının ayarlanabilmesi için uygun fan regülatörleri yerleştirilmiştir. Parabolik sera kurutucuların ölçüleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Ek olarak test düzeneğinin şematik gösterimi ve fotoğrafı sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Parabolik sera kurutucuların ölçüleri



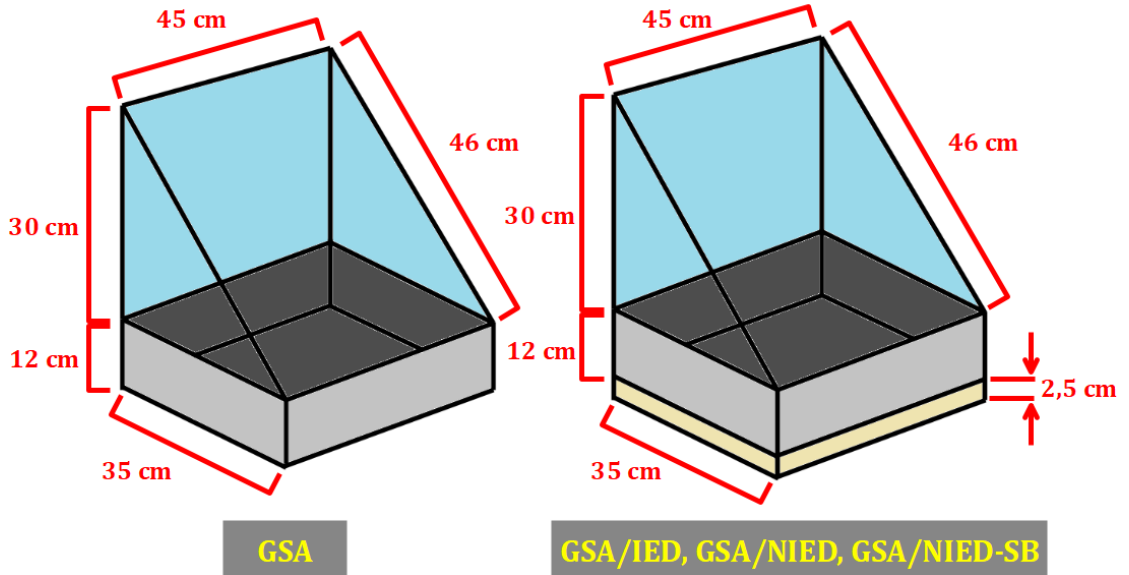
Şekil 5.7. Sera kurutucu deney düzeneğinin şematik gösterimi



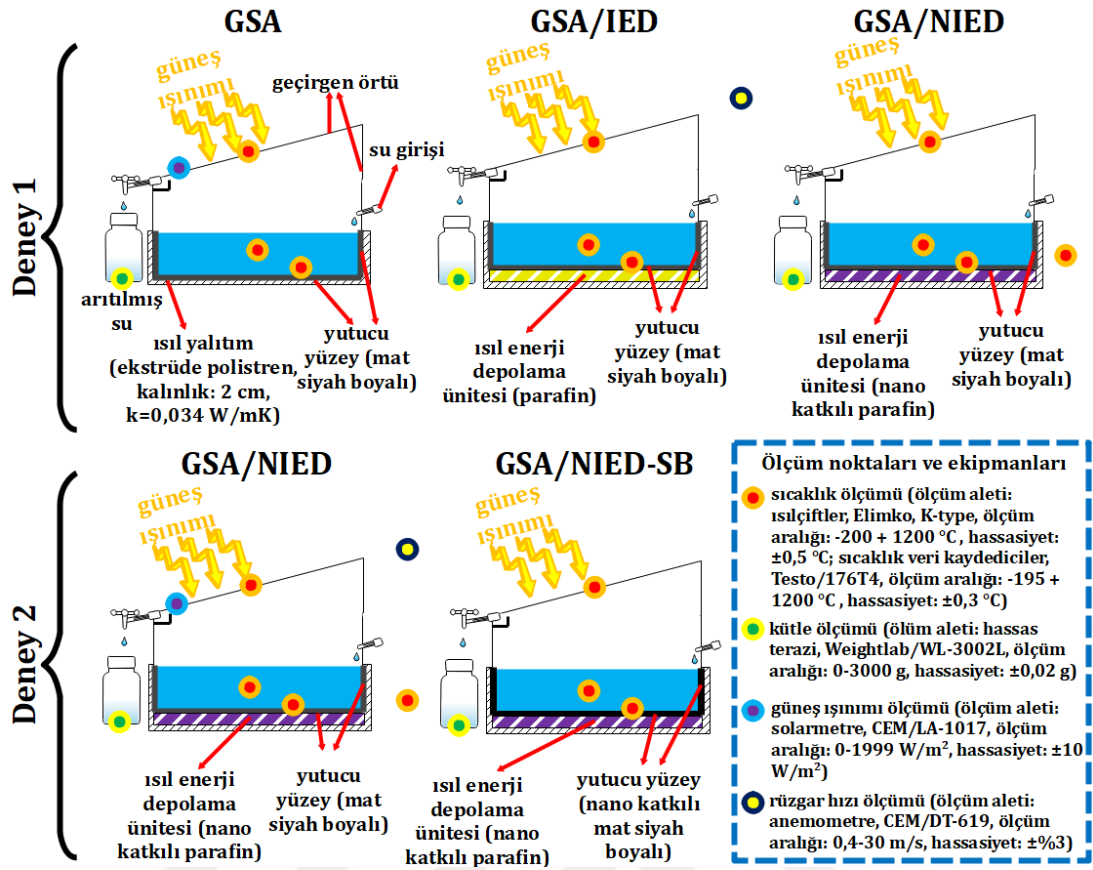
Şekil 5.8. Parabolik sera kurutucuların ölçüleri

5.1.4. Güneş Destekli Su Arıtma Sistemi Deney Düzeneği

Diğer iki güneş destekli sistemden farklı olarak, bu tez çalışmasının güneş destekli su arıtma sistemlerini içeren kısmında nanopartiküller hem ısı depolama ünitesinde hem de yutucu yüzey kaplaması olan mat siyah boya içerisinde kullanılmıştır. Bu bağlamda dört farklı tek-eğimli güneş destekli su arıtıcısı tasarlanmış ve imal edilmiştir. İlk güneş destekli su arıtıcısı (GSA) konvansiyonel niteliktedir. Diğer bir ifade ile bir ısı depolama ünitesi içermemekte ve yutucu plaka kaplaması olarak mat siyah boya kullanılmıştır. İkinci güneş destekli su arıtıcısı (GSA/IED) ise taban kısmında parafin temelli ısı depolama ünitesi içermektedir. Üçüncü sistemde (GSA/NIED) ısı depolama ünitesine nanopartiküller entegre edilmiştir. Dördüncü sistemde (GSA/NIED-SB) hem mat siyah boyaya hem de ısı depolama ünitesine nanopartiküller eklenmiştir. İmal edilen tüm su arıtıcılarında geçirgen örtü olarak 4 mm kalınlığında ve %92 geçirgenliğinde cam kullanılmıştır. Güneş destekli su arıtma sistemlerinin iskeletleri ise 0,1 cm kalınlığında sac metalden imal edilmiş olup yutucu yüzeyleri ise yine aynı kalınlıkta alüminyum sacdan üretilmiştir. İmal edilen arıtıcıların ölçüleri, deney düzeneğinin şematik gösterimi ve deney düzeneğine ait fotoğraf sırasıyla Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.9. İmal edilen arıtıcıların ölçüleri



Şekil 5.10. Güneş destekli su arıtıcı deney düzeneği şematik gösterimi

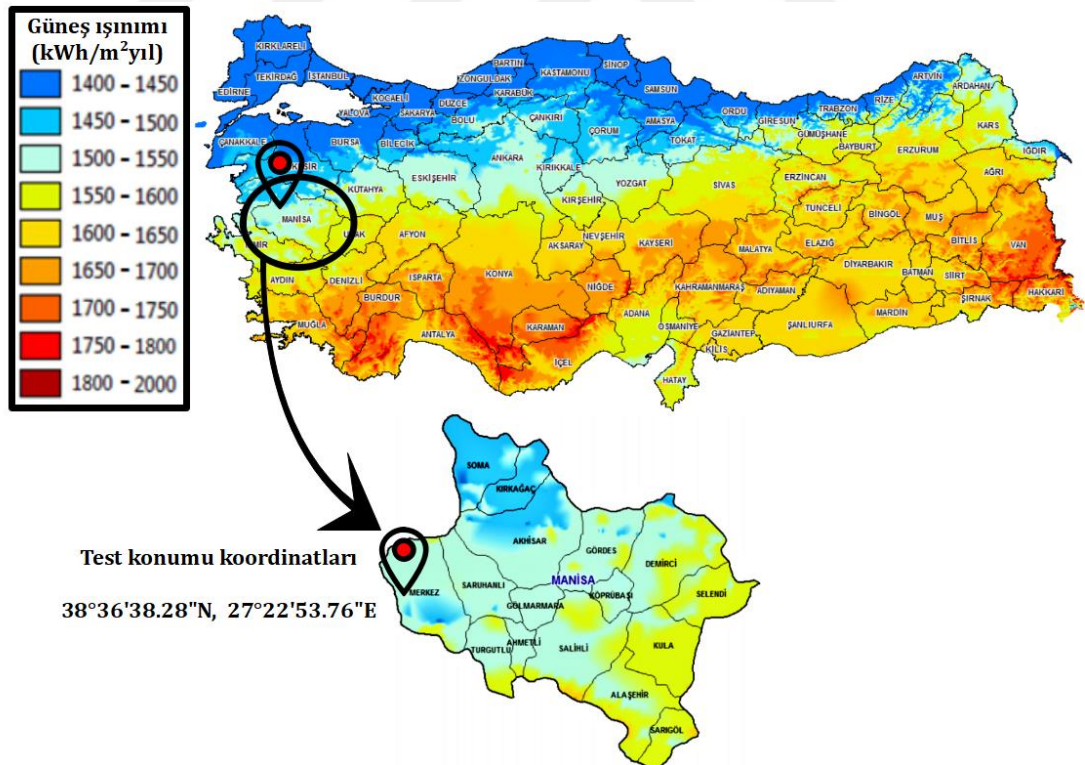


Şekil 5.11. Güneş destekli su arıtıcı deney düzeneği fotoğrafı

5.2. Deney Prosedürü

PVT kollektör deneyleri Haziran 2021, sera kurutucu ve güneş destekli su ısıtıcı deneyleri ise Temmuz 2021’de Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarı bahçesinde gerçekleştirilmiştir. Manisa iline ve Türkiye’ye ait güneş ışınımı haritası Şekil 5.12’de gösterilmektedir [101]. Aynı zamanda deneylerin gerçekleştirildiği konuma ait koordinatlar da aynı şekil üzerinde görülebilir. Manisa iline hakim olan iklim tipi Akdeniz İklimi olup, sıcaklık yaz mevsiminde artmakta ve yağışlar da kış mevsiminde şiddetlenmektedir. Köppen iklim sınıflandırmasına göre bu iklim türü Akdeniz İklimi’nin sıcak-kuru yaz (Csa) grubunda değerlendirilir [102,103].

Tez çalışması kapsamında farklı niceliklerin ölçümleri yapılmıştır. Her bir deney düzeneğinde kullanılan ölçüm aletleri ve özellikleri Şekil 5.4, Şekil 5.7 ve Şekil 5.9’da verilmiş olup Tablo 5.4’te de ayrıca detaylı olarak görülebilmektedir.



Şekil 5.12. Manisa ve Türkiye güneş ışınımı haritası [101]

Tablo 5.4. Deneylerde kullanılan ölçüm aletleri ve özellikleri

Ölçüm aleti	Marka	Model	Hassasiyet	Ölçüm aralığı
Solarmetre	CEM	LA-1017	$\pm 10 \text{ W/m}^2$	0-1999 W/m^2
Anemometre	CEM	DT-619	$\pm \% 3$	0,4-30 m/s
Sıcaklık veri kaydedici (datalogger)	Testo	176T4	$\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$	(-195)-(1200) $^\circ\text{C}$
Isıçift (termokupl)	Elimko	K-tipi	$\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$	(-200)-(1200) $^\circ\text{C}$
Hassas terazi	Weightlab	WL-3002L	$\pm 0,02 \text{ g}$	0-3000 g
Multimetre	Fluke	117	$\pm \% 1/\pm \% 1,5$	0,001-600 V/ 0,01-10 A
Termal kamera	Testo	875-2i	$\pm \% 2$	(-30)- (350) $^\circ\text{C}$

5.2.1. Hibrit Fotovoltaik-Termal Kollektör Deney Prosedürü

PVT kollektörlerin performans testleri iki farklı hava debisinde gerçekleştirilmiştir (0,007 ve 0,014 kg/s). Deneylere başlamadan önce PVT kollektörler 38° eğim açısında sahip (deney yapılan konumun enlem derecesine en yakın tamsayı) ve özel olarak imal edilmiş platformlara yerleştirilmiş ve üst yüzeyleri birer örtü ile kapatılarak açık havaya çıkarılmıştır. Sonrasında platformlar güney yönüne çevrilerek örtüler kaldırılmış ve deney başlatılmıştır. Düşük hava debisindeki deney için tek bir DC fan, yüksek hava hızında ise iki adet DC fan hava akımının sağlanması için kullanılmıştır. Deney sürecinde farklı parametreler ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümleri 10 saniyelik aralıklarla ölçülerek kaydedilmiştir. Diğer parametreler (hava hızı, akım, gerilim, güneş ışınımı) 30 dakikalık aralıklar ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Deneyler sabah saat 09:00'da başlatılmış ve öğleden sonra saat 18:00'da sonlandırılmıştır.

5.2.2. Sera Kurutucu Deney Prosedürü

Sera kurutucular 0,009 kg/s ve 0,014 kg/s'lik iki farklı hava debisinde test edilmiştir. Kurutma deneyleri saat 10:00'da başlatılmıştır. Her bir sistem için 150 gramlık kırmızı kapyra biber (*Capsicum annuum* L.) kullanılmıştır. Kurutulacak biber örnekleri öncelikle yıkanmış ve iç kısmında bulunan çekirdekler temizlenmiştir. Sonrasında, biber örnekleri 0,5 cm kalınlığında dilimler halinde kesilerek tepsilere yerleştirilmiştir. Biber örneklerinin başlangıç nem içeriği yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan konvektif fırında kurutma işlemi ile 3 saat boyunca kurutulmuş tespit edilmiştir [104,105]. Böylelikle numune içerisindeki nem ve kuru madde miktarı öğrenilmiştir. Biber örneklerinin başlangıç nem miktarı 5,98

$\pm 0,24$ g su/g kuru madde olarak belirlenmiştir. Sıcaklık ölçümleri 10 saniyelik aralıklarla ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Diğer parametreler (hava hızı, güneş ışınımı, ürün kütlesi, akım ve gerilim) 20 dakikalık aralıklarla ölçülerek kaydedilmiştir. Bunun yanında bir termal kamera yardımıyla sera kurutuculara ait taban plakası yüzey sıcaklığı dağılımı incelenmiştir. Kurutma işlemi iki ölçüm arasındaki farkın %1'den az olduğu ölçüm anında sonlandırılmıştır. Kurutma deneylerinin sonlandırılma zamanı farklılık göstermekle birlikte, üretilen ısı enerjisi depolama ünitelerinin performansının tespit edilebilmesi amacıyla deneyler devam ettirilmiştir. Diğer bir deyişle, sera kurutucu performans deneyleri saat 10:00'da başlatılmış, kurutma işleminin bitişinden bağımsız olarak saat 18:00'de sonlandırılmıştır.

5.2.3. Güneş Destekli Su Arıtma Sistemi Deney Prosedürü

Güneş destekli su arıtıcılarının deneyleri iki günü kapsamaktadır. Birinci deneyde üç farklı güneş destekli arıtıcı test edilmiştir. Bunlar konvansiyonel, parafin bazlı ısı depolama ünitesi ve nanopartikül katkılı parafin bazlı ısı depolama ünitesi su arıtma sistemleridir. Deney 1'deki temel amaç parafin bazlı ısı depolama ünitesi ve nanopartikül katkılı parafin bazlı ısı depolama ünitesi modifikasyonlarının konvansiyonel sistemin performansını ne ölçüde arttıracığının tespitidir. Deney 1'in sonuçlarına göre en iyi sonuçların nanopartikül katkılı sistemde görülmesi ile ikinci deneyde nanopartiküllerin hem ısı depolama ünitesinde hem de mat siyah boyada kombine olarak kullanımının etkinliği araştırılmıştır. Diğer bir ifade ile Deney 2'de nanopartiküllerin kombine kullanıldığı sistem, nanopartiküllerin sadece ısı depolama ünitesinde kullanıldığı arıtıcı ile karşılaştırılmıştır. Her bir arıtıcıda 9,5 litre tuzlu su kullanılmıştır. Bu değer arıtıcılarda yaklaşık 60 mm'lik su derinliğine denk gelmektedir. Sıcaklık ölçümleri 10 saniyelik aralıklarla, diğer parametreler ise 1 saatlik aralıklarla ölçülerek kaydedilmiştir. Performans deneyleri saat 08:00'da başlatılmış ve 17:00'da sonlandırılmıştır.

6. TEORİK HESAPLAMALAR

Bu bölümde tasarlanan, imal edilen ve deneysel olarak incelenen hibrit fotovoltaik-termal kollektörler, sera tipi kurutucular ve güneş destekli su arıtma sistemlere ait hesaplama yaklaşımları sunulmuştur.

6.1. Hibrit Fotovoltaik-Termal Kollektörlerin Teorik Analizi

Hibrit fotovoltaik termal hava ısıtmalı kollektöre ait genel enerji denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{ls} + \sum \dot{E}_{ou} \quad 6.1$$

$$\dot{E}_{m,in} + \dot{E}_{sun} = \sum \dot{E}_{ls} + \dot{E}_{elc} + \dot{E}_{m,ou} \quad 6.2$$

$$\sum \dot{E}_{ls} = \dot{E}_{ls,r} + \dot{E}_{ls,c} + \dot{E}_{ls,f} \quad 6.3$$

Denklem 6.3'te verilen \dot{E}_s ifadesi gelen güneş ışınımı göstermekte olup aşağıdaki gibi hesaplanabilir [60]:

$$\dot{G}_{ef} = \alpha \times \tau \times \dot{G} \times A \quad 6.4$$

Sistemde dolaşan hava tarafından kazanılan faydalı ısıl enerji aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunabilir:

$$\dot{E}_{thr} = \dot{E}_{m,ou} - \dot{E}_{m,in} = \dot{m} \times c_p \times (T_{ou,a} - T_{in,a}) \quad 6.5$$

Havanın özgül ısı kapasitesi sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir [106]:

$$c_p = 1009.26 - 0.0040403 \times T + 0.00061759 \times T^2 - 0.0000004097 \times T^3 \quad 6.6$$

Reynolds ve Nusselt sayıları sırasıyla denklem 6.7 ve denklem 6.8 yardımıyla hesaplanabilir [107]:

$$Re = \frac{\rho \times V \times D_h}{\mu} \quad 6.7$$

$$Nu = \frac{h \times D_h}{k} \quad 6.8$$

Elektriksel güç aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{elc} = I_{sc} \times V_{oc} \times FF \quad 6.9$$

Denklem 6.9’da bulunan FF ifadesi panel dolum faktörü olup aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir [108]:

$$FF = P_{max} / (I_{sc} \times V_{oc}) = (I_{max} \times V_{max}) / (I_{sc} \times V_{oc}) \quad 6.10$$

Kollektörden elde edilen enerji ısısal enerji ve elektrik enerjisi toplamıdır:

$$\dot{E}_t = \dot{E}_{elc} + \dot{E}_{thr} \quad 6.11$$

Hibrit kollektördeki enerji kayıpları aşağıdaki gibidir:

$$\sum \dot{E}_{ls} = \dot{E}_{sun} - \dot{E}_{thr} - \dot{E}_{elc} \quad 6.12$$

Kollektörün elektriksel verimi denklem 6.13 yardımıyla hesaplanabilir [60]:

$$\eta_{elc} = \frac{\dot{E}_{elc}}{\dot{E}_{sun}} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{\dot{G}_{ef}} \quad 6.13$$

Kollektörün ısısal verimi ise denklem 6.14 ile hesaplanabilir [109]:

$$\eta_{thr} = \frac{\dot{E}_{m,ou} - \dot{E}_{m,in}}{\dot{E}_s} = \frac{\dot{m} \times c_p \times (T_{ou,a} - T_{in,a})}{\dot{G}_{ef}} \quad 6.14$$

Yarı kararlı koşullar için fotovoltaik-thermal sistemin genel ekserji eşitlikleri aşağıdaki gibidir [110]:

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{ou} + \sum \dot{E}x_{ls} \quad 6.15$$

$$\dot{E}x_{sun} + \dot{E}x_{m,in} = \dot{E}x_{elc} + \dot{E}x_{m,ou} + \sum \dot{E}x_{des} \quad 6.16$$

$$\sum \dot{E}x_{des} = \dot{E}x_{des,r} + \dot{E}x_{des,c} + \dot{E}x_{des,f} \quad 6.17$$

Güneşten gelen ekserji girişi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{E}x_{sun} = \dot{G} \times \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right) \quad 6.18$$

Kütleli debi ekserjisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}x_{m,ou} - \dot{E}x_{m,in} = \dot{m} \times c_p \times (\psi_{ou} - \psi_{in}) \quad 6.19$$

Akış ekserji ifadeleri denklem 6.10 ve denklem 6.21 ile gösterilebilir [110,111]:

$$\psi_{ou} = (\bar{h}_{ou} - \bar{h}_{amb}) - T_{amb}(s_{ou} - s_{amb}) \quad 6.20$$

$$\psi_{in} = (\bar{h}_{in} - \bar{h}_{amb}) - T_{amb}(s_{in} - s_{amb}) \quad 6.21$$

Elektriksel ekserji denklem 6.22 yardımıyla ifade edilebilir:

$$\dot{E}x_{elc} = \dot{E}_{elc} \quad \text{“} \quad 6.22$$

Toplam ekserji ifadesi ise denklem 6.23 ile gösterilebilir:

$$\dot{E}x_t = \dot{E}x_{elc} + \dot{E}x_{thr} \quad 6.23$$

PVT kolektördeki ekserji yıkımı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir:

$$\sum \dot{E}x_{des} = \dot{E}x_{sun} - \dot{E}x_{elc} - \dot{E}x_{thr} \quad 6.24$$

PVT kolektörün elektriksel ve ısı ekserji verimi sırasıyla denklem 6.25 ve denklem 6.26 yardımıyla bulunabilir:

$$\eta_{ex,elc} = \frac{\dot{E}x_{elc}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{\dot{E}_{elc}}{\dot{G} \times \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{\dot{G} \times \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)} \quad 6.25$$

$$\eta_{ex,thr} = \frac{\dot{E}x_{thr}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{\dot{m} \times c_p \times \left[(T_{ou} - T_{in}) - T_{ab} \ln \left(\frac{T_{ou}}{T_{in}} \right) \right]}{\dot{G} \times \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)} \quad 6.26$$

Toplam ekserji verimi ise elektriksel ve ısı ekserji verimlerinin toplamına eşittir:

$$\eta_{ex,t} = \eta_{ex,elc} + \eta_{ex,thr} \quad 6.27$$

6.2. Sera Kurutucuların Teorik Analizi

Sera kurutucu sistemi içerisindeki havanın kütle korunumu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{ou} \quad 6.28$$

Denklem 6.28 sistemdeki nem için aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$\sum (\dot{m}_{in} \cdot \omega_{in} + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{ou} \cdot \omega_{ou} \quad 6.29$$

Sistem içerisindeki havanın yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanabilir [112]:

$$\rho_{in} = \frac{\bar{P}}{\bar{R} \cdot T_{in}} \quad 6.30$$

Kurutma sistemlerinin ekserji araştırması için temel prosedür, kararlı hal noktalarındaki ekserji miktarını tanımlamak ve kurutma işlemi için ekserji değişimlerini belirlemektir [113]. Kurutma odasının sera kurutucu olması durumunda, aşağıdaki ekserji formülü kullanılabilir [80, 114]:

$$Ekserji = \dot{m}_a c_{p,a} \left[(T - T_{amb}) - T_a \ln \frac{T}{T_{amb}} \right] \quad 6.31$$

Denklem 6.31 düzenlendiğinde, sera kurutucunun toplam giriş ve çıkış ekserjileri giriş ve çıkış sıcaklıklarına bağlı olarak ifade edilebilir. Kurutma prosesindeki toplam ekserji kaybı ise aşağıdaki gibi gösterilebilir [80]:

$$\sum Ex_{ls} = \sum Ex_{in} - \sum Ex_{ou} \quad 6.32$$

Sera kurutucunun giriş ve çıkış ekserjileri sırasıyla denklem 6.33 ve denklem 6.34 ile bulunabilir [80]:

$$Ex_{in} = \dot{m}_{in} c_{p,a} \left[(T_{in} - T_{amb}) - T_{amb} \ln \frac{T_{in}}{T_{amb}} \right] \quad 6.33$$

$$Ex_{ou} = \dot{m}_{ou} c_{p,a} \left[(T_{ou} - T_{amb}) - T_{amb} \ln \frac{T_{ou}}{T_{amb}} \right] \quad 6.34$$

Sera kurutucunun ekserji verimi ise aşağıdaki gibidir [114]:

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\text{Toplam ekserji kaybı}}{\text{Toplam ekserji girişi}} = \frac{\text{Toplam ekserji çıkışı}}{\text{Toplam ekserji girişi}} \quad 6.35$$

Bu çalışmada, güneşin ekserjisi giriş ekserjisi olarak değerlendirilmiştir. Böylelikle ekserji verimi ifadesi aşağıdaki gibi düzenlenebilir [80]:

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\sum Ex_{ls}}{\sum Ex_{sun}} \quad 6.36$$

Denklem 6.35 ve denklem 6.36'da görülen sera kurutucunun ekserji veriminin ısı ekserji verimi olduğu hatırlatılmalıdır. Fotovoltaik termal kollektörde ekserji verimi ifadesi elektriksel ve ısı olmak olarak iki farklı şekilde incelenmiştir.

Güneş ekserjisi ise denklem 6.37 yardımıyla bulunabilir [114, 115]:

$$\sum Ex_{sun} = Ex_{net} \left[1 - \frac{4T_{amb}}{3T_{sun}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}} \right)^4 \right] A_{PSK} \quad 6.37$$

Özgül enerji tüketimi (SEC) ve Özgül nem çekme oranı (SMER) kurutma uygulamalarının performansının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan iki parametre olup, sırasıyla denklem 6.38 ve denklem 6.39 yardımıyla hesaplanabilir [116]:

$$SEC = \frac{E}{m_{wt}} \quad 6.38$$

$$SMER = \frac{m_{wt}}{E} \quad 6.39$$

Yukarıdaki eşitliklerdeki E_t ifadesi toplam elektrik enerjisi tüketimini göstermektedir. Bu çalışmada hava dolaşımının sağlanabilmesi için her bir sera kurutucuda birer fan kullanılmıştır. Buna bağlı olarak elektrik enerjisi tüketimi değeri giriş fanlarının kullandığı elektrik enerjisi olarak dikkate alınmıştır [73,74].

Nem oranı değeri kurutma uygulamalarında ürünün kütle kaybının modellenmesinde kullanılmakta olup aşağıdaki gibi hesaplanabilir [117]:

$$MR = \frac{MC - MC_e}{MC_0 - MC_e} \quad 6.40$$

Kurutulan ürünün kuru bazda nem içeriği denklem 6.41 yardımıyla hesaplanabilir [118]:

$$MC_{db} = \left(\frac{M_i - M_d}{M_d} \right) 100 \quad 6.41$$

Bunun yanında kuruma hızı denklem 6.42 ile hesaplanabilir [119]:

$$DR = \frac{MC_{t+dt} - MC_t}{dt} \quad 6.42$$

6.3. Güneş Destekli Su Arıtıcıların Teorik Analizi

Güneş destekli su arıtıcısının saatlik enerji verimi, saatlik artırılmış suyun enerjisinin saatlik güneş enerjisi girişine oranı olarak tanımlanabilir. Bu parametre denklem 6.43 yardımıyla hesaplanabilir [120]:

$$\eta_{thr} = \frac{m_s \cdot \lambda_{fg}}{\dot{G}_{ef} \cdot 3600} \quad 6.43$$

Denklem 6.43'teki λ_{fg} ifadesi suyun buharlaşma gizli ısısı olup sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilir [121]:

$$\lambda_{fg} = 2.4935 \cdot (10^6 - 947.79 \cdot T_{wt} + 0.13132 \cdot T_{wt}^2 - 0.0047974 \cdot T_{wt}^3), (T_{wt} < 343 \text{ K için}) \quad 6.44$$

$$\lambda_{fg} = 3.1615 \cdot (10^6 - 761.6 \cdot T_{wt}), (T_{wt} > 343 \text{ K için}) \quad 6.45$$

Güneş destekli su arıtma sisteminin ekserji çıkışı aşağıdaki denklem yardımıyla bulunabilir [122]:

$$\dot{E}x_{ou} = \frac{\dot{m}_s \cdot \lambda_{fg}}{3600} \left[1 - \left(\frac{T_{amb} + 273.15}{T_{wt} + 273.15} \right) \right] \quad 6.46$$

Güneş destekli su arıtma sisteminin ekserji girişi aşağıdaki denklem yardımıyla bulunabilir [115]:

$$\dot{E}x_{in} = \dot{G}_{ef} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb} + 273.15}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb} + 273.15}{T_{sun}} \right)^4 \right] \quad 6.47$$

Güneş destekli su arıtıcısının ekserji verimi denklem 6.48 ile hesaplanabilir [123,124]:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{ou}}{Ex_{in}} \quad 6.48$$

Sürdürülebilirlik indeksi, ekserji temelli bir performans parametresi olup, güneş destekli ısı sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir [125]:

$$SI = \frac{1}{1-\eta_{ex}} \quad 6.49$$

6.4. Belirsizlik Analizi

Belirsizlik ifadesi, bir niceliğin ölçülerek elde edilen gerçek değerini kapsayan alan aralığını tanımlayan tahmini bir değerdir. Gerçekleştirilen ölçüm işlemlerinde deneysel belirsizlik değeri bir şüphe kavramı olarak nitelendirilebilir ve temel olarak gerçekleştirilen ölçümün güvenilirliğinin sorgulanması işlemidir. Bilimsel araştırmalarda şüphe ve bu şüphe durumunun ortadan kaldırılması, gerçekleştirilen akademik çalışmanın güvenilirliği açısından vazgeçilmezdir. Ölçme işlemi bilimsel bir çalışma olmakla birlikte, gerçekleştirilen ölçümün güvenilirliğini deneysel belirsizliği ile birlikte açıklamak mümkündür. Deneysel belirsizlik değerinin çalışma kapsamındaki parametreleri içerecek biçimde hesaplanması ve ölçülen nicelikler ile birlikte sunulması, ölçümü gerçekleştirilen değerlerin güvenilirliğini olumlu katkı sağlamaktadır. Ölçüm işlemi sırasında bazı hatalar meydana gelebilmektedir. Bu hatalar ölçüm cihazının imalatından, cihazın kullanımından ve yapılan ölçüm yönteminden kaynaklı olabilmektedir. Deneysel belirsizliğin genel ifadesi denklem 6.50 yardımıyla hesaplanabilir [126,127]:

$$W_R = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2\right]} \quad 6.50$$

Bu tez çalışması kapsamında incelenen üç farklı güneş enerjili sisteme ait ortalama deneysel belirsizlik değerleri Tablo 6.1'de sunulmuştur. Elde edilen belirsizlik değerlerinin literatürde güneş destekli sistemleri inceleyen çalışmalar ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir [74, 128].

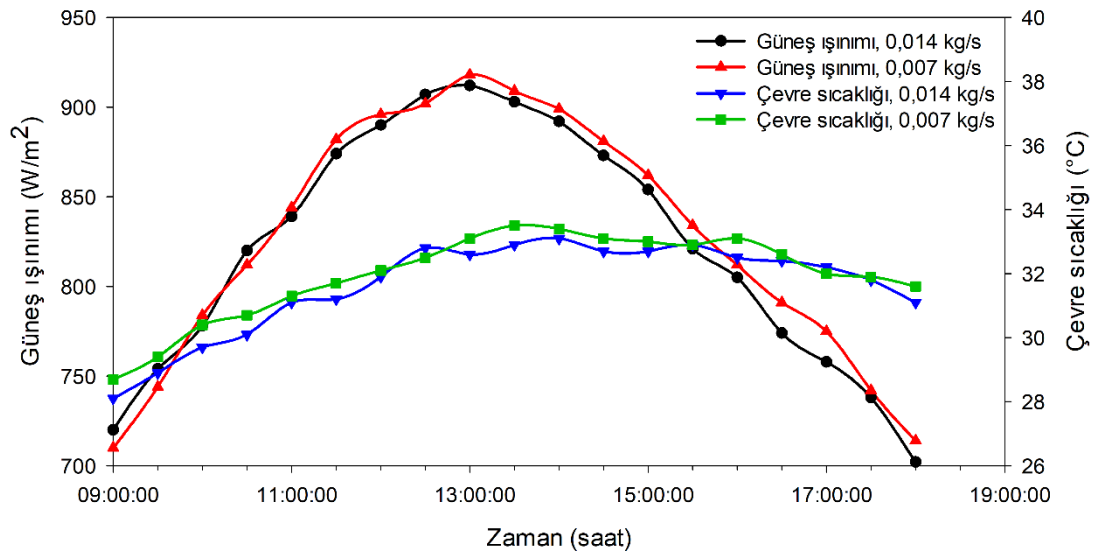
Tablo 6.1. Elde edilen belirsizlik değerleri

Parametre	Birim	Belirsizlik
Güneş ışınımı	W/m ²	±16,70
Sıcaklık	°C	±0,60
Hava hızı	m/s	±0,36
Ürün/su kütlesi	g	±0,54
Elektriksel güç	W	±0,34

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. PVT Kollektör Performans Bulguları

Bu kısımda PVT kollektöre ait performans bulguları sunulmuş ve detaylı olarak tartışılmıştır. Daha önce bahsedildiği üzere, hibrit kollektörler iki farklı hava debisinde test edilmiştir. Diğer bir ifade ile performans testleri iki farklı günde gerçekleştirilmiştir. Çevre sıcaklığı ve güneş ışınımı değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 7.1’de sunulmuştur. Ortalama çevre sıcaklığı değerleri yüksek ve düşük hava debilerinde gerçekleştirilen deneylerde (0,014 kg/s ve 0,007 kg/s) sırasıyla 31,6 °C ve 31,9 °C olarak ölçülmüştür. Ek olarak ortalama güneş ışınımı değerleri de sırasıyla 822 W/m² ve 827 W/m² olarak gözlemlenmiştir. Görüleceği üzere, çevresel parametreler iki deney için oldukça yakın değerler almıştır. Bu durum da elde edilen sonuçlar arasında daha doğru bir karşılaştırma yapılabilmesine olanak tanımaktadır.

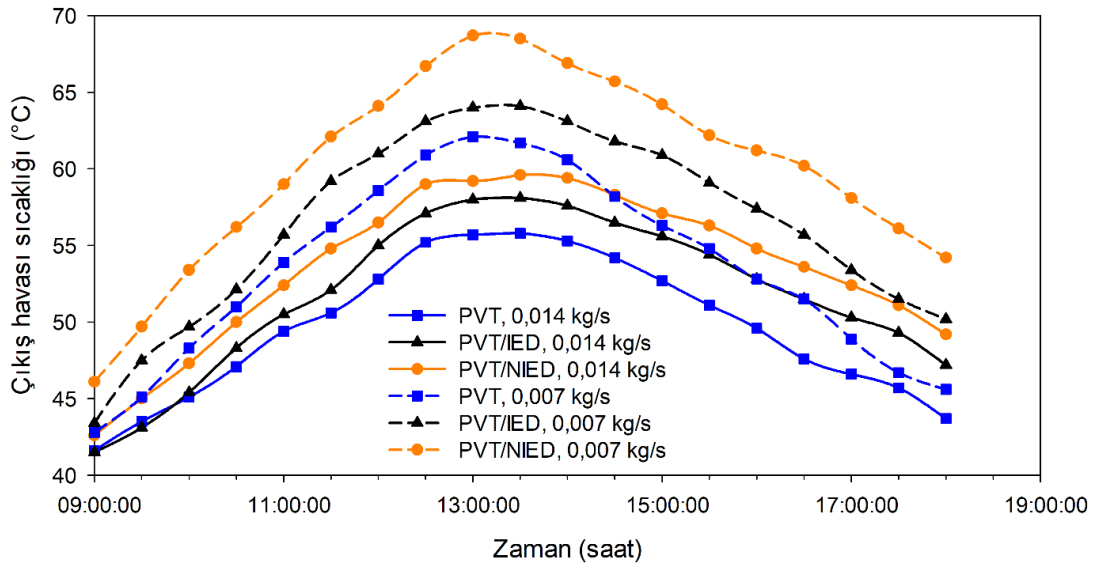


Şekil 7.1. PVT kollektör deneyleri için çevre sıcaklığı ve ışınımın zamana bağlı değişimi

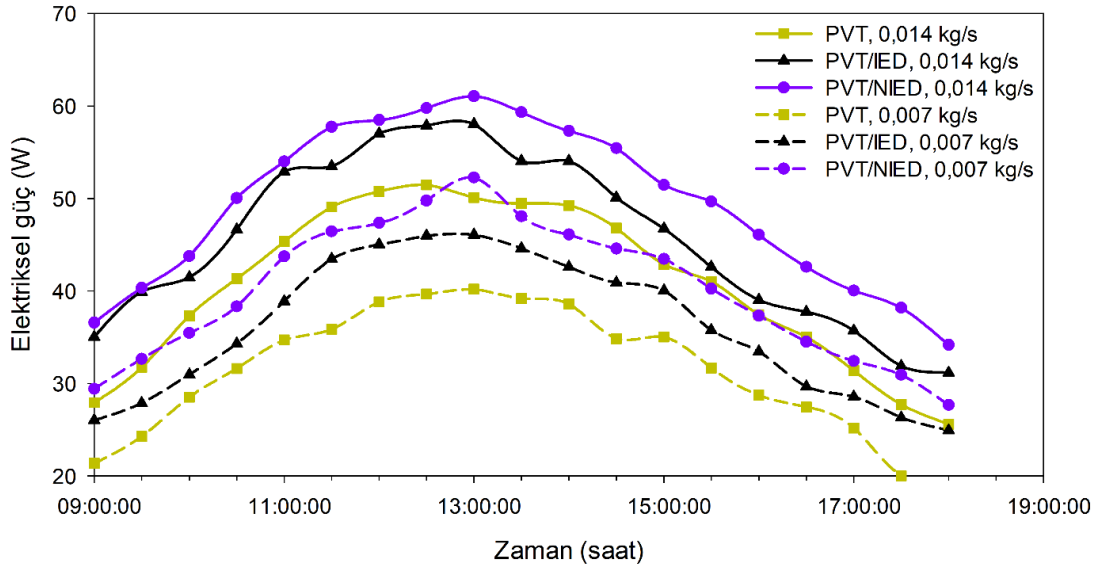
PVT kollektörlere ait çıkış havası sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 7.2’de gösterilmektedir. Yüksek hava debisinde gerçekleştirilen deneylerde, PVT, PVT/IED ve PVT/NIED’e ait ortalama çıkış havası sıcaklıkları sırasıyla 51,1, 51,8 ve 53,2 °C olarak ölçülmüştür. Bu değerler düşük hava debisindeki deneyler için sırasıyla 55,4, 56,6 ve 59,2 °C olarak ölçülmüştür. Görüleceği üzere, hava debisinin

çıkış hava sıcaklığı üzerine önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bunun yanında, nanoparçacıkların sisteme entegre edilmesinin de ısı transferini önemli ölçüde arttırdığı söylenebilir. Maksimum anlık çıkış sıcaklığı ise düşük hava debisinde gerçekleştirilen deneyde PVT/NIED’te 66,80 °C olarak gözlemlenmiştir. Chaibi ve ark. tarafından yapılan çalışmada PVT kollektörlerin etkinliği araştırılmış ve maksimum çıkış havası sıcaklığı yaklaşık 48 °C olarak ölçülmüştür [129]. Widyolar ve ark. minikanallar içeren bir PVT kollektör tasarlamış ve çıkış havası sıcaklığı değerleri bu tez çalışmasında gözlemlenen değerlere oldukça yakın olarak gözlemlenmiştir [130].

Elektriksel güç değerlerinin zamana bağlı değişimi ise Şekil 7.3’te sunulmuştur. Yüksek hava debisinde gerçekleştirilen deneyde PVT, PVT/IED ve PVT/NIED’e ait ortalama elektriksel güç değerleri sırasıyla 51,5, 54,0 ve 57,3 W olarak hesaplanmıştır. Düşük hava debisindeki deneyde ise bu değerler sırasıyla 43,4, 44,4 ve 47,6 W olarak hesaplanmıştır. Açıkça görüleceği üzere ısı enerji depolama ünitesinin sisteme entegre edilmesi PV panelin soğutulmasını ve performansının artırılmasını sağlamıştır.

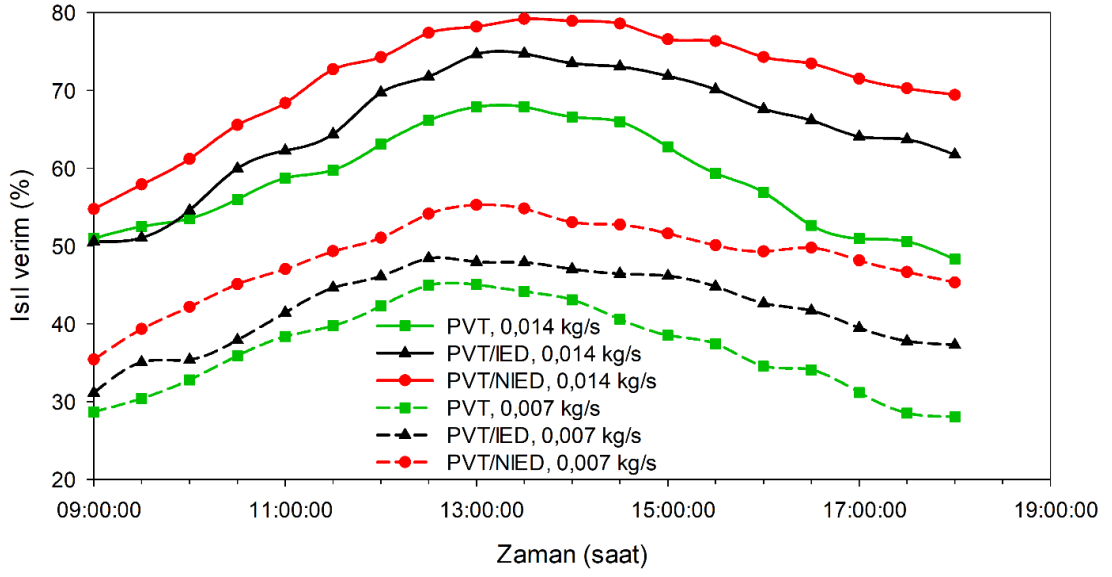


Şekil 7.2. PVT kollektörlere ait çıkış havası sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi

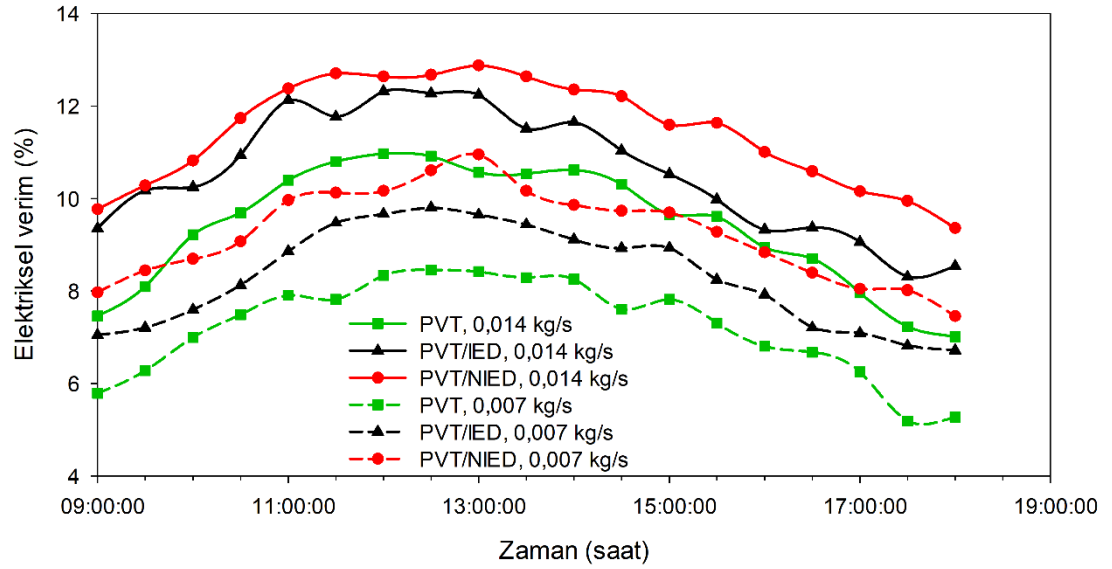


Şekil 7.3. PVT kolektörlere ait elektriksel güç değerlerinin zamana bağlı değişimi

Ortalama ısı ve elektriksel verim değerlerinin zamana bağlı değişimi sırasıyla Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te gösterilmektedir. Yüksek hava debisinde gerçekleştirilen deneylerde PVT, PVT/IED ve PVT/NIED için ortalama ısı verim değerleri sırasıyla 63.08%, 65.56% ve 68.90% olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, düşük hava debisindeki deney için sırasıyla %40,13, %42,21 ve %46,77 olarak tespit edilmiştir. Ek olarak, elektriksel verim değerleri ise yüksek hava debisindeki testte PVT, PVT/IED ve PVT/NIED için sırasıyla %11,94, %12,52 ve %13,30 olarak hesaplanmıştır. Elektriksel verim değerleri 0,007 kg/s hava debisindeki deneyde PVT, PVT/IED ve PVT/NIED için sırasıyla %10,00, %10,22 ve %10,97 olarak bulunmuştur. Gholampur ve ark. tarafından yapılan çalışmada, hem elektriksel hem de ısı verim değerleri hava debisinin artırılması ile iyileştirilmiştir [131]. Ek olarak bu çalışmada tasarlanan PVT kolektörlere benzer ısı ve elektriksel verim davranışları Tiwari ve ark. [132] ve Evola ve Marletta [133] tarafından yapılan çalışmalarda da gözlemlenmiştir.

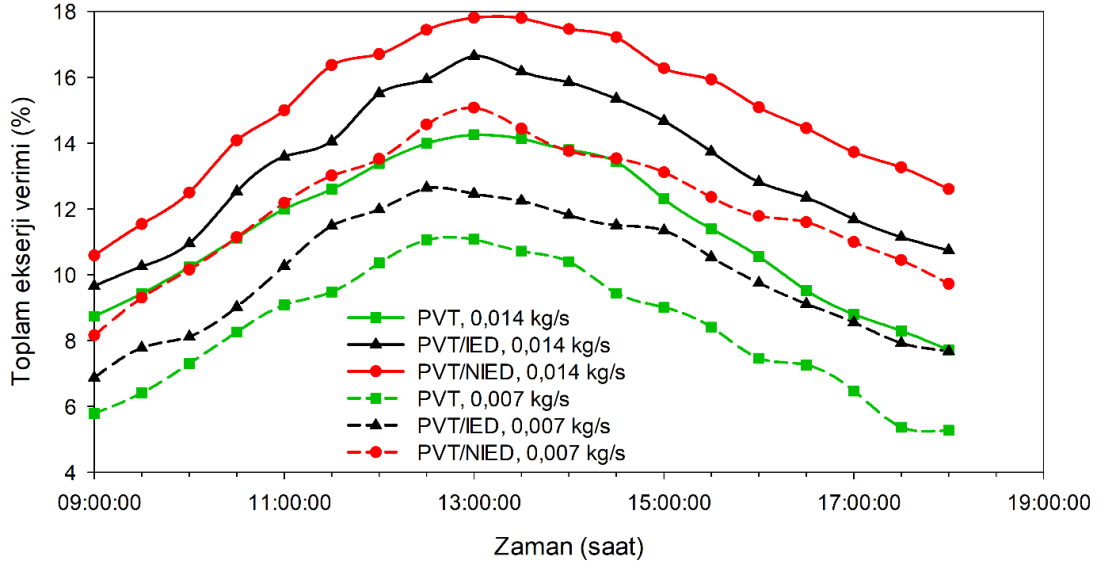


Şekil 7.4. PVT kolektörlere ait ısı verim değerlerinin zamana bağlı değişimi



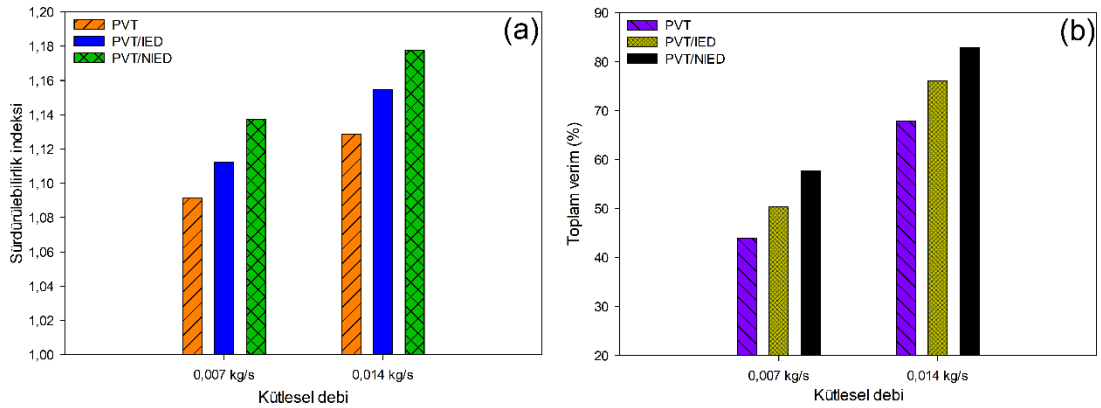
Şekil 7.5. PVT kolektörlere ait elektriksel verim değerlerinin zamana bağlı değişimi

Bu tez çalışması kapsamında test edilen PVT kolektörlerdeki ekserji verimi ifadesi hem elektriksel hem de ısı yönünden incelenmiştir [60]. Toplam ekserji verimi ifadesi ısı ve elektriksel ekserji verimlerinin toplamına eşittir. Toplam ekserji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 7.6'da sunulmuştur. 0,014 kg/s kütleli debide gerçekleştirilen deneylerde PVT, PVT/IED ve PVT/NIED için ortalama ekserji verimi değerleri sırasıyla %13,59, %14,36 ve %15,44 olarak hesaplanmıştır. 0,007 kg/s hava debisindeki performans testlerinde ise bu değerler sırasıyla %10,52, %11,08 ve %12,52 olarak tespit edilmiştir.



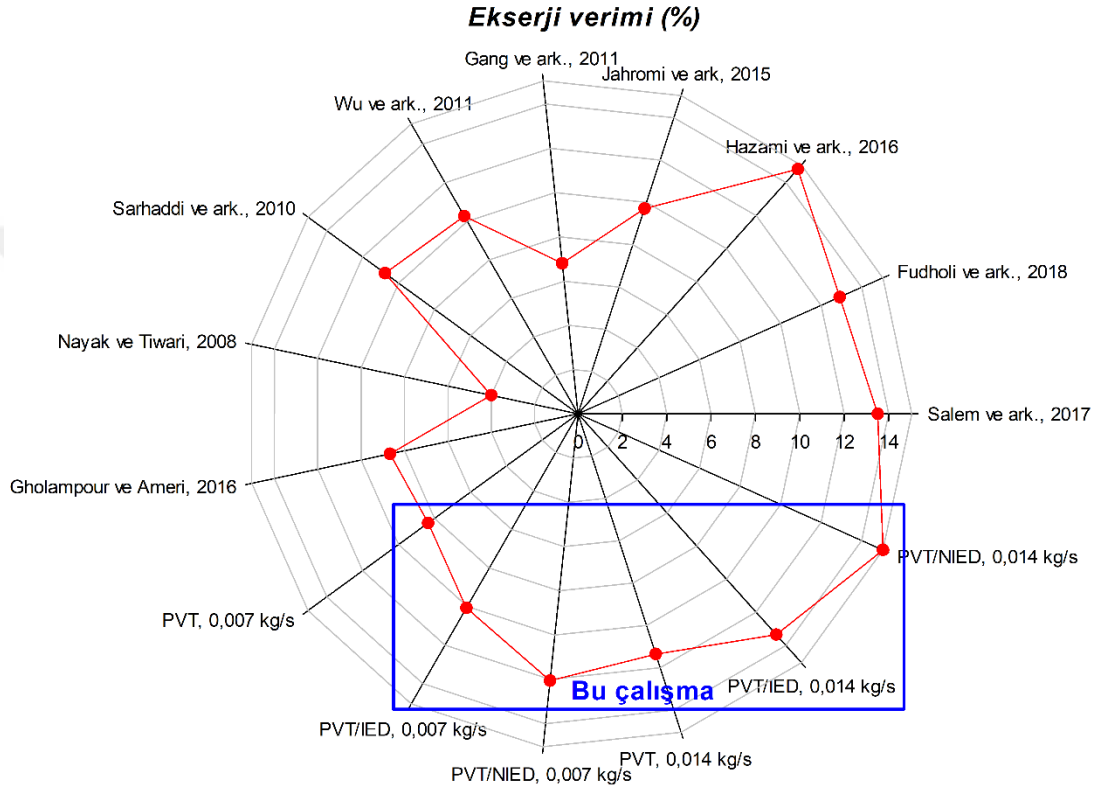
Şekil 7.6. PVT kolektörlere ait toplam ekserji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi

Şekil 7.7’de ortalama sürdürülebilirlik indeksi ve toplam verim değerleri gösterilmektedir. Toplam verim ifadesi elektriksel ve ısıl verimlerin toplamına eşittir. Şekilden de görülebileceği üzere, nanopartikül katkılı ısıl enerji depolama ünitesinin kullanımı ve hava debisinin artırılması PVT kolektör etkinliğini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Nanopartikül katkılı modifikasyonun kullanımı, yüksek hava debisindeki deney için sürdürülebilirlik indeksi ve toplam verim değerlerini sırasıyla %1,72 ve %9,55 olarak arttırmıştır. Bunun yanında, düşük hava debisinde ise bu değerler sırasıyla %1,78 ve %15,16 oranında arttırılmıştır.



Şekil 7.7. PVT kolektörlere ait ortalama sürdürülebilirlik indeksi ve toplam verim değerlerinin değişimi

Bu çalışmada incelenen PVT kolektörlerden elde edilen ekserji verimi değerlerinin literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılması Şekil 7.8'de gösterilmektedir [134-142]. Buna ek olarak Tablo 7.1'de ise elektriksel ve ısı verim değerleri literatürdeki güncel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan, imal edilen ve testleri yapılan PVT kolektörlere ait çıktılar literatürdeki benzer çalışmalar ile uyum içerisinde olduğu görülebilmektedir.



Şekil 7.8. PVT kolektörlerin ekserji verimlerinin literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması

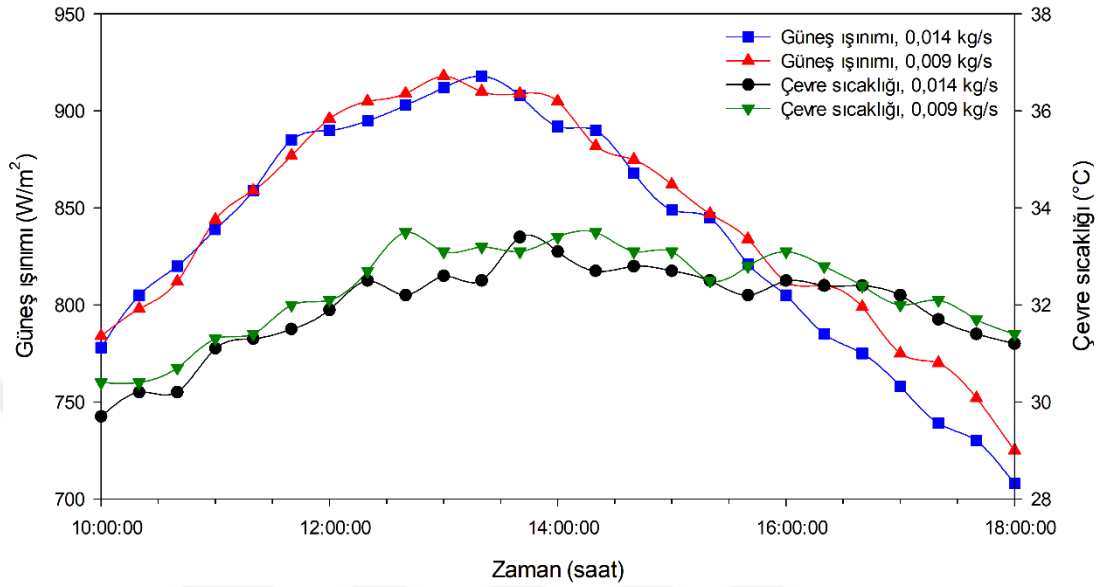
Tablo 7.1. Mevcut çalışmada elde edilen verim değerlerinin benzer çalışmalar ile karşılaştırılması

Referans	Uygulama	Elektriksel verim (%)	Isıl verim (%)
Sarhaddi ve ark. [136]	Hava akışkanlı PVT	10	17,18
Wu ve ark. [137]	Isı borulu PVT	8,45	63,65
Gang ve ark. [138]	Isı borulu PVT	9,4	41,9
Jahromi ve ark. [139]	Su dolaşımli PVT	7,5-8,7	51,6-52
Hazami ve ark. [140]	Hava akışkanlı PVT	15	50
Khanjari ve ark. [143]	Nanoakışkanlı PVT	10-13,7	55
Nahar ve ark. [144]	Su dolaşımli PVT	10	50-60
Mishra ve Tiwari [145]	Su dolaşımli PVT	10,0-10,4	28,2-45,9
Agrawal ve ark. [146]	Hava akışkanlı PVT	12,4	35,7
Rajoria ve ark. [147]	Hava akışkanlı PVT	3,1-9,1	12,21-28,1
Ibrahim ve ark. [148]	Su dolaşımli PVT	11,4	45,51
Lari ve Sahin [149]	Nanoakışkanlı PVT	12	-
Cabral ve ark. [150]	Hava akışkanlı PVT	8	59
El Hocine ve ark. [151]	Su dolaşımli PVT	12,7	36
Hui ve ark. [152]	Su dolaşımli PVT	10	35
Touni ve ark. [153]	Hava akışkanlı PVT	11-12	50-60
Bambrook ve ark. [154]	Hava akışkanlı PVT	10,6-12,2	28-55
Singh ve ark. [155]	Hava akışkanlı PVT	11	14
Slimani ve ark. [156]	Hava akışkanlı PVT	10,65	44
Shahsavar ve ark. [157]	Hava akışkanlı PVT	9-10	50-60
Bu çalışma	Hava akışkanlı PVT (Konvansiyonel, ısı enerji depolama ünitesi, nanopartikül katkılı ısı enerji depolama ünitesi)	10,00-13,30	40,13-68,90

7.2. Sera Kurutucu Performans Bulguları

Tez çalışmasının bu kısmında, kurutma prosesi bitmesine rağmen performans testleri devam ettirilmiştir. Bunun amacı ise ısı enerji depolama ünitelerinin davranışlarının ve bu modifikasyonların sera kurutucunun performansı üzerine etkilerinin analiz edilmek istenmesidir. Sera kurutucu deneylerindeki çevresel parametrelerin zamana bağlı değişimi Şekil 7.9’da gösterilmiştir. 0,014 kg/s ve 0,009 kg/s hava debilerinde gerçekleştirilen deneylerdeki ortalama güneş ışınımı değerleri sırasıyla 835 ve 842 W/m² olarak ölçülmüştür. Ek olarak, ortalama çevre sıcaklığı değerleri ise sırasıyla 31,90 ve 32,30 °C olarak gözlemlenmiştir. İki deney arasındaki güneş ışınımı ve çevre sıcaklığı değerleri arasındaki fark sırasıyla %0,84 ve %1,25’tir. Çevresel değişkenlerin birbirine oldukça yakın oluşu, iki deney

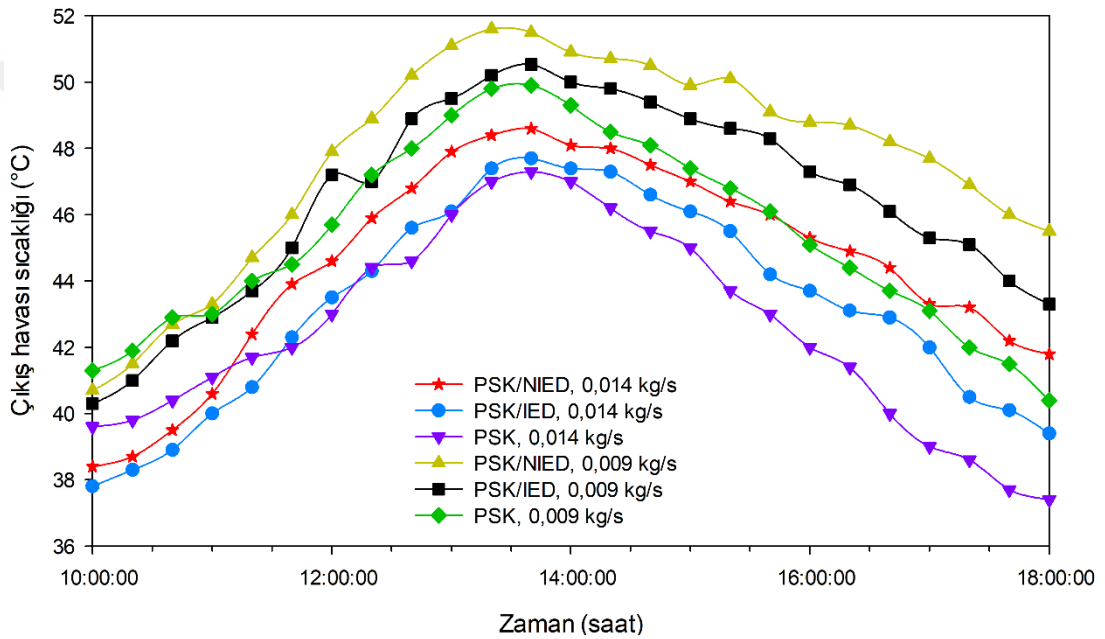
arasında daha doğru bir karşılaştırma yapılmasına olanak sağlamaktadır. Buna ek olarak, verilen fark değerleri bilimsel literatürde güneş destekli kurutma sistemlerini inceleyen benzer çalışmalarla oldukça yakın değerlere sahiptir [73, 104, 105].



Şekil 7.9. Sera kurutucu deneylerindeki çevresel parametrelerin zamana bağlı değişimi

Sera kurutucu deneylerinde ölçülen çıkış havası sıcaklığı değerlerinin zamana bağlı değişimi ise Şekil 7.10'da gösterilmiştir. 0,014 kg/s hava debisinde gerçekleştirilen testlerdeki ortalama çıkış havası sıcaklığı PSK/NIED, PSK/IED ve PSK için sırasıyla 44,6, 43,3 ve 42,5 °C olarak ölçülmüştür. Bu değerler 0,007 kg/s hava debisindeki deney için sırasıyla 47,7, 46,5 ve 45,3 °C olarak bulunmuştur. Şekilden de görüleceği üzere, her iki deneyde de konvansiyonel sera kurutucunun (PSK) çıkış sıcaklığı deneylerin ilk evresinde daha yüksek değerler almıştır. Deneylerin erken evresinde modifiye edilmiş sera kurutuculara (PSK/IED ve PSK/NIED) entegre edilen faz değıştiren malzemelerin eriyerek ısı enerjisi depoladığı söylenebilir. Ortalama 60-80 dakika sonra, nanopartikül katkılı sera kurutucunun çıkış sıcaklığında önemli bir artışın meydana geldiği görülebilmektedir. Bilindiği üzere, parafin düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Nanopartiküllerin faz değıştiren malzemelere entegre edilmesi ısı transferini önemli ölçüde arttırmış, buna bağlı olarak çıkış sıcaklığı da yükseltilmiştir. Benzer davranışlar güneş destekli ısı sistemleri inceleyen bazı araştırmacılar tarafından da gözlemlenmiştir. Kabeel ve ark. [57] tarafından yapılan çalışmada, nanopartikül katkılı ısı enerji depolama

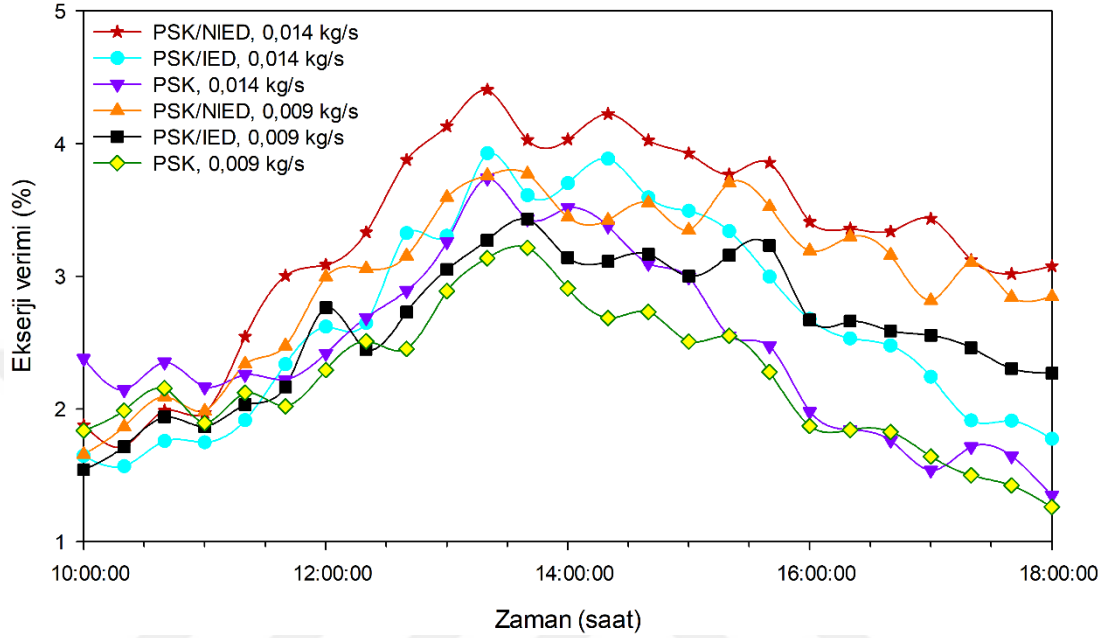
ünitesi boru tipi güneş destekli su artıma sistemine entegre edilmiştir. Nanomalzemelerin faz değiştiren malzemeye eklendiği sisteme ait sıcaklık değerlerinin, yalnızca faz değiştiren malzemenin kullanıldığı sisteme oranla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Pasupathi ve ark. [56] tarafından gerçekleştirilen araştırmada nanopartikül katkılı ısı enerji depolama üniteli bir güneş destekli su artıma sistemi incelenmiş ve benzer sonuçlar bulunmuştur. Algarni ve ark. [51] nanopartikül katkılı faz değiştiren malzeme ünitesi ile modifiye edilmiş vakum tüplü güneş kollektörü sistemi tasarlamış ve deneysel olarak incelemiştir. Araştırma sonuçları bu çalışmadaki sonuçlara oldukça benzer niteliktedir.



Şekil 7.10. Sera kurutucu çıkış havası sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi

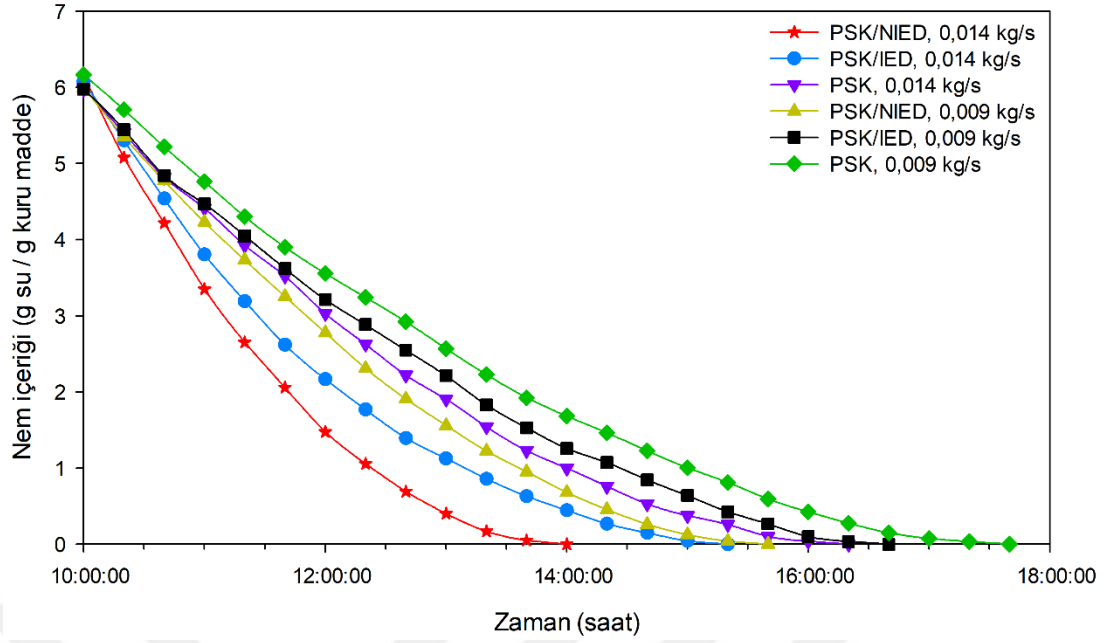
Sera kurutucu ekserji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi ise Şekil 7.11'de gösterilmiştir. Yüksek hava debisindeki deneyde ortalama ekserji verimleri PSK/NIED, PSK/IED ve PSK için %3,25, %2,68 ve %2,38 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler 0,009 kg/s hava debisindeki testler için %3,05, %2,61 ve %2,52 şeklinde bulunmuştur. Güneş ışınımı değerinin düşmesi ile sera kurutucular arasındaki ısı performans farkı daha net biçimde görülebilmektedir. Modifiye edilmiş sera kurutucular yüksek performans değerlerinde çalışmaya devam etmişlerdir. Ek olarak, bulunan ekserji verimi değerleri de literatür ile uyum içerisindedir [80]. Mishra ve ark. [158] tarafından yapılan araştırmada güneş destekli ısıtıcı ile modifiye edilmiş sera sistemi Hindistan iklim koşullarında test edilmiştir.

Bu çalışmadaki hava debisinden çok daha yüksek debide gerçekleştirilen testlerde sistemin ekserji verimi %4,1-4,5 aralığında bulunmuştur. Bunun yanında, PSK/NIED, PSK/IED ve PSK için ortalama sürdürülebilirlik indeksi değerleri sırasıyla 1,031-1,034, 1,027-1,028 ve 1,023-1,025 aralığında bulunmuştur.



Şekil 7.11. Sera kurutucu ekserji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi

Ürün nem içeriği değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 7.12’de verilmiştir. Görüleceği üzere nanopartikül katkılı faz değiştiren malzeme ünitesinin sera kurutma sisteminde kullanımı kurutma süresini önemli ölçüde azaltmıştır. Buna ek olarak, hava debisinin artırılması da kurutma süresini düşürmüştür. PSK/NIED, PSK/IED ve PSK için yüksek debide gerçekleştirilen deneylerde kurutma süresi sırasıyla 240, 320 ve 380 dakika olarak gözlemlenmiştir. Bu değerler düşük hava debisinde sırasıyla 340, 400 ve 460 dakika olarak bulunmuştur. Görüleceği üzere, hava hızının artırılmasının ve nanopartikül katkılı ısı depolama ünitesi entegrasyonunun kurutma süresine önemli olumlu etkileri bulunmaktadır. Literatürde farklı modifikasyonların ve hava debisinin güneş destekli kurutma sistemlerinin kurutma verimine etkisinin incelendiği bazı çalışmalar bulunmakla birlikte, mevcut çalışmada elde edilen kurutucu davranışının bu çalışmaların sonuçları ile oldukça benzer olduğu görülmektedir [73, 74].

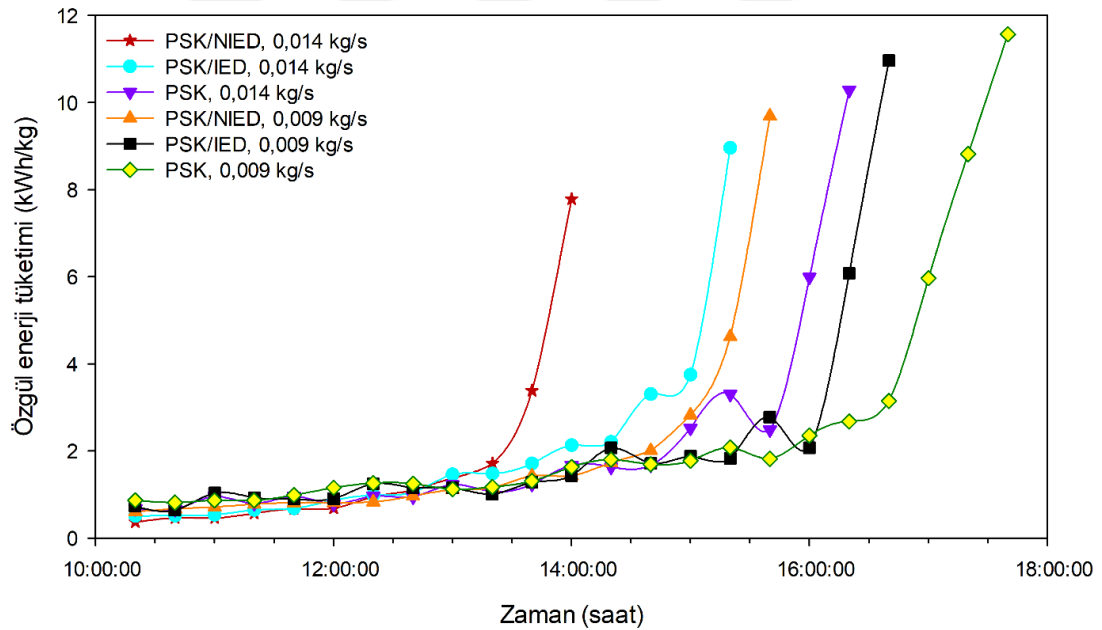


Şekil 7.12. Ürün nem içeriği değerlerinin zamana bağlı değişimi

Özgül enerji tüketimi (SEC) değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 7.13'te gösterilmiştir. Bilindiği üzere SEC değeri kurutma sistemlerinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli performans ölçütlerinden birisidir. Bu parametre üründen uzaklaştırılan birim nem miktarı başına tüketilen elektrik enerjisini tanımlamaktadır. Tez çalışmasının bu kısmında, zorlanmış taşınım ile çalışan (aktif) sera kurutucular tasarlanmış ve test edilmiştir. Hava akımının sağlanabilmesi için düşük enerji tüketimine sahip birer fan her bir sera kurutucusunun girişine yerleştirilmiştir. Yüksek hava debisinde gerçekleştirilen deneyde PSK, PSK/IED ve PSK/NIED için ortalama SEC değerleri sırasıyla 2,10, 1,93 ve 1,63 kWh/kg olarak hesaplanmıştır. Düşük hava debisindeki deneyde ise bu değerler sırasıyla 2,48, 2,09 ve 1,89 kWh/kg olarak bulunmuştur. Ek olarak, ortalama özgül nem çekme oranı (SMER) değerleri PSK, PSK/IED ve PSK/NIED için sırasıyla 0,67-0,81, 0,77-0,97 ve 0,91-1,29 kg/kWh aralığında değişmektedir. Elde edilen SEC ve SMER sonuçları nanopartikül katkılı ısı enerjisi depolama ünitesinin üstünlüğünü göstermektedir. Ek olarak, elde edilen SEC değerleri literatürdeki benzerleri ile rekabet edebilir niteliktedir. Tuncer ve ark. [74] tarafından yapılan çalışmada, hava ısıtmalı güneş kolektörü destekli sera kurutucu üretilmiş ve test edilmiştir. Çalışmada kullanılan sistem ölçülerinin bu tez çalışmadaki sera kurutucuları ile oldukça yakın değerlerde olduğu söylenebilir. Çalışmada SEC değerleri 2,8-4,8 kWh/kg aralığında bulunmuştur. Farklı bir

çalışmada, Khanlari ve ark. [73] boru tipi bir hava ısıtmalı güneş kolektörünü sera kurutucu verimini arttırmak için kullanmışlardır. Çalışmada SMER değerleri 0,23-0,34 kg/kWh aralığında bulunmuştur. Mevcut çalışma sonuçlarından açıkça görüleceği üzere nanopartikül katkılı ısı enerji depolama ünitesi kurutma performansını önemli ölçüde arttırmıştır. Ek olarak, bu çalışmada kompleks yardımcı ısıtma bileşenleri kullanılmadığı da hatırlatılmalıdır. Elde edilen SMER ve SEC değerinin benzer güneş destekli kurutma uygulamaları ile rekabet edebilir nitelikte olduğu görülmüştür [158-160].

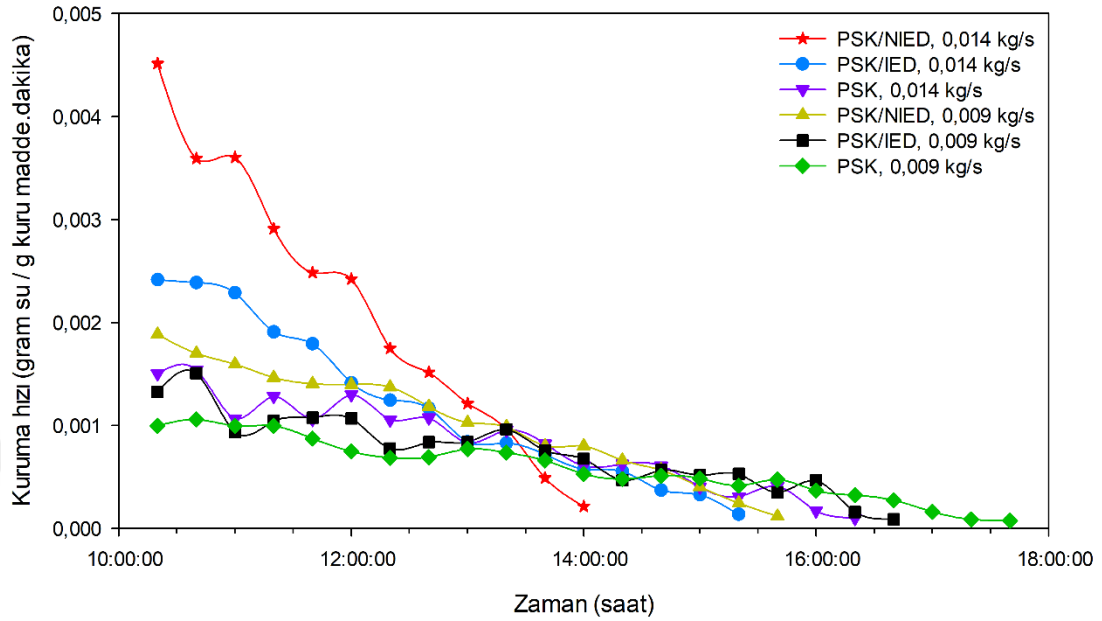
Kuruma hızı (DR) değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 7.14’de verilmiştir. Ortalama kuruma hızı değeri PSK, PSK/IED ve PSK/NIED için sırasıyla 0,0021, 0,0012 ve 0,0008 $g_{su}/g_{kuru\ madde.dakika}$ olarak hesaplanmıştır. Ek olarak bu değerler düşük hava hızı için 0,0006, 0,0007 ve 0,0010 $g_{su}/g_{kuru\ madde.dakika}$ olarak bulunmuştur.



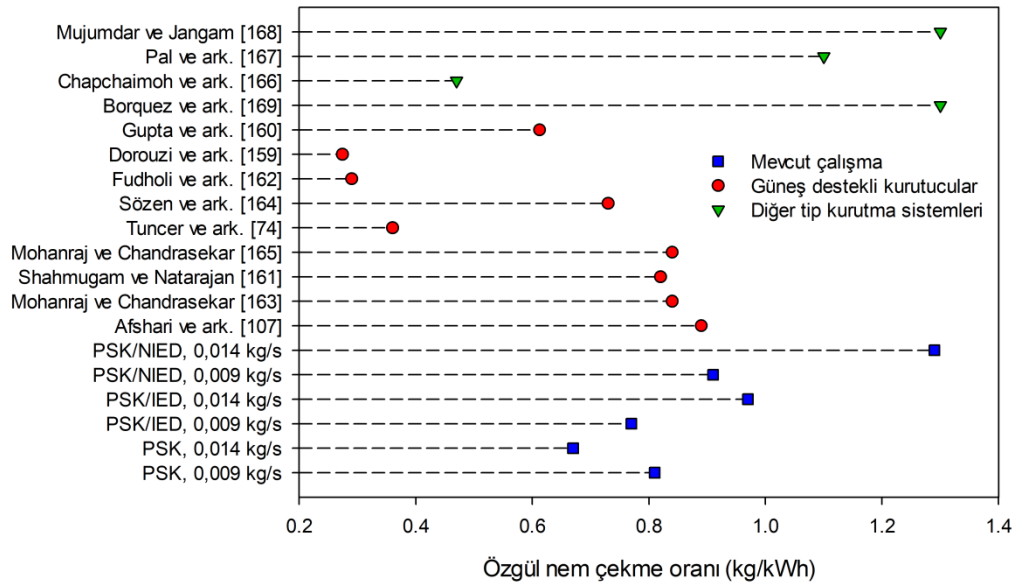
Şekil 7.13. SEC değerlerinin zamana bağlı değişimi

Şekil 7.15 mevcut çalışmada elde edilen SMER değerlerinin literatürdeki farklı kurutma uygulamaları ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Elde edilen SMER bulguları benzer güneş destekli kurutma sistemlerini inceleyen çalışmalar ile karşılaştırıldığında, kabul edilebilir aralıkta olduğu görülebilir [74, 107, 159, 160-164]. Ek olarak, elde edilen SMER değerleri ısı pompalı kurutucu [165,166],

konvektif kurutucu [167] ve mikrodalga destekli vakum kurutucu [168] gibi sistemlerle de rekabet edebilir niteliktedir.



Şekil 7.14. Kuruma hızı değerinin zamana bağlı değişimi

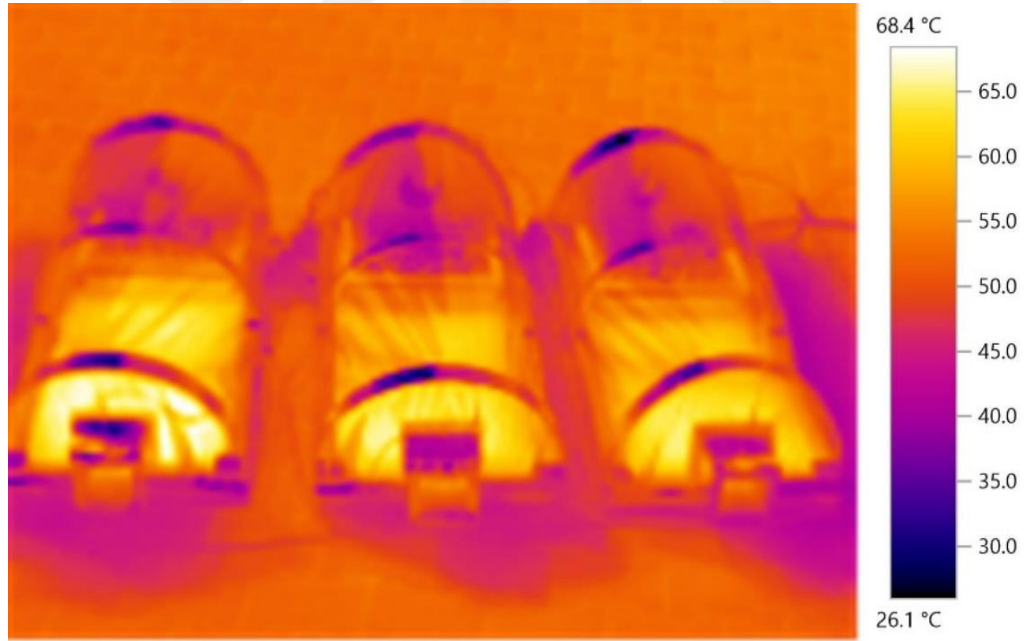


Şekil 7.15. Elde edilen SMER değerlerinin literatürdeki benzer araştırmalarla karşılaştırılması

Şekil 7.16'da sera kurutuculara ait termal kamera görüntüsü verilmiştir. Termal kamera görüntüsü ısı enerjisi depolama üniteleri yüzey sıcaklıklarını değerlendirmek için alınmıştır. Görüntü düşük hava debisinde gerçekleştirilen

deneye aittir. PSK/NIED ve PSK/IED sırasıyla sol ve orta kısımda görülebilir. Görüleceği üzere nanopartikül katkılı modifikasyon içeren sera kurutucusunun diğer sera kurutucularına göre daha yüksek yutucu yüzey sıcaklığına sahip olduğu görülebilir.

Elde edilen bulgular nanopartikül katkılı ısı depolama ünitesinin sera kurutucularında başarılı kullanımını kanıtlar niteliktedir. Bu çalışmada incelenen sera kurutucuların pilot ölçekli birer prototip olduğu hatırlatılmalıdır. Gerçek uygulamalarda bazı zorluklarla karşılaşılması olasıdır. Tasarım, üretim ve işletme zorluklarının aşılabilmesi adına ısı depolama üniteleri modüler bir biçimde üretilerek, ayrı modüller halinde sera kurutucu içerisine yerleştirilebilir. Yerleşim taban plakası yerine farklı konfigürasyonlar da içerebilir. Literatürde modüler olarak ısı depolama ünitelerinin sera kurutucularında kullanıldığı bazı örnekler mevcuttur [80].

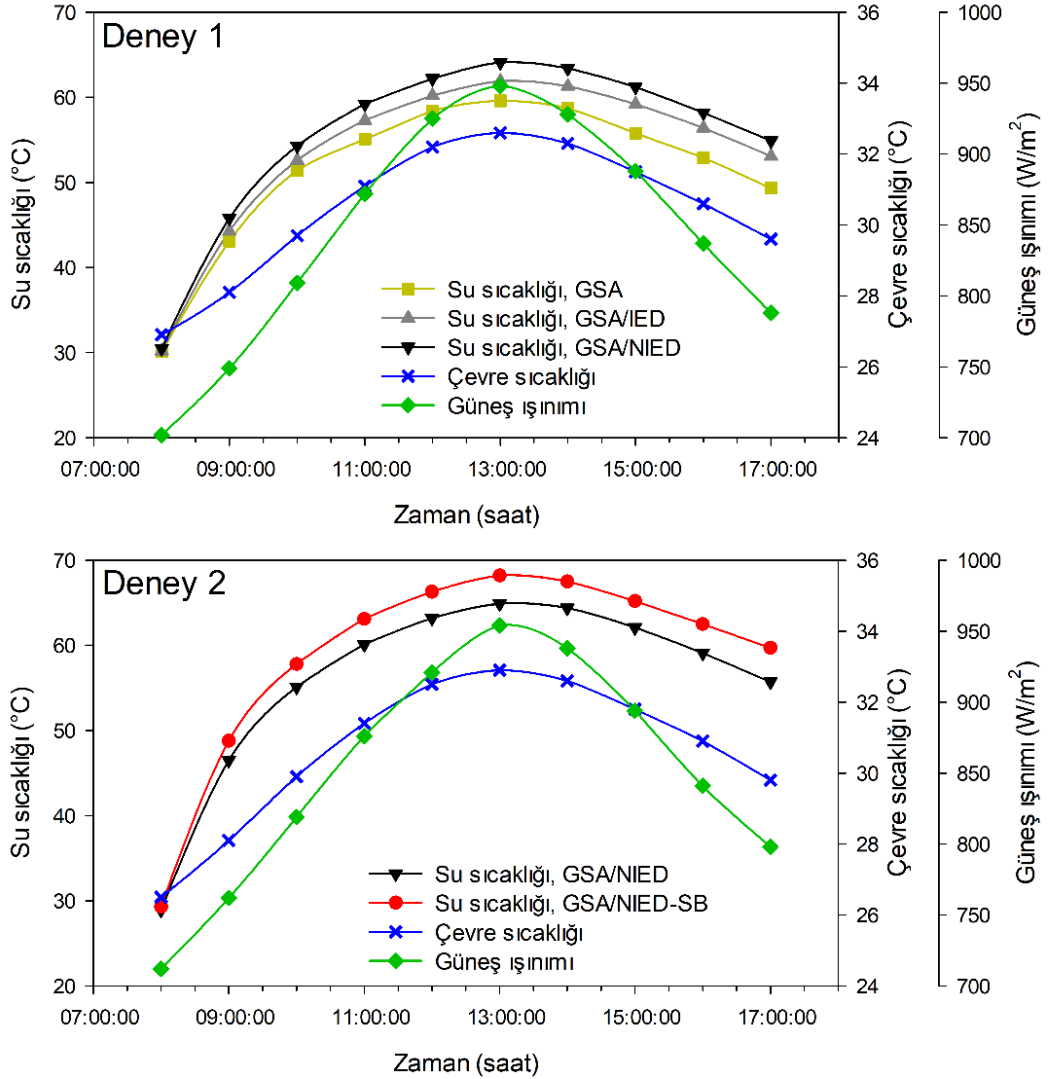


Şekil 7.16. Sera kurutuculara ait termal kamera görüntüsü

7.3. Güneş Destekli Su Arıtma Sistemi Performans Bulguları

Tez çalışmasının bu bölümünde güneş destekli su arıtıcılara ait bulgular sunulmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi, arıtıcıların deneyleri iki günlük bir süreci kapsamaktadır. Deneyler süresince ölçülen çevresel niceliklerin ve su

sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi Şekil 7.17’de gösterilmiştir. Deney 1 ve Deney 2’de gözlemlenen ortalama çevre sıcaklığı değerleri sırasıyla 30,46 ve 30,64 °C’dir. Ek olarak, ortalama güneş ışınımı değerleri de sırasıyla 844 ve 851 W/m² olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.17. Su arıtma sistemi deneylerindeki çevresel koşulların zamana bağlı değişimi

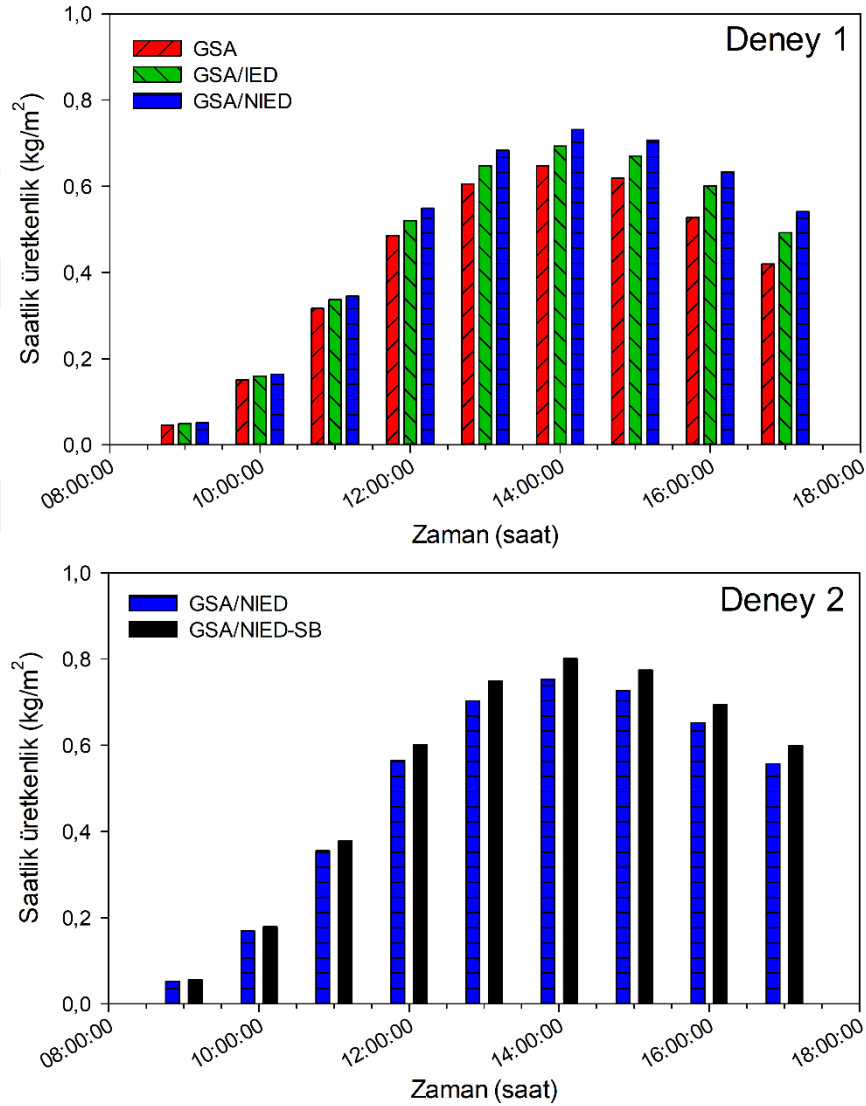
Ortalama su sıcaklığı birinci deneyde GSA, GSA/IED ve GSA/NIED için sırasıyla 51,44, 53,65 ve 55,38 °C olarak ölçülmüştür. İkinci deneyde ise su sıcaklığı değerleri GSA/NIED ve GSA/NIED-SB için sırasıyla 56,01 ve 58,84 °C olarak gözlemlenmiştir. Maksimum anlık su sıcaklığı değeri ise GSA/NIED-SB sisteminde 68,2 °C olarak ölçülmüştür (Deney 2). Daha önce de belirtildiği üzere, ilk deneyde konvansiyonel, ısı depolamalı ve nanopartikül katkılı ısı depolamalı

sistemler denenmiştir. Burada en yüksek performansa sahip arıtıcının nanopartikül katkılı sistem (GSA/NIED) olduğu belirlenmiş ve ikinci deneyde nanopartiküllerin hem depolama hem de mat siyah boyada kombine kullanıldığı sistem (GSA/NIED-SB) ile karşılaştırılmıştır. Görüleceği üzere nanopartiküllerin kombine kullanımı, konvansiyonel sisteme göre su sıcaklığını yaklaşık %14,38 arttırmıştır. Chaichan ve Kazem [170] tarafından yapılan çalışmada üç farklı tek eğimli güneş destekli su arıtma sistemi deneysel olarak analiz edilmiştir. Alüminyum oksit nanopartiküllerin ısı depolama ünitesinde kullanıldığı sistemde, mevcut sonuçlar ile benzer bulgulara rastlanmıştır. Ek olarak, Pasupathi ve ark. [56] tarafından yapılan araştırmada ise silika nanoparçacıklar ile modifiye edilmiş güneş destekli su arıtıcısı analiz edilmiş ve bu çalışmadaki sonuçlara benzer bir davranış gözlemlenmiştir.

Şekil 7.18’de saatlik üretkenlik değerleri gösterilmektedir. Bu nicelik birim arıtıcı alanı başına arıtılan temiz su olarak tanımlanmaktadır. Birinci deneyde hesaplanan ortalama saatlik üretkenlik oranları GSA, GSA/IED ve GSA/NIED için sırasıyla 0,38, 0,41 ve 0,44 kg/m²’dir. İkinci deneyde ise GSA/NIED ve GSA/NIED-SB için bu değerler sırasıyla 0,45 ve 0,48 kg/m² olarak bulunmuştur. Isıl enerji depolama sisteminin, nanopartikül katkılı ısı enerji depolama sisteminin ve kombine nanopartikül kullanımını saatlik üretkenlik değerini sırasıyla %7,89, %15,78-18,42 ve %26,31 arttırdığı tespit edilmiştir.

Üretkenlik parametresinin kümülatif olarak değişimi ise Şekil 7.19’da sunulmuştur. Birinci deneyde hesaplanan ortalama kümülatif üretkenlik oranları GSA, GSA/IED ve GSA/NIED için sırasıyla 3,81, 4,16 ve 4,40 kg/m²’dir. İkinci deneyde ise GSA/NIED ve GSA/NIED-SB için bu değerler sırasıyla 4,53 ve 4,83 kg/m² olarak hesaplanmıştır. Görüleceği üzere, nanopartiküllerin ısı enerji depolama ünitesi ve mat siyah boyada kombine olarak kullanılması kümülatif üretkenlik değerini konvansiyonel arıtıcıya göre yaklaşık olarak %26,77 arttırmıştır. Hassan [83] tarafından yapılan çalışmada, tek ve çift eğimli güneş destekli su arıtıcılar deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, iş akışkanı olarak yağ bulunan parabolik oluk kollektör sistemde bir yardımcı ısıtıcı olarak kullanılmıştır. Bahsi geçen modifikasyon, kümülatif üretkenlik değerini 2,31 kg/m²’den 4,03 kg/m² seviyesine getirmiştir. Ancak, bilindiği üzere bu tip yardımcı ısıtma elemanlarının kullanımı başlangıç ve işletme maliyetini önemli olarak arttırabilmektedir. Bu

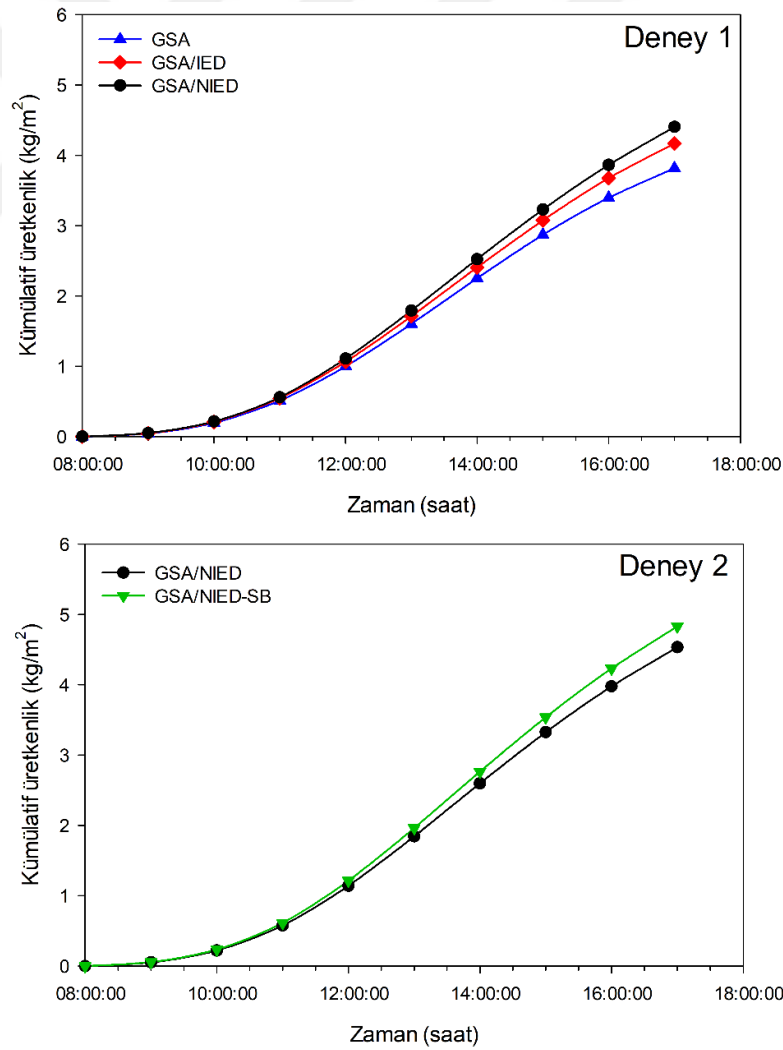
çalışmada, güneş destekli su arıtma sisteminin verimi karmaşık bir ilave eleman olmadan arttırılmıştır. Başka bir çalışmada, güneş destekli su arıtıcısının yoğuşma yüzeyi silika nanopartiküller ile kaplanmıştır [171]. Yoğuşma mekanizmasının bu yöntemle değiştirilmesi, kümülatif üretkenlik değerini %20,27 oranında arttırmıştır. Güneş destekli su arıtma sistemlerini inceleyen ve nanopartiküllerin entegre edildiği benzer çalışmalarda 0,93-5,90 kg/m² aralığında değişen kümülatif üretkenlik değeri tespit edilmiş olup, mevcut çalışmadaki bulgular ile benzer niteliktedir [172-175].



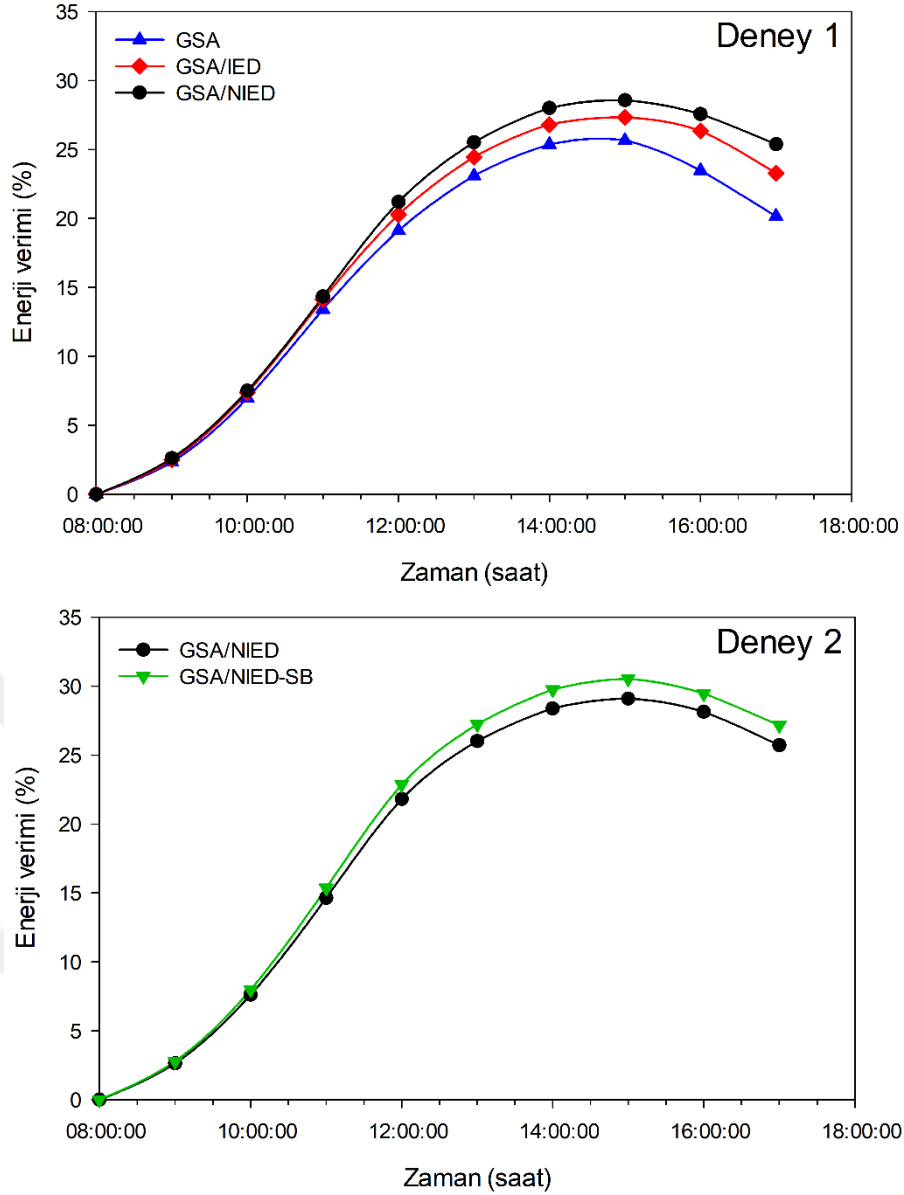
Şekil 7.18. Su arıtıcı üretkenlik değerinin zamana bağlı değişimi

Su arıtıcıların enerji veriminin zamana bağlı değişimi Şekil 7.20’de gösterilmiştir. Birinci deneyde hesaplanan ortalama enerji verimi değerleri GSA, GSA/IED ve GSA/NIED için sırasıyla %15,96, %17,25 ve %18,07’dir. İkinci

deneyde ise GSA/NIED ve GSA/NIED-SB için bu değerler sırasıyla %18,39 ve %19,30 olarak hesaplanmıştır. Nanoparçacıkların kombine kullanımı enerji verimini konvansiyonel sisteme göre yaklaşık olarak %21 iyileştirmiştir. Dumka ve ark. [176] tarafından yapılan çalışmada, tek eğimli bir güneş destekli su arıtıcısına kumla doldurulmuş pamuk bazlı modül modifikasyonu uygulanmıştır. Bu yöntem ile enerji verimi yaklaşık %29 olarak arttırılmıştır. Hassan ve ark. [177] tek eğimli güneş destekli su arıtıcılarını test etmiş ve enerji verimi değerini %15,89-19,40 aralığında bulmuştur. Tuly ve ark. [178], çift eğimli güneş destekli su arıtıcılarında farklı modifikasyonları test etmişlerdir. Yapılan modifikasyonlar ile ortalama enerji verimi %14,23-22,33 aralığında arttırılmıştır. Ek olarak maksimum enerji verimi %39,74 olarak bulunmuştur. Mevcut çalışmada da bu değer nanoparçacıkların kombine kullanıldığı sistemde %30,51 olarak hesaplanmıştır.



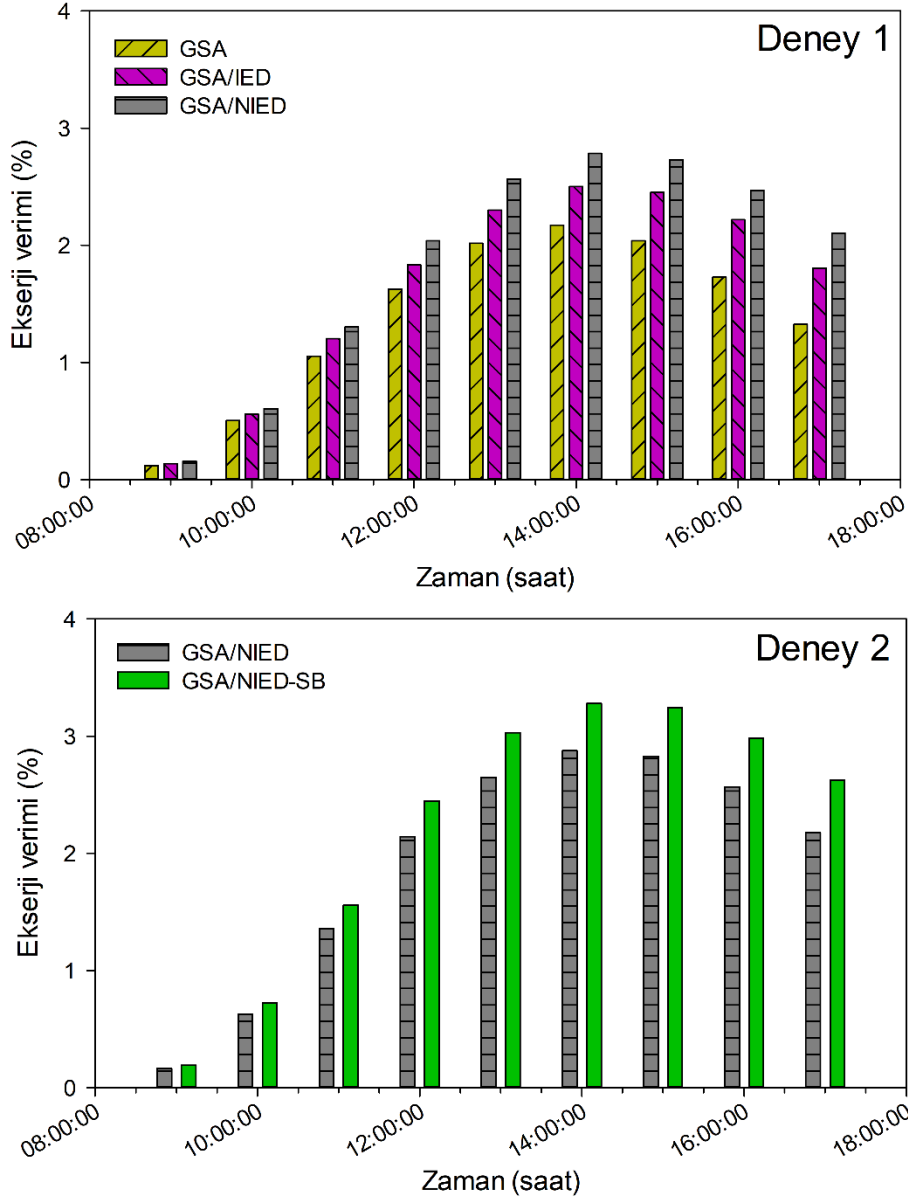
Şekil 7.19. Su arıtıcı kümülatif üretkenlik değerinin zamana bağlı değişimi



Şekil 7.20. Arıtıcı enerji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi

Şekil 7.21’de arıtıcı ekserji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Ortalama ekserji verimi değerleri GSA, GSA/IED ve GSA/NIED için sırasıyla %1,25, %1,50 ve %1,67 olarak bulunmuştur (Deney 1). Deney 2’de GSA/NIED ve GSA/NIED-SB için bu değerler sırasıyla %1,73 ve %2,01 olarak hesaplanmıştır. Vigneswaran ve ark. [179] tarafından yapılan araştırmada, faz değiştiren malzeme entegreli güneş destekli su arıtma sistemleri incelenmiştir. Ekserji verimi değerleri %2,99-3,56 aralığında bulunmuştur. Farklı bir çalışmada, Hassan ve ark. [177], tek eğimli güneş destekli su arıtıcılarını test etmiş ve ekserji verimini %1,19-1,34 aralığında bulmuştur. Kianifar ve ark. [180] piramit şekilli bir

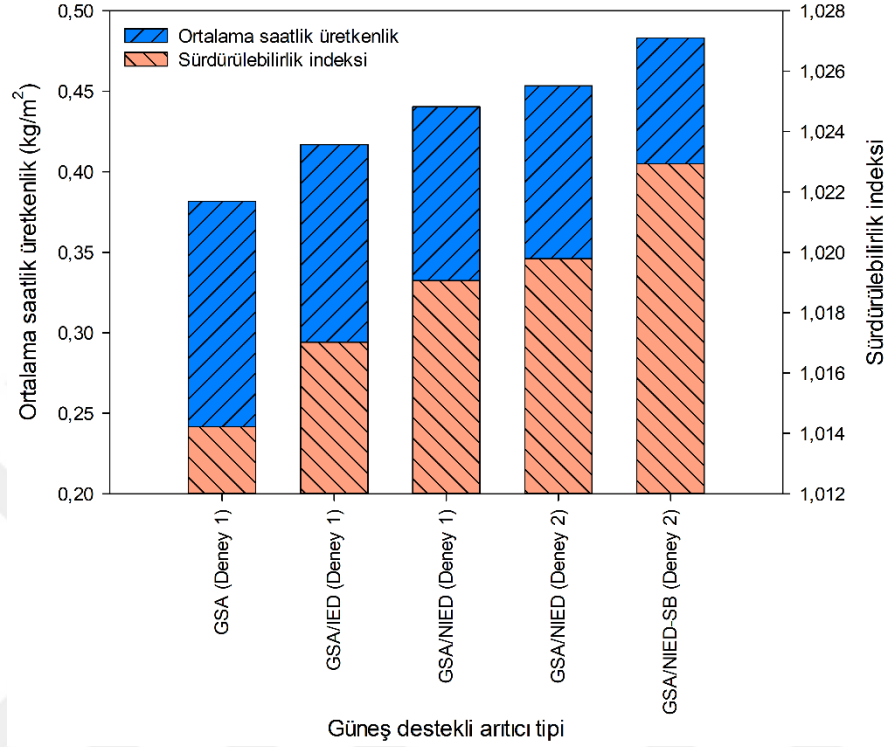
güneş destekli su arıtıcısı tasarlanmış ve test etmiştir. Ekserji verimi değerlerini %2,1-3,31 aralığında hesaplanmıştır. Mevcut çalışmadan elde edilen ekserji verimi bulgularının literatürdeki benzer çalışmaların sonuçları ile uyum içerisinde olduğu söylenebilir.



Şekil 7.21. Arıtıcı ekserji verimi değerlerinin zamana bağlı değişimi

Şekil 7.22’de ortalama sürdürülebilirlik indeksi ve saatlik üretkenlik değerleri gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, sürdürülebilirlik indeksi 1,014-1,022 aralığında hesaplanmıştır. Isıl enerji depolama ünitesi modifikasyonu, nanopartikül katkılı ısı enerji depolama ünitesi modifikasyonu ve kombine nanopartikül kullanım

modifikasyonu sürdürülebilirlik indeksini sırasıyla %0,29, %0,49 ve %0,78 olarak arttırmıştır. Ek olarak, bu modifikasyonlar saatlik üretkenlik değerini konvansiyonel sisteme göre sırasıyla %7,89, %18,42 ve %26,31 olarak arttırmıştır.



Şekil 7.22. Ortalama sürdürülebilirlik indeksi ve saatlik üretkenlik değerlerinin gösterimi

8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında hibrit fotovoltaik-termal kollektör, sera kurutucu ve güneş destekli su arıtma sistemleri tasarlanarak deneysel olarak incelenmiştir. Temel olarak bu çalışmada bakır oksit nanopartiküllerinin ısı enerjisi depolama ünitesine entegre edilmesinin bu üç sistemin performansına etkisi araştırılmıştır. Bu bağlamda, konvansiyonel, faz değiştiren malzeme bazlı ısı enerjisi depolama üniteli ve nanopartikül katkılı faz değiştiren malzeme bazlı ısı enerjisi depolama üniteli sistemler aynı çevresel şartlarda incelenmiştir. Güneş destekli su arıtma sisteminde nanopartiküllerin hem ısı depolama ünitesinde hem de yutucu yüzey kaplama boyasında kullanımı da incelenmiştir. Tez çalışmasına ait önemli sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- PVT kollektör için ortalama çıkış sıcaklığı nanopartikül katkılı ısı enerjisi depolama ünitesi kullanılarak ortalama %4,10-6,85 artırılmıştır.
- PVT kollektör için toplam verim değeri konvansiyonel, ısı enerjisi depolama üniteli ve nanopartikül katkılı ısı enerjisi depolama üniteleri için sırasıyla %50,13-75,02, %52,43-78,08 ve %57,73-82,19 aralığında hesaplanmıştır.
- PVT kollektörler için toplam ekserji verimi değeri PVT, PVT/IED ve PVT/NIED için sırasıyla %10,52-13,59, %11,08-14,36 ve %12,52-15,44 aralığında bulunmuştur.
- PVT kollektör için sürdürülebilirlik indeksi değeri nanopartikül entegrasyonu ve hava debisinin artırılması ile iyileştirilmiştir.
- Sera kurutucular için nanopartiküllerin ısı enerjisi depolama sistemine eklenmesi kurutma süresini %35-58 azaltmıştır.
- Ortalama ekserji verimi değeri PSK, PSK/IED ve PSK/NIED için sırasıyla %2,38-2,52, %2,61-2,68 ve %3,05-3,25 aralığında bulunmuştur. Görüleceği üzere en yüksek ekserji verimi değeri nanopartikül katkılı sera kurutucuda (PSK/NIED) bulunmuştur.

- Nanopartiküllerin kullanımı sera kurutucuların hem termal hem de kurutma performansını yardımcı bir ısıtma sistemi kullanımına gerek kalmadan arttırmıştır.

- Sera kurutucu ortalama özgül nem çekme değeri PSK, PSK/IED ve PSK/NIED için sırasıyla 0,67-0,81, 0,77-0,97 ve 0,91-1,29 kg/kWh aralığında hesaplanmıştır.

- Güneş destekli su arıtıcılar için hesaplanan ortalama enerji verimi değerleri ilk deneyde GSA, GSA/IED ve GSA/NIED için sırasıyla %15,96, %17,25 ve %18,07'dir. İkinci deneyde GSA/NIED ve GSA/NIED-SB için bu değerler sırasıyla %18,39 ve %19,30 olarak bulunmuştur.

- Nanopartiküllerin ısı enerji depolama ünitesinde ve yutucu yüzey kaplama boyasında kombine olarak kullanımı, konvansiyonel sisteme göre kümülatif üretkenlik değerini %26,77 olarak arttırmıştır.

- Güneş destekli su arıtıcılar için ortalama ekserji verimi %1,25-2,01 aralığında bulunmuştur.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlara göre nanopartiküllerin ısı enerji depolama ünitesinde kullanımı, incelenen üç güneş destekli sistemin de performansını önemli ölçüde arttırmıştır. Tasarlanan, imal edilen ve testleri yapılan PVT kollektörün mahal ısıtma, tarımsal ürün kurutma ve ön ısıtma gibi pek çok proseste kullanımı mümkündür. Ek olarak, bu çalışmada incelenen sera kurutucu ve güneş destekli su arıtıcıların da nanopartiküller ve ısı enerji depolama modifikasyonları ile ek bir ısıtıcıya gerek kalmadan performansları iyileştirilmiştir. Bu sistemlerin de tarımsal ürün kurutma ve temiz su üretimi açısından gerçek uygulamalarda kullanılabileceği öngörülebilir. İleriki çalışmalarda farklı nanopartiküllerin ısı enerji depolama ünitelerinde kullanımı, ısı depolama ünitesinde kanatçık modifikasyonu yapılması ve farklı geometrilerin karşılaştırılması mevcut sistemlerin geliştirilmesi için gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Murugan, M., Saravanan, A., Elumalai, P. V., Kumar, P., Saleel, C. A., Samuel, O. D., Setiyo, M., Enweremadu, C.C, Afzal, A. An overview on energy and exergy analysis of solar thermal collectors with passive performance enhancers. *Alexandria Engineering Journal*. 2022, 61, 8123-8147.
2. Xiong, Q., Hajjar, A., Alshuraiaan, B., Izadi, M., Altnji, S., Shehzad, S. A. State-of-the-art review of nanofluids in solar collectors: A review based on the type of the dispersed nanoparticles. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 310, 127528.
3. Purohit, I., Purohit, G. Solar Power Scenario of India–Potential, Technology, Policy, Deployment and Commercialization. *Energy Resources: Development, Harvesting and Management, Dehradun*. 2016, 101-138.
4. Ahmed, S. F., Khalid, M., Vaka, M., Walvekar, R., Numan, A., Rasheed, A. K., Mubarak, N. M. Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021, 25, 100981.
5. Vengadesan, E., Senthil, R. A review on recent developments in thermal performance enhancement methods of flat plate solar air collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020, 134, 110315.
6. Salvi, S. S., Bhalla, V., Taylor, R. A., Khullar, V., Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Tyagi, H. Technological advances to maximize solar collector energy output: a review. *Journal of Electronic Packaging*. 2018, 140(4), 040802.
7. Mund, C., Rathore, S. K., Sahoo, R. K. A review of solar air collectors about various modifications for performance enhancement. *Solar Energy*. 2021, 228, 140-167.
8. Fudholi, A., Sopian, K. A review of solar air flat plate collector for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, 102, 333-345.
9. Simo-Tagne, M., Etala, H. D. T., Tagne, A. T., Ndukwu, M. C., El Marouani, M. Energy, environmental and economic analyses of an indirect cocoa bean solar dryer: A comparison between natural and forced convections. *Renewable Energy*. 2022, 187, 1154-1172.
10. Razak, A. A., Majid, Z. A. A., Azmi, W. H., Ruslan, M. H., Choobchian, S., Najafi, G., Sopian, K. Review on matrix thermal absorber designs for solar air collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, 64, 682-693.
11. Alam, T., Kim, M. H. A critical review on artificial roughness provided in rectangular solar air heater duct. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 69, 387-400.
12. Sabiha, M. A., Saidur, R., Mekhilef, S., Mahian, O. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 51, 1038-1054.
13. Aramesh, M., Shabani, B. On the integration of phase change materials with evacuated tube solar thermal collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020, 132, 110135.
14. Barlev, D., Vidu, R., Stroeve, P. Innovation in concentrated solar power. *Solar energy materials and solar cells*. 2011, 95(10), 2703-2725.
15. Kalogirou, S. A. A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver. *Energy*. 2012, 48(1), 298-306.
16. Kumar, V., Shrivastava, R. L., Untawale, S. P. Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 44, 376-390.

17. Aboelmaaref, M. M., Zayed, M. E., Zhao, J., Li, W., Askalany, A. A., Ahmed, M. S., Ali, E. S. Hybrid solar desalination systems driven by parabolic trough and parabolic dish CSP technologies: Technology categorization, thermodynamic performance and economical assessment. *Energy Conversion and Management*. 2020, 220, 113103.
18. Soltani, S., Bonyadi, M., Avargani, V. M. A novel optical-thermal modeling of a parabolic dish collector with a helically baffled cylindrical cavity receiver. *Energy*. 2019, 168, 88-98.
19. Sopian, K., Al-Waeli, A.H.A., Kazem, H.A. Energy, exergy and efficiency of four photovoltaic thermal collectors with different energy storage material, *Journal of Energy Storage*. 2020, 29, 101245.
20. Salari, A., Taheri, A., Farzanehnia, A., Passandideh-fard, M., Sardarabadi, M. An updated review of the performance of nanofluid-based photovoltaic thermal systems from energy, exergy, economic, and environmental (4E) approaches. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 282, 124318.
21. Herez, A., El Hage, H., Lemenand, T., Ramadan, M., Khaled, M. Review on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems. *Solar Energy*. 2020, 207, 1321-1347.
22. Salari, A., Taheri, A., Farzanehnia, A., Passandideh-fard, M., Sardarabadi, M. An updated review of the performance of nanofluid-based photovoltaic thermal systems from energy, exergy, economic, and environmental (4E) approaches. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 282, 124318.
23. Safri, N. A. M., Zainuddin, Z., Azmi, M. S. M., Zulkifle, I., Fudholi, A., Ruslan, M. H., Sopian, K. Current status of solar-assisted greenhouse drying systems for drying industry (food materials and agricultural crops). *Trends in Food Science and Technology*. 2021, 114, 633-657.
24. Tiwari, S., Tiwari, G. N., Al-Helal, I. M. Development and recent trends in greenhouse dryer: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016, 65, 1048-1064.
25. Ahamed, M. S., Guo, H., Tanino, K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering*. 2019, 178, 9–33.
26. Gorjian, S., Calise, F., Kant, K., Ahamed, M. S., Copertaro, B., Najafi, G., Zhang, X., Aghaei, M., Shamshiri, R. R. A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 285, 124807.
27. Makkiabadi, M., Hoseinzadeh, S., Nezhad, M. M., Sohani, A., Groppi, D. Techno-Economic Study of a New Hybrid Solar Desalination System for Producing Fresh Water in a Hot–Arid Climate. *Sustainability*. 2021, 13(22), 12676.
28. Anand, B., Shankar, R., Murugavelh, S., Rivera, W., Prasad, K. M., Nagarajan, R. A review on solar photovoltaic thermal integrated desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, 141, 110787.
29. Patel, S. K., Modi, K. V. Techniques to improve the performance of enhanced condensation area solar still: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2020, 268, 122260.
30. Jobrane M, Kopmeier A, Kahn A, Cauchie HM, Kharroubi A., Penny C. Internal and external improvements of wick type solar stills in different configurations for drinking water production– A review. *Groundwater for Sustainable Development*. 2021, 12, 100519.
31. Fathi, N., McDaniel, P., Aleyasin, S. S., Robinson, M., Vorobieff, P., Rodriguez, S., de Oliveira, C. Efficiency enhancement of solar chimney power plant by use of

- waste heat from nuclear power plant. *Journal of cleaner production*. 2018, 180, 407-416.
32. Ralegaonkar, R. V., Gupta, R. Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2010, 14(8), 2238-2242.
33. Mantar, S., Karakılıçık, M. Güneş Işığının Güneş Havuzunda Depolanmasının Teorik Olarak İncelenmesi. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2009, 10(2), 159-163.
34. Sökmen, H. M., Erdallı, Y. Güneş Havuzları. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 1996.
35. Khadiran T, Hussein MZ, Zainal Z, Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: a review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2016, 57, 916–928.
36. Hasnain, S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy conversion and management*. 1998, 39(11), 1127-1138.
37. Ostry, M., Charvat, P. Materials for advanced heat storage in buildings. *Procedia Engineering*. 2013, 57, 837-843.
38. Mondal, S. Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied thermal engineering*. 2008, 28(11-12), 1536-1550.
39. Tan, F. L., Tso, C. P. Cooling of mobile electronic devices using phase change materials. *Applied thermal engineering*. 2004, 24(2-3), 159-169.
40. Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., Smyth, M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and sustainable energy reviews*. 2010, 14(2), 615-628.
41. Feng, P.H., Zhao, B.C., Wang, R.Z. Thermophysical heat storage for cooling, heating, and power generation: A review. *Applied Thermal Engineering*. 2020, 166, 114728.
42. Pasupathy, A., Velraj, R., Seeniraj, R. V. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008, 12(1), 39-64.
43. Javadi, F.S., Metselaar, H.S.C., Ganesan, P. Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. *Solar Energy*. 2020, 206, 330-352.
44. Lin W, Ma Z, Ren H, Liu J, Li K. Solar Thermal Energy Storage Using Paraffins as Phase Change Materials for Air Conditioning in the Built Environment, Paraffin - an Overview. *IntechOpen*. 2019.
45. Douvi, E., Pagkalos, C., Dogkas, G., Koukou, MK., Stathopoulos, VN., Caouris, Y., Vrachopoulos, M. G. Phase change materials in solar domestic hot water systems: A review. *International Journal of Thermofluids*. 2021,10, 100075.
46. Ali, H. M. Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems—A comprehensive review. *Solar Energy*. 2020, 197, 163-198.
47. Alqahtani, S., Ali, H. M., Farukh, F., Silberschmidt, V. V., Kandan, K. Thermal performance of additively manufactured polymer lattices. *Journal of Building Engineering*. 2021, 39, 102243.
48. Shahsavari, A., Entezari, S., Askari, I. B., Ali, H. M. The effect of using connecting holes on heat transfer and entropy generation behaviors in a micro channels heat sink cooled with biological silver/water nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021,123, 104929.

49. Qureshi, F. A., Ahmad, N., Ali, H. M. Heat dissipation in bituminous asphalt catalyzed by different metallic oxide nanopowders. *Construction and Building Materials*. 2021, 276, 122220.
50. Pordanjani, A. H., Aghakhani, S., Afrand, M., Sharifpur, M., Meyer, J. P., Xu, H., Ali, H.M., Karimi, N., Cheraghian, G. Nanofluids: Physical phenomena, applications in thermal systems and the environment effects-a critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 128573.
51. Algarni, S., Mellouli, S., Alqahtani, T., Almutairi, K., Khan, A., Anqi, A. Experimental investigation of an evacuated tube solar collector incorporating nano-enhanced PCM as a thermal booster. *Applied Thermal Engineering*. 2020, 180, 115831.
52. Elarem, R., Alqahtani, T., Mellouli, S., Aich, W., Ben Khedher, N., Kolsi, L., Jemni, A. Numerical study of an Evacuated Tube Solar Collector incorporating a Nano-PCM as a latent heat storage system. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021, 24, 100859.
53. Kumar, P. M., Mylsamy, K. A comprehensive study on thermal storage characteristics of nano-CeO₂ embedded phase change material and its influence on the performance of evacuated tube solar water heater. *Renewable Energy*. 2020, 162, 662–676.
54. Alshukri, M.J., Eidan, A.A., Najim, S.I. The influence of integrated Micro-ZnO and Nano-CuO particles/paraffin wax as a thermal booster on the performance of heat pipe evacuated solar tube collector. *Journal of Energy Storage* 2021, 37, 102506.
55. Abdullah A.S., Omara Z.M., Essa F.A., Younes M.M., Shanmugan S., Abdelgaied M., Amro M.I., Kabeel A.E., Farouk W.M. Improving the performance of trays solar still using wick corrugated absorber, nano-enhanced phase change material and photovoltaics-powered heaters. *Journal of Energy Storage*. 2021, 40, 102782.
56. Pasuphati, P.M., Sudarvizhi, D., Prakash, K.B., Anupradeepa, A.M., Raj, S.B., Shanmathi, S., Sumithra, K., Surya, S. Investigating a single slope solar still with a nano-phase change material. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 45, 7922-7925.
57. Kabeel, A.E., Sathyamurthy, R., Manokar, A.M., Sharshir, S.W., Essa, F.A., Elshiekh, A.H. Experimental study on tubular solar still using Graphene Oxide Nano particles in Phase Change Material (NPCM's) for fresh water production. *Journal of Energy Storage*. 2020, 28, 101204.
58. Fu, Z., Li, Y., Liang, X., Lou, S., Qiu, Z., Cheng, Z., Zhu, Q. Experimental investigation on the enhanced performance of a solar PVT system using micro-encapsulated PCMs. *Energy*. 2021, 228, 120509.
59. Ahmadi, R., Monadinia, F., Maleki M. Passive/active photovoltaic-thermal (PVT) system implementing infiltrated phase change material (PCM) in PS-CNT foam. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2021, 22, 110942.
60. Kazemian, A., Taheri, A., Sardarabadi, A., Ma, T., Passandideh-Fard, M., Peng, J. Energy, exergy and environmental analysis of glazed and unglazed PVT system integrated with phase change material: An experimental approach. *Solar Energy*. 2020, 201, 178-189.
61. Al-Imam, M.F.I., Beg, R.A., Rahman, M.S., Khan, M.Z.H. Performance of PVT Solar Collector with Compound Parabolic Concentrator and Phase Change Materials. *Energy and Buildings*. 2016, 113, 139-144.
62. Tariq, R., Xaman, J., Bassam, A., Ricalde, L.J., Escalante Soberanis, M.A. Multidimensional assessment of a photovoltaic air collector integrated phase

- changing material considering Mexican Climatic conditions. *Energy*. 2020, 209, 118304.
63. Nizetic, S. M. Jurcevic, D. C., Arıcı, M. Hoang, A.T. Implementation of phase change materials for thermal regulation of photovoltaic thermal systems: Comprehensive analysis of design approaches. *Energy*. 2021, 228, 120546.
64. Gaur, A., Ménéz, C., Giroux-Julien, S. Numerical studies on thermal and electrical performance of a fully wetted absorber PVT collector with PCM as a storage medium. *Renewable Energy*. 2017, 109, 168-187.
65. Al-Waeli, A.H.A., Chaichan, M.T., Sopian, K., Kazem, H. A., Mahood, H.B., Khadom, A.A. Modeling and experimental validation of a PVT system using nanofluid coolant and nano-PCM. *Solar Energy*. 2019, 177, 178-191.
66. Al-Waeli, A.H.A., Kazem, H. A., Chaichan, M.T., Sopian, K. Experimental investigation of using nano-PCM/nanofluid on a photovoltaic thermal system (PVT): technical and economic study, *Thermal Science and Engineering Progress*. 2019, 11, 213-230.
67. Al-Waeli, A.H.A., Sopian K., Chaichan, M.T., Kazem, H. A., Ibrahim, A., Ruslan, S.M. Hafidz, M. Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study. *Energy Conversion and Management*. 2017, 151, 693-708.
68. Kazemian, A., Khatibi, M., Maadi, S.R., Ma, T. Performance optimization of a nanofluid-based photovoltaic thermal system integrated with nano-enhanced phase change material. *Applied Energy*. 2021, 295, 116859.
69. Manigandan, S. Kumar, V. Comparative study to use nanofluid ZnO and CuO with phase change material in photovoltaic thermal system. *International Journal of Energy Research*. 2019, 1-10.
70. Siahkamari, L., Rahimi, M., Azimi, N., Banibayat, M. Experimental investigation on using a novel phase change material (PCM) in micro structure photovoltaic cooling system, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019, 100, 60–66.
71. Perea-Moreno, A.-J., Juaidi, A., Manzano-Agugliaro, F. Solar greenhouse dryer system for wood chips improvement as biofuel. *Journal of Cleaner Production*. 2016, 135, 1233–1241.
72. Chauhan, P. S., Kumar, A., Nuntadusit, C. Heat transfer analysis of PV integrated modified greenhouse dryer. *Renewable Energy*. 2018, 121, 53-65.
73. Khanlari, A., Sözen, A., Şirin, C., Tuncer, A.D., Gungor, A. Performance enhancement of a greenhouse dryer: Analysis of a cost-effective alternative solar air heater. *Journal of Cleaner Production*. 2020, 251, 119672.
74. Tuncer, A.D., Sözen, A., Khanlari, A., Amini, A., Şirin, C. Thermal performance analysis of a quadruple-pass solar air collector assisted pilot-scale greenhouse dryer. *Solar Energy*. 2020, 203, 304-316.
75. Chauhan, P. S., Kumar, A. Thermal modeling and drying kinetics of gooseberry drying inside north wall insulated greenhouse dryer. *Applied Thermal Engineering*. 2018, 130, 587–597.
76. Haldorai, S., Gurusamy, S., Pradhapraj, M. A review on thermal energy storage systems in solar air heaters. *International Journal of Energy Research*. 2019, 43(12), 6061-6077.
77. Ayyappan, S., Mayilsamy, K. Solar tunnel drier with thermal storage for drying of copra. *International Journal of Energy Technology and Policy*. 2016, 8(1), 3.

78. Aumporn, O., Zeghmami, B., Chesneau, X., Janjai, S. Numerical study of a solar greenhouse dryer with a phase-change material as an energy storage medium. *Heat Transfer Research*. 2018, 49, 509-528.
79. Ayyappan, S., Mayilsamy, K. Sreenarayanan, V.V. Performance improvement studies in a solar greenhouse drier using sensible heat storage materials. *Heat Mass Transfer*. 2016, 52, 459-467.
80. Pankaew, P., Aumporn, O., Janjai, S., Pattarapanitchai, S., Sangsan, M., Bala, B. K. Performance of a large-scale greenhouse solar dryer integrated with phase change material thermal storage system for drying of chili. *International Journal of Green Energy*. 2020, 17, 1–12.
81. Berroug, F., Lakhel, E.K., El Omari, M., Faraji, M., El Qarnia, H. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall. *Energy and Buildings*. 2021, 43(11), 3027–3035.
82. Sanserwal, M., Singh, A. K., Singh, P. Impact of materials and economic analysis of single slope single basin passive solar still: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020, 21, 1643-1652.
83. Hassan, H. Comparing the performance of passive and active double and single slope solar stills incorporated with parabolic trough collector via energy, exergy and productivity. *Renewable Energy*. 2020, 148, 437-450.
84. Alwan, N.T., Shcheklein, S.E., Ali, O. M. Evaluation of distilled water quality and production costs from a modified solar still integrated with an outdoor solar water heater. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021, 27, 101216.
85. Raj Kamal, M.D., Parandhaman, B. B., Madhu, D.M., Babu, Sathyamurthy, R. Experimental analysis on single and double basin single slope solar still with energy storage material and external heater, *Materials Today: Proceedings*. 2021, 46, 10288-10292.
86. Elbar, A. R. A., Hassan, H. Experimental investigation on the impact of thermal energy storage on the solar still performance coupled with PV module via new integration. *Solar Energy*. 2019, 184, 584–593.
87. Tabrizi, F. F., Dashtban, M., Moghaddam, H. Experimental investigation of a weir-type cascade solar still with built-in latent heat thermal energy storage system. *Desalination*. 2010, 260, 248–253.
88. Benhammou, M. Sahli, Y. Energetic and exergetic analysis of a sloped solar still integrated with a separated heat storage system incorporating phase change material. *Journal of Energy Storage*. 2021, 40, 102705.
89. Vigneswaran, V. S., Kumaresan, G., Dinakar, B. V., Kamal K. K., Velraj, R. Augmenting the productivity of solar still using multiple PCMs as heat energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2019, 26, 101019.
90. Abdelaziz, G.B., Algazzar, A.M., El-Said, E.M.S., Elsaid, A.M., Sharshir, S.W., Kabeel, A.E., El-Behery, S.M. Performance enhancement of tubular solar still using nano-enhanced energy storage material integrated with v-corrugated aluminum basin, wick, and nanofluid. *Journal of Energy Storage*. 2021, 41, 102933.
91. Yang, R., Li, D., Salazar, S.L., Rao, Z., Arıcı, M., Wei, W. Photothermal properties and photothermal conversion performance of nano-enhanced paraffin as a phase change thermal energy storage material. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2021, 219, 110792.
92. Benoudina, B., Attia, M.E.H., Driss, Z., Afzal, A., Manokar, A.M., Sathyamurthy, R. Enhancing the solar still output using micro/nano-particles of aluminum oxide at different concentrations: An experimental study, energy, exergy and economic analysis. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021, 29, e00291.

93. Kandeal., A.W., El-Shafai, N.M., Abdo, M.R., Thakur, A. K., El-Mehasseb, I. M., Maher, I., Rashad, M., Kabeel, A.E., Yang, N., Sharshir, S. W. Improved thermo-economic performance of solar desalination via copper chips, nanofluid, and nano-based phase change material. *Solar Energy*. 2021, 224, 1313-1325.
94. Yang, L., Huang, J., Zhou, F. Thermophysical properties and applications of nano-enhanced PCMs: An update review. *Energy Conversion and Management*. 2020, 214, 112876.
95. Tyagi, V. V., Pandey, A. K., Giridhar, G., Bandyopadhyay, B., Park, S. R., Tyagi, S. K. Comparative study based on exergy analysis of solar air heater collector using thermal energy storage. *International Journal of Energy Research*. 2012, 36, 724-736.
96. Tariq, S.L., Ali, H.M., Akram, M.A., Janjua, M.M., Ahmadlouydarab, M. Nanoparticles enhanced Phase Change Materials (NePCMs)-A Recent Review. *Applied Thermal Engineering*. 2020, 176, 115305.
97. Singh D.K., S. Suresh, H. Singh, B.A.J. Rose, S. Tassou, N. Anantharaman, Myoinositol based nano-PCM for solar thermal energy storage. *Appl. Therm. Eng.* 2017, 110, 564–572.
98. Teng T.P., Yu C.C. Characteristics of phase-change materials containing oxide nano-additives for thermal storage. *Nanoscale Res. Lett.* 2012, 7, 611.
99. Karaağaç M.O., Ergün, A., Ağbulut, Ü., Gürel, A.E., Ceylan, İ. Experimental analysis of CPV/T solar dryer with nano-enhanced PCM and prediction of drying parameters using ANN and SVM algorithms. *Solar Energy*. 2021, 218, 57-67.
100. Ghadamgahi, M., Ahmadi-Danesh-Ashtiani, H., Delfani, S. Comparative study on the multistage solar still performance utilizing PCM in variable thicknesses. *International Journal of Energy Research*. 2020, 44, 4196-4210.
101. General Directorate of Renewable Energy of Turkey, available at: www.yegm.gov.tr
102. Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. 2006, 15, 259–263.
103. Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007, 4, 439-473.
104. Khanlari, A., Sözen, A., Afshari, F., Tuncer, A.D. Energy-exergy and sustainability analysis of a PV-driven quadruple-flow solar drying system. *Renewable Energy*. 2021, 175, 1151-1166.
105. Çiftçi, E., Khanlari, A., Sözen, A., Aytaç, İ., Tuncer, A. D. Energy and exergy analysis of a photovoltaic thermal (PVT) system used in solar dryer: A numerical and experimental investigation. *Renewable Energy*. 2021, 180, 410-423.
106. Afshari, F., Sözen, A., Khanlari, A., Tuncer, A.D., Şirin, C. Effect of turbulator modifications on the thermal performance of cost-effective alternative solar air heater. *Renewable Energy*, 2020, 158, 297-310.
107. Afshari, F., Khanlari, A., Tuncer, A.D., Sözen, A., Şahinkesen, İ., Di Nicola G. Dehumidification of sewage sludge using quonset solar tunnel dryer: an experimental and numerical approach. *Renewable Energy*. 2021, 171, 784-798.
108. Granstrom, M., Petritsch, K., Arias, A. C., Lux, A. Andersson M. R., Friend, R. H. Laminated fabrication of polymeric photovoltaic diodes. *Nature*. 1998, 395, 257–260.

109. Güler, H.Ö., Sözen, A., Tuncer, A.D., Afshari, F., Khanlari, A., Şirin, C., Gungor, A. Experimental and CFD survey of indirect solar dryer modified with low-cost iron mesh. *Solar Energy*. 2020, 197, 371-384.
110. Park, S. R., Pandey, A. K., Tyagi, V.V., Tyag, S. K. Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, 30, 105-123
111. Said, Z., Saidur, R., Rahim, N.A., Alim, M.A. Analyses of exergy efficiency and pumping power for a conventional flat plate solar collector using SWCNTs based nanofluid. *Energy and Buildings*. 2014, 78, 1–9.
112. Çengel, Y.A., Boles, M.A. *Thermodynamics: An engineering approach*, McGraw-Hill, NY. 1994.
113. Dincer, I., Rosen, M.A. *Exergy: Energy, environment and sustainability*. Amsterdam: Elsevier. 2007.
114. Chowdhury, M.M.I., Bala, B.K., Haque, M.A. Energy and exergy analysis of the solar drying of jackfruit leather. *Biosystems Engineering*. 2011, 110, 222-229.
115. Petela, R. Exergy of undiluted thermal radiation. *Solar Energy*. 2003, 74, 469-488.
116. Ismaeel, H. H., Yumrutaş, R. Thermal performance of a solar-assisted heat pump drying system with thermal energy storage tank and heat recovery unit. *International Journal of Energy Research*. 2020, 44, 3426-3445.
117. Bispo, J. A. C., Bonafe, C. F. S., Santana, K. M. O. V., Santos, E. C. A. A comparison of drying kinetics based on the degree of hydration and moisture ratio. *LWT - Food Science and Technology*. 2015, 60, 192–198.
118. Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., Madadlou, A. Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. *Biosyst. Eng*. 2012, 111, 229–241.
119. Samimi Akhijani, H., Arabhosseini, A., Kianmehr, M. H. Effective moisture diffusivity during hot air solar drying of tomato slices. *Research in Agricultural Engineering*. 2016, 62, 15–23.
120. Hassan, H., Abo-Elfadl, S. Effect of the condenser type and the medium of the saline water on the performance of the solar still in hot climate conditions. *Desalination*. 2017, 417, 60–68.
121. Yousef, M.S., Abdel Rahman, A.K., Ookawara, S. Performance investigation of low – Concentration photovoltaic systems under hot and arid conditions: Experimental and numerical results. *Energy Convers. Manag.* 2016, 128, 82-94.
122. Deniz, E. Energy and exergy analysis of flat plate solar collector-assisted active solar distillation system. *Desalin. Water Treat.* 2016, 57, 24313–24321.
123. Torchia-Núñez, J.C., Porta-Gándara, M.A., Cervantes-de Gortari, J.G. Exergy analysis of a passive solar still. *Renew. Energy*. 2018, 33,608–616.
124. Bait, O. Exergy, environ–economic and economic analyses of a tubular solar water heater assisted solar still, *J. Clean. Prod.* 2019, 212, 630–646.
125. Mugi, V.R., Chandramohan, V.P. Energy and exergy analysis of forced and natural convection indirect solar dryers: Estimation of exergy inflow, outflow, losses, exergy efficiencies and sustainability indicators from drying experiments. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 282, 124421.
126. Kumar, R., Praveen, P., Gupta, S., Saikiran, J., Bharj, R. S. Performance evaluation of photovoltaic module integrated with phase change material-filled container with external fins for extremely hot climates. *Journal of Energy Storage*. 2020, 32, 101876.

127. Mohammed, M., Dawood, K., Nabil, T., Kabeel, A.E., Shehata, A.I., Abdalla, A.A., Elnaghi, B. E. Experimental study of productivity progress for a solar still integrated with parabolic trough collectors with a phase change material in the receiver evacuated tubes and in the still. *Journal of Energy Storage*. 2020, 32, 102007.
128. Ceylan, İ., Gürel, A. E. Solar-assisted fluidized bed dryer integrated with a heat pump for mint leaves. *Applied Thermal Engineering*. 2016, 106, 899–905.
129. Chaibi, Y., Malvoni, M., El Rhafiki, T., Kousksou, T., Zeraouli, Y. Artificial neural-network based model to forecast the electrical and thermal efficiencies of PVT air collector systems. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021, 4, 100132.
130. Widyolar, B. L., Jiang, J. Brinkley, S.K. Hota, J. Ferry, G. Diaz, , R Winston, Experimental performance of an ultra-low-cost solar photovoltaic-thermal (PVT) collector using aluminum minichannels and nonimaging optics. *Applied Energy*. 2020, 268, 114894.
131. Gholampour, M., Ameri, M., Samani, M.S. Experimental study of performance of Photovoltaic–Thermal Unglazed Transpired Solar Collectors (PV/UTCs): Energy, exergy, and electrical-to-thermal rational approaches. *Solar Energy*. 2014, 110, 636–647.
132. Tiwari, A., Dubey, S., Sandhu, G.S., Sodha, M.S., Anwar, S.I. Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes. *Applied Energy*. 2009, 86, 2592-2597.
133. Evola, G. Marletta, L. Exergy and thermoeconomic optimization of a water-cooled glazed hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collector. *Solar Energy*. 2014, 107,12–25.
134. Gholampour, M., Ameri, M. Energy and exergy analyses of Photovoltaic/Thermal flat transpired collectors: experimental and theoretical study. *Appl Energy*. 20016, 164, 837-856.
135. Nayak, S., Tiwari, GN. Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse. *Energy Build*. 2008, 40, 2015-2021.
136. Sarhaddi, F., Farahat, S., H, Ajam., Behzadmehr, A. Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Energy Build*. 2010, 42, 2184-2199.
137. Wu, S.Y., Zhang, Q.L., Xiao, L., Guo, F.H. A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation. *Energy Build*. 2011, 43, 3558-3567.
138. Gang, P. F., Huide, Z., Tao, J., Jie, A. numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system. *Sol Energy*. 2011, 85, 911-921.
139. Jahromi, S.N., Vadiee, A., Yaghoubi, M. Exergy and economic evaluation of a commercially available PV/T collector for different climates in Iran. *Energy Proc*. 2015, 75, 444-456.
140. Hazami, M., Riahi, A., Mehdaoui, F., Nouicer O., Farhat, A. Energetic and exergetic performances analysis of a PV/T (photovoltaic thermal) solar system tested and simulated under to Tunisian (North Africa) climatic conditions. *Energy*. 2016, 107, 78–94.
141. Fudholi, A., Zohri, M., Jin, G.L., Ibrahim, A., Yen, C.H., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Sopian, K. Energy and exergy analyses of photovoltaic thermal collector with V-groove. *Solar Energy*. 2018, 159,742–50.
142. Salem, M.R., Ali, R.K., Elshazly, K.M. Experimental investigation of the performance of a hybrid photovoltaic/thermal solar system using aluminium cooling plate with straight and helical channels. *Sol Energy*. 2017,157,147–156.

143. Khanjari, Y., Pourfayaz, F., Kasaeian, A.B. Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system. *Energy Convers Manag.* 2016, 122, 263-278 .
144. Nahar, A., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A. A three-dimensional comprehensive Numerical investigation of different operating parameters on the performance of a photovoltaic thermal system with Pancake collector. *J Sol Energy Eng.* 2017, 139, 031009.
145. Mishra, R.K., Tiwari, G.N. Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal water collector for constant collection temperature mode. *Solar Energy.* 2013, 90, 58-67.
146. Agrawal, S., Tiwari, G.N., Pandey, H.D. Indoor experimental analysis of glazed hybrid photovoltaic thermal tiles air collector connected in series. *Energy Build.* 2012, 53, 145-151.
147. Rajoria, CS., Agrawal, S., Tiwari, G. N., Chaurasia, G.S. Exergetic and enviroeconomic analysis of semitransparent PVT array based on optimum air flow configuration and its comparative study. *Solar Energy.* 2015, 122, 1138-1145.
148. Ibrahim, A., Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M.Y., Ruslan, M.H. Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system. *Energy Convers Manag.* 2014, 77, 527-534.
149. Lari, M.O. Sahin. A.Z. Design, performance and economic analysis of a nanofluidbased photovoltaic/thermal system for residential applications. *Energy Convers Manag.* 2017, 149, 467-484
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.045>.
150. Cabral, D., Gomes, J., Hayati, A., Karlsson, B. Experimental investigation of a CPVT collector coupled with a wedge PVT receiver. *Solar Energy.* 2021, 215, 335-345.
151. El Hocine, H.B.C. Theoretical and experimental studies of a new configuration of photovoltaic – thermal collector, *J Sol Energy Eng.* 2017, 139, 021012
152. Hui, L., Tin-Tai, C., Jie. J. Building-integrated heat pipe photovoltaic/thermal system for use in Hong Kong. *Sol Energy.* 2017, 155,1084-1091
153. Tonui, J.K., Tripanagnostopoulos, Y. Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Sol Energy.* 2007, 81 ,498-511.
154. Bambrook, S.M., Sproul. A.B. Maximising the energy output of a PVT air system. *Solar Energy.* 2012, 86 1857-1871
155. Singh, S., Agarwal, S., Tiwari, G.N., Chauhan, D. Application of genetic algorithm with multi-objective function to improve the efficiency of glazed photovoltaic thermal system for new Delhi (India) climatic condition. *Solar Energy.* 2015, 117, 153-166.
156. Slimani M.E.A., Amirat, M. I., Kurucz, S., Bahria, A., Hamidat, W.B., Chaouch, A. detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions. *Energy Conversion and Management.* 2017, 133, 458-476.
157. Shahsavari., Ameri, A. M. Experimental investigation and modeling of a direct-coupled PV/T air collector. *Solar Energy.* 2010, 84, 1938–1958
158. Mishra, L., Sinha, A., Gupta, R. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of greenhouse dryer in no-load condition. *Sustainable Energy Technologies and Assessments.* 2021, 45, 101186

159. Dorouzi M., Mortezaipoor H., Akhavan H.R. , Moghaddam A.G. Tomato slices drying in a liquid desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system, *Solar Energy*. 2018, 162 364-371.
160. Gupta, A., Biswas, A., Das, B., Reddy, B. V. Development and testing of novel photovoltaic-thermal collector-based solar dryer for green tea drying application. *Solar Energy*. 2022, 231 1072-1091.
161. Shanmugam V., Natarajan E. Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renew Energy*. 2006, 31 1239-1251.
162. Fudholi A., Sopian, K., Alghoul, M.A., Ruslan, M.H., Othman, M.Y. Performances and improvement potential of solar drying system for palm oil fronds. *Renewable Energy*. 2015, 78 561-565.
163. Mohanraj M., Chandrasekar, P. Comparison of drying characteristics and quality of copra obtained in a forced convection solar drier and sun drying. *J Sci Ind Res*. 2008, 67 381-385.
164. Sözen A., Şirin, C., Khanlari, A. Tuncer A.D., Gürbüz E.Y. Thermal performance enhancement of tube-type alternative indirect solar dryer with iron mesh modification. *Solar Energy*. 2020, 207 1269-1281.
165. Mohanraj M., Chandrasekar P. Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage material for chili drying. *J Eng Sci Technol*. 2009, 4, 305-314.
166. Chapchaimoh, K., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Morris, J.. Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying. *Applied Thermal Engineering*. 2016, 95(25), 491-498.
167. Pal, U. S., Khan, M. K., Mohanty, S. N., 2010. Heat Pump Drying of Green Sweet Pepper. *Drying Technology*, 26(12), 1584-1590
168. Mujumdar, A. S., Jangam, S. V., 2013. Some Innovative drying technologies for dehydration of foods. In: *Advances in Drying Science and Technology* . Singapore: 786 CRC press, 47-59.
169. Bórquez, R., Melo, D., Saavedra, C. Microwave–Vacuum Drying of Strawberries with Automatic Temperature Control. *Food and Bioprocess Technology*. 2015, 8(2), 266-276.
170. Chaichan, M. T., Kazem, H. A. Single slope solar distillator productivity improvement using phase change material and Al₂O₃ nanoparticle. *Solar Energy*. 2018, 164, 370–381.
171. Zanganeh, P., Goharrizi, A. S., Ayatollahi, S., Feilizadeh, M. Nano-coated condensation surfaces enhanced the productivity of the single-slope solar still by changing the condensation mechanism. *Journal of Cleaner Production*. 2020, 265, 121758.
172. Sahota, L., Tiwari., G.N. Effect of Al₂O₃ nanoparticles on the performance of passive double slope solar still. *Solar Energy*. 2016,130, 260–272.
173. Kabeel, A.E., Omara, Z.M., Essa, F.A. Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: an experimental approach. *Energy Conversion Management*. 2014, 78 493–508.
174. Elango, T., Kannan, A., Murugavel, K. K. Performance study on single basin single slope solar still with different water nanofluids. *Desalination*. 2015, 360, 45–51.
175. Nijmeh, S., Odeh, S., Akash, B. Experimental and theoretical study of a single-basin solar still in Jordan. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2005, 32 565–572.

176. Dumka P., Sharma, A., Kushwah, Y., Raghav, A. S., Mishra, D. R. Performance evaluation of single slope solar still augmented with sand-filled cotton bags. *Journal of Energy Storage*. 2019, 25, 100888.
177. Hassan, H., Yousef, M., Fathy, SM., Ahmed, M. S. Impact of condenser heat transfer on energy and exergy performance of active single slope solar still under hot climate conditions. *Solar Energy*. 2020, 204 ,79–89.
178. Tuly, S. S., Rahman, M. S., Sarker, M. R., Beg, I. R. A. Combined influence of fin, phase change material, wick, and external condenser on the thermal performance of a double slope solar still. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 287, 125458.
179. Vigneswaran, V. S., Kumar, P. G., Sakthivadivel, D., Balaji, K., Meikandan, M., Dinakar, B. V., Kumaresan, G. Energy, Exergy, and Economic analysis of low thermal conductivity basin solar still integrated with Phase Change Material for energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2012, 34, 102194.
180. Kianifar, A., Heris, S.Z., Mahian, O. Exergy and economic analysis of a pyramid-shaped solar water purification system: Active and passive cases. *Energy*. 2012, 38, 31-36.

