



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DÜZLEMSEL TERMAL GÜNEŞ
KOLEKTÖRLERİNDE TEMEL TASARIM
PARAMETRELERİNİN VERİM ÜZERİNDE
ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL
İNCELENMESİ**

Ekrem ÖZDEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı

Ekim-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ekrem Özden tarafından hazırlanan “Düzlemsel Termal Kolektörlerinde Temel Tasarım Parametrelerinin Verim Üzerinde Etkilerinin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi” adlı tez çalışması 21/10/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Muharrem Hilmi AKSOY

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan KAYA

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Rıza BÜYÜKZEREN

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ekrem ÖZDEN

Tarih: 21.10.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜZLEMSEL TERMAL GÜNEŞ KOLEKTÖRLERİNDE TEMEL TASARIM PARAMETRELERİNİN VERİM ÜZERİNDE ETKİLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Ekrem ÖZDEN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan KAYA

2025, 50 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan KAYA

Doç. Dr. Muharrem Hilmi AKSOY

Dr. Öğr. Üyesi Rıza BÜYÜKZEREN

Bu çalışmada, düzlemsel güneş kolektörlerinin ısı performansını etkileyen temel tasarım ve işletme parametreleri hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında TRNSYS yazılımında oluşturulan kolektör modeli, farklı koşullarda test edilen düzlemsel kolektörden elde edilen deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında güçlü bir uyum gözlenmiş, maksimum sapma yaklaşık %4 olarak belirlenmiştir. Analizler, debi, giriş suyu sıcaklığı, ortam sıcaklığı, boru çapı, soğuruculuk, yayıcılık, plaka-cam aralığı ile yalıtım malzemesi ve kalınlığı gibi parametrelerin kolektör verimi üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde ortaya koymuştur. Sonuçlar, en yüksek verimin 175–225 kg/h debi aralığında ve 30–34°C ortam sıcaklıklarında elde edildiğini göstermektedir. 175 kg/h debide kolektör verimi %81,2, 34°C ortam sıcaklığında ise %84,1 olarak hesaplanmıştır. Soğuruculuk ile kolektör verimi arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüş, soğuruculuk oranının 0,60'tan 0,95'e yükselmesiyle termal verimin %48,4'ten %81,2'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Yayıcılık oranının 0,05'ten 0,40'a çıkması verimde yaklaşık %8,3'lük bir azalmaya yol açmıştır; ancak bu etkinin soğuruculuk artışına kıyasla daha zayıf olduğu görülmüştür. Ayrıca, ısı iletkenlik katsayısı 0,015–0,050 W/m·K aralığında değişen farklı yalıtım malzemelerin simülasyonları, 50 mm yalıtım kalınlığında %82'ye ulaşan bir verim elde edildiğini, 45 mm üzerindeki kalınlıklarda verim artışının ihmal edilebilir seviyede olduğunu göstermiştir. Plaka-cam aralığının 13 mm olduğu durumda ise en yüksek verim değerine ulaşılmıştır. Elde edilen bulgular, kolektörün geometrik ve malzeme özelliklerinin ısı performans üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve özellikle debi, soğuruculuk ve yalıtım kalınlığı gibi parametrelerin tasarım açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca bu çalışma, TRNSYS yazılımının düzlemsel güneş kolektörlerinin ısı ve tasarımsal performanslarının tahmininde güvenilir bir araç olduğunu göstermekte ve yüksek verimli termal güneş kolektörlerinin tasarımına yönelik bir referans sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Düzlemsel güneş kolektörü, TRNSYS, deneysel doğrulama, ısı verim, tasarım parametreleri

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF KEY DESIGN PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF FLAT-PLATE SOLAR THERMAL COLLECTORS

Ekrem ÖZDEN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet Numan KAYA

2025, 50 Pages

Jury

**Asst. Prof. Dr. Mehmet Numan KAYA
Assoc. Prof. Dr. Muharrem Hilmi AKSOY
Asst. Prof. Dr. Rıza BÜYÜKZEREN**

This study presents an experimental and numerical investigation of the key design and operating parameters influencing the thermal performance of flat-plate solar thermal collectors. A TRNSYS-based model was developed and validated against experimental data obtained from a flat-plate collector set tested under various conditions. Strong agreement was observed between the measured and simulated results, with a maximum deviation of approximately 4%. The analysis comprehensively examined the influence of parameters such as flow rate, inlet water temperature, ambient temperature, pipe diameter, absorptance, emissivity, plate-to-glass spacing, and insulation material and thickness on collector efficiency. The results showed that the highest performance occurred at flow rates between 175–225 kg/h and ambient temperatures of 30–34°C, corresponding to efficiencies of 81.2% at 175 kg/h and 84.1% at 34°C. A linear relationship between absorptance and efficiency was identified, with efficiency increasing from 48.4% at 0.60 absorptance to 81.2% at 0.95 absorptance. Increasing the emissivity from 0.05 to 0.40 resulted in an 8.3% reduction in efficiency; however, its negative effect was less significant than the positive impact of absorptance. Simulations performed with insulation materials of thermal conductivity coefficients ranging from 0.015 to 0.050 W/m·K revealed that maximum efficiency of approximately 82% was achieved at 50 mm insulation thickness, with negligible improvements beyond 45 mm. Additionally, the highest performance among all tested configurations was obtained at a plate-to-glass spacing of 13 mm. The results demonstrate that the geometric and material properties of the collector have a substantial effect on thermal efficiency, highlighting flow rate, absorptance, and insulation thickness as critical parameters for the design. The validated TRNSYS model proved to be a reliable tool for predicting the thermal and design-dependent performance of solar collectors, offering valuable insights for improving the energy efficiency and sustainability of solar thermal systems.

Keywords: Flat-plate solar collector, TRNSYS, experimental validation, thermal efficiency, design parameters

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, yenilenebilir enerji sistemlerinin etkinliğini artırmaya yönelik yürütülen kapsamlı bir araştırmanın ürünüdür. Çalışma sürecinde hem deneysel hem de sayısal analizlerin birlikte yürütülmesi, uzun soluklu ve disiplinli bir çabanın sonucu olmuştur.

Öncelikle, tez süreci boyunca akademik bilgi birikimi, yönlendirmeleri ve desteğiyle çalışmanın her aşamasında yol gösterici olan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan KAYA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisi, araştırmanın bilimsel derinliğini ve disiplinini kazandırmada büyük katkı sağlamıştır.

Ayrıca tez konusunun şekillenmesi ve deneysel süreçlerin yürütülmesinde sağladıkları imkanlar, teknik destek ve teşvik edici yaklaşımları için Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

Tez süreci boyunca her zaman yanımda olan, sabrı, anlayışı ve manevi desteğiyle beni motive eden sevgili eşime en derin teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmanın tamamlanmasında onun desteği büyük bir güç kaynağı olmuştur.

Çalışma boyunca özellikle deneysel çalışmalarda bana destek olan Solimpeks Enerji firmasına çok teşekkür ederim.

Son olarak, çalışmam süresince bana destek olan aileme ve dostlarıma da teşekkür ederim.

Ekrem ÖZDEN
Konya, 2025

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Dünya termal kurulu gücü (IRENA - International Renewable Energy Agency, 2025).....	2
Şekil 1.2. Ülkelere göre termal kurulu güç sıralaması (IRENA - International Renewable Energy Agency, 2025)	2
Şekil 1.3. Türkiye aylara göre ışıınım değerleri (Enerji Bakanlığı, 2025)	3
Şekil 1.4. Türkiye aylara göre güneşlenme süreleri (Enerji Bakanlığı, 2025).	4
Şekil 1.5. Türkiye güneş haritası (Enerji Bakanlığı, 2025).	4
Şekil 3.1. Güneş ışıınım spektrumu (O’Kane, 2025).....	10
Şekil 3.2. Güneş ışıınım üç yaygın hali (O’Kane, 2025).....	11
Şekil 3.3. Düzlemsel güneş kollektör yapısı (Solimpeks, 2025).	15
Şekil 3.4. Bakır boru kesimi.	21
Şekil 3.5. Hazırlanan toplayıcı boruların resmi.	21
Şekil 3.6. Boruların birleştirilmesi işlemi.....	22
Şekil 3.7. Endüstriyel lazer kaynak.	23
Şekil 3.8. Yalıtım ve cam birleşimi.	24
Şekil 3.9. TRNSYS ortamında modelleme şeması.....	29
Şekil 3.10. (a) Deney düzeneğinin şematik gösterimi (b) kollektörler (solda) ve sıcak su deposu (sağda).	31
Şekil 4.1. Giriş suyu sıcaklığının kollektör verimine etkisi (deneysel: mavi noktalı çizgi, sayısal: kırmızı düz çizgi).	33
Şekil 4.2. Ortam sıcaklığının kollektör verimine etkisi (deneysel: mavi noktalı çizgi, sayısal: kırmızı düz çizgi).	34
Şekil 4.3. Debinin kollektör verimine etkisi (deneysel: mavi noktalı çizgi, sayısal: kırmızı düz çizgi).	35
Şekil 4.4. Boru çapının kollektör verimine etkisi.	36
Şekil 4.5. Soğuruculuk oranının kollektör verimine etkisi.	37
Şekil 4.6. Yayıcılığın kollektör verimine etkisi.	38
Şekil 4.7. Plaka–cam arası mesafesinin kollektör verimine etkisi.....	39
Şekil 4.8. Yalıtım kalınlığının kollektör verimine etkisi.	39

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Çeşitli emici yüzey kaplamalarının özellikleri ve yaklaşık maliyetleri.....	19
Çizelge 3.2. Çeşitli yalıtım malzemelerinin özellikleri ve yaklaşık maliyetleri.....	20
Çizelge 3.3. Düzlemsel güneş kolektörünün teknik özellikleri.	27
Çizelge 3.4. Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanların teknik özellikleri.	27
Çizelge 3.5. Ölçüm ve kontrol ekipmanlarının teknik özellikleri.	28
Çizelge 3.6. Termal kolektör deneyinin belirsizlik analizi.	28
Çizelge 3.7. TRNSYS’de tanımlanan düzlemsel güneş kolektörünün başlangıç teknik parametreleri.	29



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Güneş Enerjisinin Kullanımı ile İlgili Temel Kavramlar	9
3.1.1. Deklinasyon Açısı.....	11
3.1.2. Zenit açısı.....	12
3.1.3. Saat açısı	12
3.1.4. Azimut açısı	12
3.2. Düzlemsel Güneş Kollektörü.....	13
3.2.1. Düzlemsel güneş kolektörlerinin kullanım alanları	13
3.2.2. Düzlemsel güneş kolektörü yapısı	15
3.2.3. Malzeme özellikleri ve yaklaşık maliyetleri	19
3.2.4. Kollektör üretimi.....	20
3.2.5. Güneş kolektörünün ısı analiz denklemleri	24
3.3. Termal Kollektör Deneyleri ve Simülasyonu	26
3.3.1. Kullanılan düzlemsel güneş kolektörü.....	26
3.3.2. DeneySEL düzende kullanılan diğer ekipmanlar	27
3.3.3. DeneySEL belirsizlik analizi	28
3.3.4. TRNSYS ile termal kolektörün modellenmesi	29
3.3.5. Deney düzeneği.....	31
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	33
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	40
5.1 Sonuçlar	40
5.2. Öneriler	41
6. KAYNAKLAR	42

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Kolektör yüzey alanı	m^2
c_p	Akışkanın özgül ısı kapasitesi	$J/kg \cdot K$
$\dot{m}$	Kütleli debi	kg/s
Q_u	Yararlı ısı kazancı	W
Q_k	Isı kaybı	W
I	Güneş ışınımı (ışınım şiddeti)	W/m^2
T_{in}	Giriş sıcaklığı	$^{\circ}C$
T_{out}	Çıkış sıcaklığı	$^{\circ}C$
T_o	Ortam sıcaklığı	$^{\circ}C$
$T_{p,m}$	Ortalama plaka sıcaklığı	$^{\circ}C$
U_L	Toplam ısı kayıp katsayısı	$W/m^2 \cdot K$
τ	Cam geçirgenlik katsayısı	—
α	Absorber yüzey soğurma katsayısı	—
η	Kolektör verimi	—
COP	Performans katsayısı	—
F_R	Kolektör ısı uzaklaştırma faktörü	—
$\dot{Q}$	Isıl güç (ısı transfer hızı)	W
ΔP	Basınç farkı	Pa

Kısaltmalar

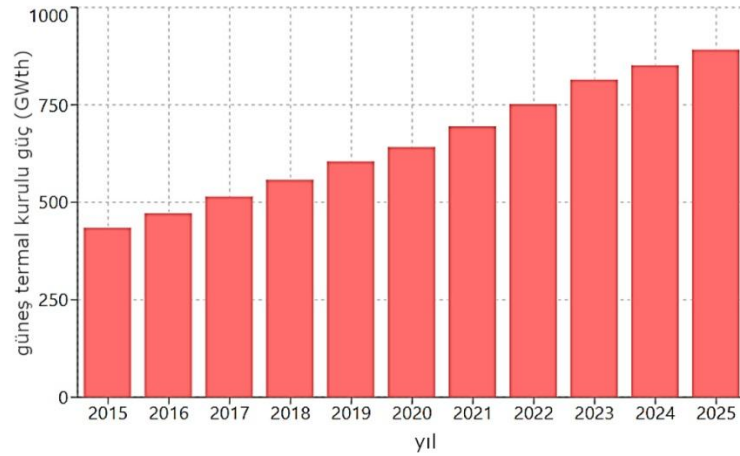
SAHP	Güneş Destekli Isı Pompası (Solar Assisted Heat Pump)
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
PV	Fotovoltaik (Photovoltaic)
TES	Thermal Energy Storage (Isıl Enerji Depolama)
DHW	Evsel Sıcak Su (Domestic Hot Water)
PI	Performans İndeksi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla artan enerji talebi ile fosil yakıtlara bağımlılığın yol açtığı çevresel olumsuzluklar, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin ve yaygın kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Sanayileşme, kentleşme ve yaşam standartlarındaki yükseliş enerji gereksinimini artırırken; fosil yakıt rezervlerinin sınırlılığı ve karbon emisyonlarının iklim değişikliğine katkısı, enerji üretiminde sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesini öncelikli hale getirmektedir. Günlük hayatta tüketilen enerji; kimyasal, nükleer, mekanik, termal, jeotermal, hidrolik, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi farklı biçimlerde ortaya çıkmakta ve çeşitli yöntemlerle birbirine dönüştürülebilmektedir (Kaya, Aksoy ve Kose, 2017). Fosil yakıtlar ve nükleer kaynaklar yenilenemez olarak sınıflandırılırken, yenilenebilir kaynaklar doğada kendini yenileyebilme özelliği ile uzun vadede tükenmeden kullanılabilir. Son yıllarda birçok ülke, ekonomik büyüme, enerji arz güvenliği ve çevresel sürdürülebilirliği eş zamanlı ele alan “3E” yaklaşımına (Economy – Energy – Environment) odaklanmaktadır; temel amaç, ekonomik kalkınmayı sürdürürken enerji güvenliğini temin etmek ve çevresel etkileri minimize etmektir. (Dağ,2015)

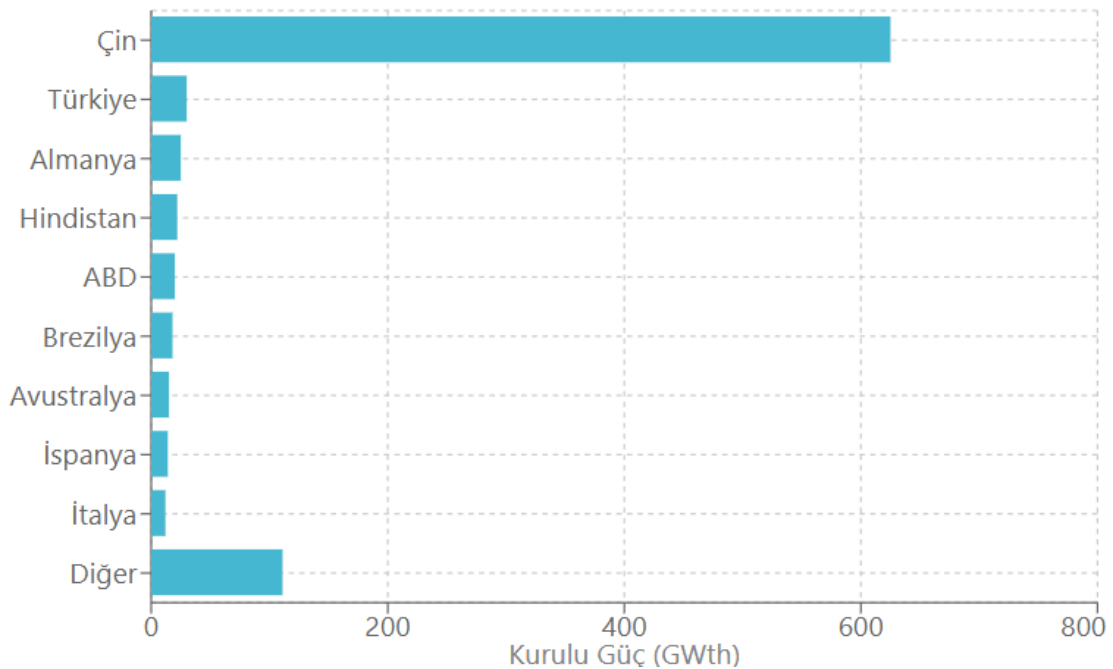
Yenilenebilir enerji seçenekleri arasında rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve güneş enerjisi öne çıkmaktadır. Bu kaynaklar içinde güneş enerjisi, temiz, sürdürülebilir ve ekonomik bir çözüm olması nedeniyle özellikle ön plana çıkmakta ve birçok ülke enerji politikalarını bu doğrultuda yeniden şekillendirmektedir. Güneş enerjisinden yararlanma yöntemleri aktif ve pasif sistemler olarak sınıflandırılır; aktif sistemler fotovoltaik paneller ve termal kolektörler gibi teknolojileri kapsar. Isı üretimine yönelik uygulamalarda termal kolektörler yaygın olarak kullanılmakta; kolektörler aracılığıyla elde edilen ısı enerjisi, konut ısıtması, sıcak su temini, endüstriyel prosesler ve tarımsal kurutma gibi çeşitli alanlarda değerlendirilmektedir.

Küresel ölçekte güneş termal enerjisi kapasitesi son yıllarda belirgin bir artış göstermiştir. Şekil 1.1’de 2015–2025 dönemi dünya termal güç kapasitesindeki değişim gösterilmiştir (IRENA - International Renewable Energy Agency, 2025). Bu verilere göre 2015 yılında yaklaşık 435 GW olan küresel termal kapasite, on yıl içinde istikrarlı bir büyüme kaydederek 2025’te yaklaşık 892 GW’a ulaşmıştır. Bu hızlı artış, güneş termal teknolojilerinin küresel enerji dönüşümündeki rolünü ve yenilenebilir hedeflerine katkısını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 1.1. Dünya termal kurulu gücü (IRENA - International Renewable Energy Agency, 2025).

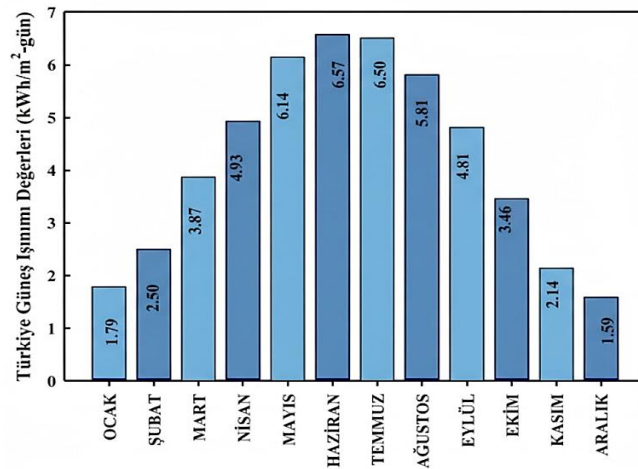
Aynı dönemde küresel pazar dinamiklerinde de önemli gelişmeler gözlenmiştir: Çin, dünya güneş termal kurulumlarının yaklaşık %70'ini gerçekleştirerek liderliği sürdürmüştür; Avrupa'da ise Almanya, Avusturya ve İspanya gibi ülkelerde güneş termal uygulamaları yaygınlaşmıştır. Türkiye, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi 2025 yılı itibarıyla dünya sıralamasında ilk 5 ülke arasında yer almakta ve toplam 30 GW kurulu güneş termal kapasitesiyle bölgesel bir lider haline gelmiştir (IRENA - International Renewable Energy Agency, 2025).



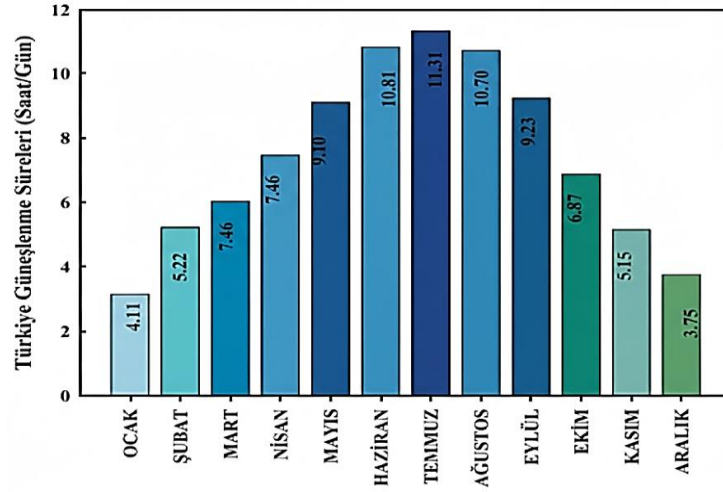
Şekil 1.2. Ülkelere göre termal kurulu güç sıralaması (IRENA - International Renewable Energy Agency, 2025)

2015–2025 dönemindeki hızlı büyümenin temel sebepleri arasında teknolojiye kaydedilen ilerlemeler ve bunun getirdiği verimlilik artışları, kurulum maliyetlerindeki düşüşler (bazı durumlarda %40’a varan azalma), iklim politikaları ve teşvikler, enerji verimliliği standartlarının yaygınlaşması ile konut ve sanayi sektöründeki artan talep sayılabilir. COVID-19 pandemisinin neden olduğu geçici yavaşlamadan sonra büyüme 2022’den itibaren yeniden hız kazanmış; 2023–2025 döneminde yıllık ortalama büyüme yaklaşık %8,5 düzeyine ulaşmıştır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki yaygınlaşma ve büyük ölçekli endüstriyel uygulamalardaki artış bu büyümeyi tetiklemiştir. 2025 sonu itibarıyla küresel 892 GW’lık kapasitenin yıllık yaklaşık 750 TWh ısı enerjisi ürettiği ve bunun yaklaşık 85 milyon ton CO₂ emisyonunun önlenmesine katkı sağladığı tahmin edilmektedir.

Türkiye, güneş termal enerjisinde dünya çapında önemli bir aktör konumundadır. 2025 yılı verilerine göre ülkemiz dünya sıralamasında üst sıralarda yer almakta; kurulu gücü yaklaşık 30 GWth, dünya payı yaklaşık %3.4, Avrupa’daki konumu ise birinci sıra olarak raporlanmıştır. Kişi başına düşen kurulu kapasite yaklaşık 350 Wth/kişi düzeyindedir. Türkiye’nin bu güçlü konumunda, yüksek güneş potansiyeli ve kolektör üreticisi firma sayısının fazlalığı önemli rol oynamaktadır. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4’te sırasıyla Türkiye’nin aylara göre ortalama ışıınım değerleri ve güneşlenme süreleri gösterilmektedir (Enerji Bakanlığı, 2025). Enerji Bakanlığı verilerine göre Türkiye’nin yıllık ortalama toplam güneş ışıınımı şiddeti yaklaşık 1.527 kWh/m²·yıl (günlük ortalama 4.18 kWh/m²), ortalama yıllık güneşlenme süresi ise yaklaşık 2.741 saat (günlük ortalama 7.5 saat) olarak hesaplanmıştır (Enerji Bakanlığı, 2025).

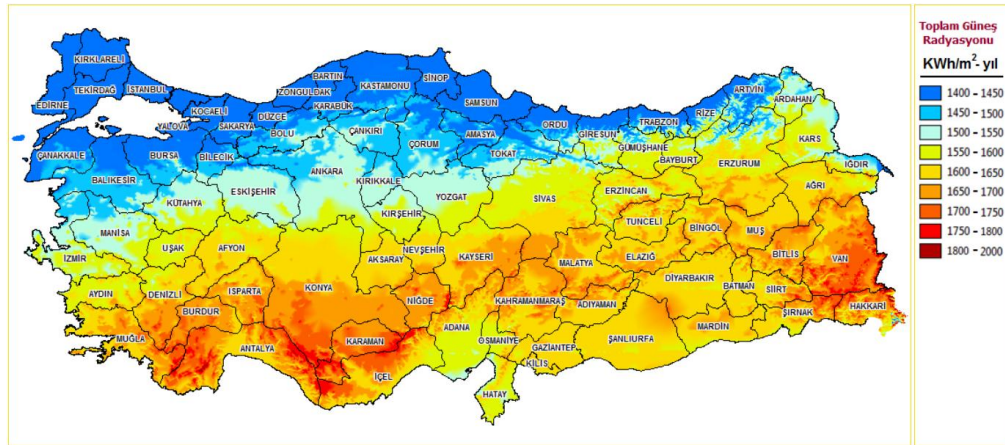


Şekil 1.3. Türkiye aylara göre ışıınım değerleri (Enerji Bakanlığı, 2025)



Şekil 1.4. Türkiye aylara göre güneşlenme süreleri (Enerji Bakanlığı, 2025).

Türkiye güneş haritası (Şekil 1.5) incelendiğinde coğrafi dağılımın belirgin olduğu görülmektedir: Güneydoğu Anadolu Bölgesi (Mardin, Şanlıurfa, Batman, Diyarbakır) yıllık 1.800–2.000 kWh/m² aralığıyla en yüksek potansiyele sahip iken, Akdeniz kıyı kuşağındaki Antalya, Mersin ve Hatay illeri 1.600–1.800 kWh/m² bandında yüksek değerler sunmaktadır. Karadeniz Bölgesi bulutlu ve yağışlı iklim yapısı nedeniyle 1.000–1.200 kWh/m² ile en düşük potansiyele sahiptir. İç Anadolu'nun orta kesimi ve Ege Bölgesi ise 1.400–1.600 kWh/m² aralığında orta-yüksek potansiyel sağlamaktadır.



Şekil 1.5. Türkiye güneş haritası (Enerji Bakanlığı, 2025).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Güneş enerjisi, yenilenebilir kaynaklar arasında en öne çıkanlardan biri olup, elektrik ya da ısı enerjisine dönüştürülebilme kapasitesiyle dikkat çekmektedir (Kanyarusoke, 2020; Özcan ve Deniz, 2023). Bu nedenle, özellikle sıcak su ve ısıtma uygulamalarında güneş enerjisinden faydalanmak, şebeke bağımlılığını azaltmak açısından mantıklı bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Yapılan çalışmalar, küresel ısı ihtiyacının kayda değer bir kısmının binalara entegre edilebilecek güneş enerjisi sistemleriyle karşılanabileceğini ve aynı zamanda CO2 emisyonlarının belirgin ölçüde düşürülebileceğini ortaya koymaktadır (Buker ve Riffat, 2015).

Güneş kolektörlerinin performansı üzerine yapılan araştırmalar oldukça çeşitlenmiştir. Tasarım parametreleri farklı yöntemlerle ele alınmış ve her bir çalışma kolektör tasarımının özgün bir yönüne odaklanmıştır. Örneğin Barone vd. (2024) vakum düzlemsel kolektörler için modelleme ve deneysel doğrulamayı birleştiren bütüncül bir yöntem geliştirmiş ve vakum optimizasyonu yoluyla performansta önemli iyileşmeler elde etmiştir. Kirar vd. (2018) farklı boru çapı ve aralıklarına sahip düzlemsel tipi su güneş kolektörlerini sayısal olarak incelemiş ve verimliliğin boru çapı arttıkça yükseldiğini, ancak boru aralığı arttıkça azaldığını göstermiştir. Omar ve Hamdemir (2024) boru geometrisinin kolektör çıkış sıcaklığı üzerindeki etkilerini inceleyerek konfigürasyonlar arasında önemli farklılıklar elde etmiştir. Cephe entegrasyonu konusunda Rusea vd. (2023) ile Visa vd. (2020) üçgen ve trapez formunda kolektör tasarımları önererek %62,38'e ulaşan optik verimlilik değerleri rapor etmiştir. Performansı artırmaya yönelik çalışmalar, kolektörün farklı bileşenlerine odaklanmıştır. Cam kaplamalarda yansıma kayıplarını azaltmaya yönelik optimizasyonlar (Kong vd., 2015), plaka kaplamalarında ısıtım soğurma özelliklerini geliştiren uygulamalar (Anderson vd., 2010), konveksiyon ve radyasyon kayıplarını sınırlayan yeni nesil yalıtım malzemeleri (Günay ve diğerleri, 2018), dolaşım sistemlerinin iyileştirilmesi (Fudholi vd., 2011) ve ısı enerjisi depolama entegrasyonları (Charvát vd., 2013; Dutkowski vd., 2021) bunlara örnek verilebilir. Mellouli vd. (2024) tarafından geliştirilen metal hidrür tabanlı kolektör sistemi ise dikkat çekici bir yenilik olarak öne çıkmış ve yüksek verimlilik değerlerine ulaşmıştır.

Kolektör tipleri arasında da kapsamlı karşılaştırmalar yapılmıştır. Düzlemsel (Ayompe ve Duffy, 2013; Khedher, 2018), vakum tüplü (Yadav ve Yadav, 2018) ve

parabolik oluklu (Yassen, 2012; Zaboli vd., 2021) sistemler hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle değerlendirilmiş, simülasyon çalışmaları deneysel testleri desteklemiştir (Shi vd., 2018). Kumar vd. (2021), kanatçıklı güneş kolektörlerine ilişkin kapsamlı bir derleme çalışması yaparak, soğurucu plakalara eklenen kanatçıkların ısı transfer hızını ve termal verimliliği önemli ölçüde artırdığını ve çift geçişli V-kıvrımlı tasarımların geleneksel sistemlere kıyasla %9,3–11,9 oranında daha yüksek verim sağladığını bildirmiştir. Alqahtani vd. (2024), metal hidrür temelli üç farklı kolektör konfigürasyonunu incelemiş ve su borularının optimum yerleşimi sayesinde gündüz saatlerinde çıkış suyu sıcaklığında 10°C'ye varan farklar elde edilebileceğini göstermiştir. Sultan vd. (2021) fotovoltaiik-güneş kolektörleri için yeni performans değerlendirme kriterleri geliştirmiştir.

Yansıtıcı tasarımlarında da önemli ilerlemeler kaydedilmiş, Tanaka (2011) ile Kostić ve Pavlović (2012) %35–44 aralığında ek enerji kazanımları bildirmiştir. Malzeme seçimi üzerine yapılan çalışmalarda, Özdemir vd. (2017) bakır ve alüminyum kolektörler arasında yüksek sıcaklıklarda %45,7'ye varan verimlilik farklılıkları tespit etmiştir. Altıparmak (2019), düzlemsel kolektörlerin verimliliğinin artırılması gerektiğini vurgulamış ve yaptığı deneylerde vakum tüplü, düzlemsel ve PV/T kolektörlerin sırasıyla %57,02, %53,84 ve %38,92 termal verimlilik değerlerine ulaştığını bildirmiştir. Li vd. (2017) ticari binaların ısıtma ve soğutma sistemleri için düşük profilli, yoğunlaştırıcı yeni bir güneş kolektörü geliştirmiştir. TRNSYS modeli kullanarak yarı-pasif izleme platformuna sahip bir güneş ısıtma-soğutma sistemini analiz etmiş ve 1 kW soğutma yükü başına 2,4 m² kolektör alanı ile bina yükünün %50'sinin karşılanabileceğini göstermiştir. Kalogirou vd. (2016), güneş kolektörlerinin ekserji analizine yönelik kapsamlı bir inceleme yaparak, enerji depolamadan soğutma sistemlerine kadar çeşitli uygulamalarda farklı kolektör türlerini değerlendirmiştir. Ekserji analizinin, sistem performansını değerlendirmede ve tersinmezlik kaynaklarını belirlemede etkili bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Leong vd. (2016) ise nanokullanım sıvılarının potansiyel avantajlarını incelemiştir. Kontrol sistemleri üzerine çalışan Mallouh vd. (2022) farklı güneş radyasyon koşullarında dört farklı güneş su ısıtma sistemi konfigürasyonunu sağlam ve PID kontrollü sistemlerle analiz etmiş; kapalı çevrim kontrol sistemlerinin, açık çevrim sistemlere göre çıkış suyu sıcaklığını daha kararlı biçimde düzenlediğini ve enerji tüketimini minimize ettiğini göstermiştir. Martínez-Rodríguez vd. (2019) ise kolektör alanı tasarımında uygun planlamanın kritik önemini ortaya koymuştur.

Yukarıdaki verilen makalelere ek olarak solar termal kolektörlerin destekleyici olarak kullanıldığı makalelere aşağıda yer verilmiştir. Aşağıda verilen makalelerde güneş kolektörleri ısı pompası desteği amacıyla kullanılmıştır.

- Li vd. (2022), soğuk iklim koşullarında güneş destekli buhar enjeksiyonlu hava kaynaklı ısı pompası (SC-EVIHP) üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışmada, güneşlenme etkisiyle ısıtma kapasitesinin %24,9'a ve COP değerinin %12,5'e kadar arttığı; $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ dış ortam sıcaklığında kolektör çıkış havası $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken COP'un en fazla %11,1 oranında iyileştiği rapor edilmiştir (Li ve ark., 2022).
- Sager ve Poirier (2021), ön-ticari nitelikte iki-kaynaklı güneş destekli ısı pompasını 6 aylık saha verisi ile incelemiş; belirli bölgelerde enerji tüketiminde ve sera gazı salınımlarında azalma sağlayarak ekonomik geri ödeme potansiyeli sunduğunu ortaya koymuştur (Sager J. P., 2021).
- Besagni vd. (2017), yeni bir güneş destekli iki-kaynaklı çok işlevli ısı pompasını saha koşullarında test etmiş; çok modlu işletim altında sistemin pratik uygulanabilirliğini ve performans artışını göstermiştir (Besagni vd., 2017).
- Wu vd. (2023) Lhasa'da güneş destekli ikili beslemeli ısıtma sistemini değerlendirmiş; ısıtma döneminde birincil devre su sıcaklığının $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında stabil kaldığını, kolektörün toplam çalışma süresinin %26,9'unda devrede olduğunu ve bunun %23,16'sının yalnızca güneş enerjisi ile sağlandığını belirtmiştir (Wu ve Feng, 2023).

Bunlara ek olarak güneş termal kolektörü ile fotovolatik kolektörün (PV/T) hibrit olarak çalıştığı sistemler ile ilgilide bir çok makale bulunmaktadır.

- Zanetti ve Del Col (2020) PV/T kolektörün R32 akışkanlı 8 kW kapasiteli bir ısı pompasında evaporatör olarak çalışmasını sayısal modelleme ile incelemiş ve tasarım ile mevsimsel analizler için bir çerçeve geliştirmiştir (Zanetti D., 2020)..
- Wang vd. (2022) çok modlu güneş ısı pompası modelini doğrulamış; PV/T-WSHP ve PV/T W&ASHP modlarında kolektör sayısı, alanı ve akış oranlarının COP ve enerji üretimi üzerindeki etkilerini göstermiştir (Wang vd., 2022).
- Choi vd. (2018) kanat borulu hibrit kolektörde suya ısı kazancını deneysel olarak incelemiş; uygun debilerde yaklaşık 900 W ısı kazancına ulaşıldığını raporlamıştır (Choi, 2018).

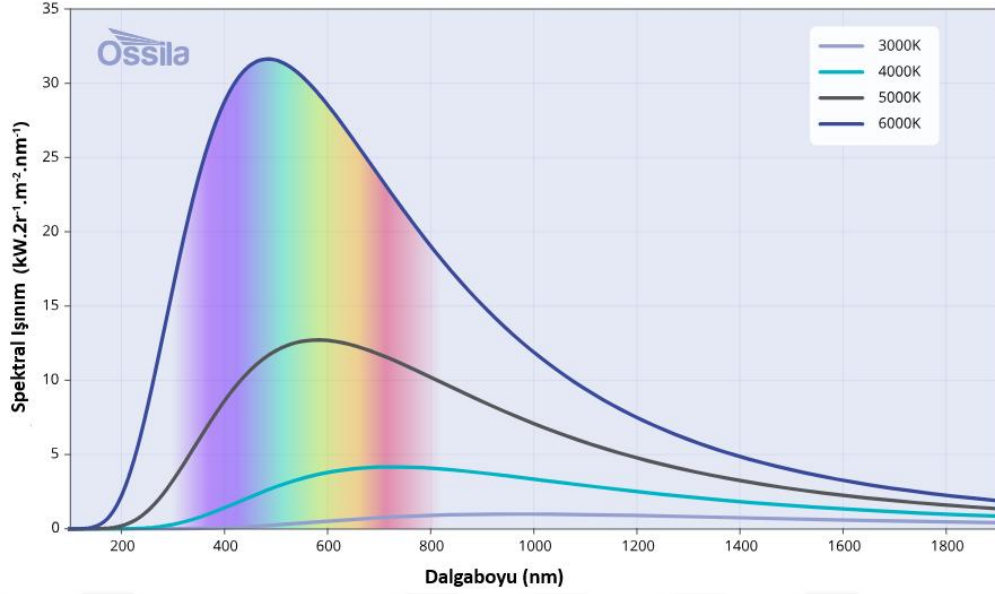
Güneş termal kolektörleri üzerine yürütülen kapsamlı araştırmalara rağmen, önceki çalışmaların çoğu her bir tasarım parametresinin etkisini izole edilmiş şekilde değerlendirmiş ve genellikle bu değerlendirmeler için farklı deneysel kurulumlar kullanmıştır. Bu yaklaşım, aynı sistem içindeki farklı parametrelerin verimlilik üzerindeki görece etkisini ve gücünü doğrudan karşılaştırmayı zorlaştıran temel bir sınırlamadır. Bu çalışma, söz konusu sınırlamayı ele alarak, deneysel olarak da doğrulanmış belirli bir güneş termal kolektör kurulumunda dokuz kritik tasarım parametresini sistematik olarak analiz etmektedir. İncelenen parametreler; akış hızı, giriş suyu sıcaklığı, ortam sıcaklığı, boru çapı, soğuruculuk (absorbans), yayıcılık (emisivite), levha-cam boşluğu, yalıtım malzemeleri ve yalıtım kalınlığıdır. Diğer tüm parametreleri sabit tutarak ve her seferinde yalnızca birini değiştirerek (tek değişkenli analiz), çalışma her bir parametrenin bireysel etkisini nicelleştirmekte ve aynı sistem içinde verimliliği etkilemedeki göreceli güçlerini doğrudan karşılaştırmaktadır. Analizler sırasında, parametrelerin pratik uygulanabilirliği ve ilgili maliyetleri de dikkate alınmaktadır. Özellikle, yalıtım malzemeleri üzerine, farklı termal iletkenlik katsayılarına karşılık gelen çeşitli malzemeler test edilerek nispeten daha derinlemesine bir araştırma yürütülmüştür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, solar termal kolektörün bileşenleri ve deneysel ve sayısal olarak incelenmesine ilişkin materyal ve yöntemler ayrıntılı şekilde sunulmuştur olup, elde edilen deneysel ve numerik sonuçlar araştırma sonuçları ve tartışma başlığı altında verilmiştir. İlk olarak, genel olarak termal kolektörlerden bahsedilmiştir. Daha sonrasında deneysel ve numerik testlerinden bahsedilmiş, kullanılan düzlemsel tip güneş kolektörünün yapısal özellikleri ve deneysel düzende kullanılan ekipmanlar tanıtılmıştır.

3.1. Güneş Enerjisinin Kullanımı ile İlgili Temel Kavramlar

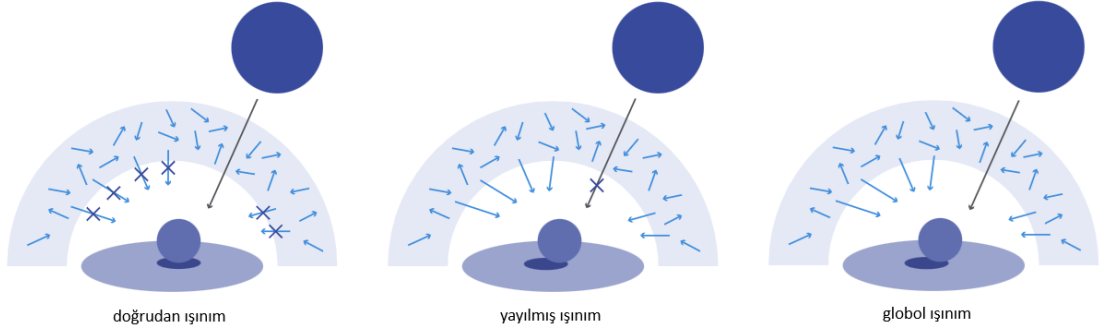
Güneş enerjisi sistemlerinin verimli şekilde tasarlanabilmesi ve performanslarının optimize edilebilmesi, güneşin konumunun ve hareketinin doğru biçimde anlaşılmasına bağlıdır. Güneşin konumuna ait geometrik parametreler, güneş ışınlarının yeryüzüne geliş açısını belirler ve hem fotovoltaiik hem de termal kolektörlerin verimini doğrudan etkiler. Bu bölümde, güneş radyasyonunun temel özellikleri, atmosferle etkileşimi ve güneş geometrisi parametreleri detaylı biçimde açıklanmaktadır. Güneş, çekirdeğinde gerçekleşen füzyon reaksiyonları sonucu sürekli olarak enerji üretmektedir. Dört protonun birleşmesiyle bir helyum çekirdeği oluşmakta ve bu süreçte yaklaşık $3,826 \times 10^{26}$ J·s⁻¹ enerji açığa çıkmaktadır (John A. Duffie ve Beckman, 2013). Bu enerji, elektromanyetik dalgalar biçiminde uzaya yayılmakta olup, güneş yüzeyinden çıkan radyasyon yaklaşık 5525–5778 K sıcaklıktaki bir siyah cisim ışımasına benzerlik göstermektedir (Foukal, 1990; S A Kalogirou, 2014). Şekil 3.1’de verildiği gibi güneş spektrumu genel olarak üç ana bölgeye ayrılır: ultraviyole (200–400 nm), görünür (400–700 nm) ve kızılötesi (700–2500 nm) (O’Kane, 2025). Atmosfer dışında ölçülen güneş sabiti yaklaşık 1367 W/m²’dir (Iqbal, 1983). Ancak bu enerji, atmosferdeki su buharı, ozon, karbondioksit ve diğer gazlar tarafından kısmen soğurularak yeryüzüne ulaşmadan önce azalmaktadır (Anderson vd., 1995; Bird ve Riordan, 1986). Güneş radyasyonunun spektral dağılımı incelendiğinde, toplam enerjinin yaklaşık %7–8’i ultraviyole, %47–48’i görünür, %44–45’i ise kızılötesi bölgede yoğunlaşmaktadır (Nann ve Emery, 1992).



Şekil 3.1. Güneş ışınım spektrumu (O’Kane, 2025).

Bu dağılım, düzlemsel güneş kolektörlerinin soğurucu yüzeylerinin malzeme seçiminde kritik öneme sahiptir. Kolektör yüzeyleri, güneş radyasyonunun kısa dalga boylarında yüksek soğuruculuk ($\alpha > 0,9$), uzun dalga boylarında ise düşük yayıcılık ($\epsilon < 0,1$) göstermelidir (Agnihotri ve Gupta, 1981; John A. Duffie ve Beckman, 2013). Şekil 3.2’de gösterildiği gibi atmosferdeki moleküller güneş ışınlarını kısmen saçmakta ve soğurmaktadır (O’Kane, 2025). Saçılan bu bileşene yayılmış (diffuse) ışınım, D, doğrudan gelen bileşene ise doğrudan (direct) ışınım, B adı verilir (Rüther ve Klesis, 1996). Ayrıca, yeryüzünden yansıyan ışınım bileşeni albedo (ρ) olarak tanımlanır ((Iqbal, 1983). Albedo, yüzeyin türüne bağlı olarak değişmekte olup; örneğin, taze kar yüzeylerinde 0,80–0,95, ormanlık alanlarda ise 0,05–0,20 aralığında değerler almaktadır (Kalogirou, 2014).

Bir yüzey üzerine gelen toplam (global) güneş ışıını, doğrudan (B), yayılmış (D) ve yansıyan (R) bileşenlerin toplamından oluşur ($G = B + D + R$). Güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında bu üç bileşenin doğru şekilde hesaplanması, özellikle eğimli yüzeylerde verimliliğin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir (John A. Duffie ve Beckman, 2013). Bulutluluk oranının artması durumunda yayılmış ışınımın oranı yükselmekte, açık gökyüzünde toplamın %10–20’sini oluştururken, bulutlu havalarda neredeyse tamamını oluşturabilmektedir (Sukhatme ve Nayak, 1997).



Şekil 3.2. Güneş ışınım üç yaygın hali (O'Kane, 2025).

Güneş ışınlarının yeryüzüne geliş açısı, gün ve yıl boyunca sürekli değişim göstermektedir. Bu değişim, Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönüşü ve Güneş etrafındaki eliptik yörüngesi nedeniyle ortaya çıkar (John A. Duffie ve Beckman, 2013). Güneş radyasyonunun bir noktaya ulaşan miktarı, bu açısal parametrelere doğrudan bağlıdır.

3.1.1. Deklinasyon Açısı

Deklinasyon açısı (δ), Dünya'nın ekvator düzlemi ile Dünya–Güneş doğrusu arasındaki açıdır. Bu açı yıl boyunca $-23,45^\circ$ ile $+23,45^\circ$ arasında değişmektedir (Kalogirou, 2014). Yaz gündönümünde (yaklaşık 21 Haziran) maksimum, kış gündönümünde (yaklaşık 21 Aralık) minimum değerini alır.

Cooper (1969) tarafından önerilen ve yaygın olarak kullanılan ampirik formül aşağıdaki gibi olup, n gün sayısını temsil etmektedir.

$$\delta = 23,45 \times \sin[360 \times (284 + n) / 365] \quad (3.1)$$

Daha yüksek doğruluk için Spencer (1971) tarafından geliştirilen Fourier açılımı kullanılabilir:

$$\delta = 0,006918 - 0,399912\cos\Gamma + 0,070257\sin\Gamma - 0,006758\cos2\Gamma + 0,000907\sin2\Gamma - 0,002697\cos3\Gamma + 0,00148\sin3\Gamma \quad (3.2)$$

Burada $\Gamma = 2\pi(n-1)/365$ olup, gün açısını radyan cinsinden ifade eder (Iqbal, 1983).

3.1.2. Zenit açısı

Zenit açısı (θ_z), bir noktadan geçen düşey doğru ile güneş ışınlarının geliş doğrultusu arasındaki açıdır (Sukhatme ve Nayak, 1997). Güneş tam tepedeyken $\theta_z = 0^\circ$, ufukta iken $\theta_z = 90^\circ$ 'dir. Hesaplama bağıntısı şu şekildedir:

$$\cos\theta_z = \sin\varphi \times \sin\delta + \cos\varphi \times \cos\delta \times \cos\omega \quad (3.3)$$

Burada φ enlem açısı, δ deklinasyon açısı, ω ise saat açısıdır. Yükseklik açısı (α) ile ilişkisi $\alpha = 90^\circ - \theta_z$ olarak ifade edilir (Kalogirou, 2014).

3.1.3. Saat açısı

Saat açısı (ω), güneşin öğle meridyeninden açısal uzaklığını gösterir. Güneş öğle anında $\omega = 0^\circ$, her saat başına 15° değişim olacak şekilde hesaplanır. Öğleden önce negatif, öğleden sonra pozitif değer alır (J A Duffie ve Beckman, 2013).

$$\omega = 15^\circ \times (\text{gerçek güneş saati} - 12) \quad (3.4)$$

Gerçek güneş saati ile standart zaman farkı, zaman denklemi (equation of time) ve boylam düzeltmesi ile belirlenir.

3.1.4. Azimut açısı

Güneş azimut açısı (γ_s), güneşin yatay düzlemdeki konumunu belirler. Güney yönü 0° , doğu -90° (veya 270°), batı $+90^\circ$ olarak tanımlanır (Messenger ve Abtahi, 2017).

$$\sin\gamma_s = (\cos\delta \times \sin\omega) / \sin\theta_z \quad (3.5)$$

Bu açı, özellikle güneş takip sistemlerinin yönlendirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Sabit eğimli sistemlerde panel eğim açısı genellikle yerel enleme eşit seçilir. Mevsimsel optimizasyon için yazın ($\varphi - 15^\circ$), kışın ($\varphi + 15^\circ$) açılar tercih edilir

(Kalogirou, 2014). İki eksenli takip sistemleri ise zenit ve azimut açılarını eşzamanlı izleyerek enerji üretimini %25–40 oranında artırabilmektedir (Lorenzo, 2011).

3.2. Düzlemsel Güneş Kolektörü

3.2.1. Düzlemsel güneş kolektörlerinin kullanım alanları

Düzlemsel güneş kolektörleri, basit evsel sıcak su sistemlerinden karmaşık endüstriyel proseslere kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu sistemler, düşük ve orta sıcaklık aralıklarında yüksek verimle çalıştıkları için enerji verimliliği odaklı birçok uygulamada tercih edilmektedir.

3.2.1.1. Konut ve ticari binalarda sıcak su temini

Düzlemsel güneş kolektörlerinin en yaygın kullanım alanı, konut ve ticari binalarda sıcak su teminidir. Bu kolektörler özellikle 40–80 °C sıcaklık aralığında yüksek verimlilikle çalışarak, düşük ve orta sıcaklık gerektiren uygulamalarda etkin bir çözüm sunar (Kalogirou, 2004). Türkiye’de 2020 yılı itibarıyla yaklaşık 18 milyon m² güneş kolektörü kurulu alanının yaklaşık %85’i, konutlarda sıcak su temini için kullanılmaktadır (Shura, 2021). Yüksek sıcak su ihtiyacı bulunan oteller, hastaneler, yüzme havuzları ve spor tesisleri gibi ticari yapılar da bu sistemlerden yoğun biçimde yararlanmaktadır. Özellikle Akdeniz iklim kuşağında bulunan ülkelerde, bu sistemlerin yıllık sıcak su ihtiyacının %60–80’ini karşılayabildiği bildirilmektedir (Zambolin ve Del Col, 2010).

3.2.1.2. Bina ısıtma sistemleri

Güneş termal kolektörleri, bina ısıtma sistemlerinde geleneksel yöntemlere destek veya alternatif olarak kullanılmaktadır. Özellikle yerden ısıtma ve fan-coil gibi düşük sıcaklıklı ısıtma sistemleriyle entegre edildiğinde, sistem verimliliği belirgin biçimde artmaktadır (Duffie ve Beckman, 2013). Avrupa’da yapılan araştırmalar, güneş enerjisi destekli ısıtma sistemlerinin yıllık ısıtma enerji ihtiyacının %10–60’ını karşılayabildiğini göstermektedir (Weiss ve Rommel, 2008). Ayrıca, mevsimsel enerji depolama sistemleriyle birlikte kullanılan büyük ölçekli güneş termal tesisleri, özellikle İskandinav ülkelerinde bölgesel ısıtma (district heating) uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır (Tian ve Zhao, 2013).

3.2.1.3. Endüstriyel proses ısısı

Endüstriyel süreçlerde ihtiyaç duyulan 80–250 °C sıcaklık aralığındaki ısı enerjisi, güneş termal kolektörleriyle etkin şekilde sağlanabilmektedir. Gıda işleme, tekstil boyama, kimyasal üretim, kağıt endüstrisi ve otomotiv gibi sektörlerde bu sistemler kullanılmaktadır (Kalogirou, 2003). Daha yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda vakumlu borulu kolektörler ve parabolik oluklu kolektörler tercih edilmektedir (Fernández-García vd., 2010). Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, endüstriyel enerji tüketiminin yaklaşık %30'u, 400 °C'nin altındaki proses ısısı için kullanılmakta olup, bu durum güneş termal sistemleri açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır.

3.2.1.4. Tarımsal uygulamalar

Tarımsal alanda güneş termal kolektörleri; ürün kurutma, sera ısıtma, hayvancılık tesislerinde sıcak su sağlama, toprak sterilizasyonu ve soğuk zincir uygulamaları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Sharma vd., 2009). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, güneş enerjili kurutma sistemleri, geleneksel açık hava kurutmasına kıyasla ürün kalitesini artırmakta ve kayıpları azaltmaktadır (Ekechukwu ve Norton, 1999). Sera ısıtma uygulamalarında yapılan çalışmalar, güneş termal sistemlerinin ısıtma maliyetlerini %40–70 oranında düşürebildiğini göstermektedir (Sethi ve Sharma, 2007).

3.2.1.5. Soğutma ve iklimlendirme sistemleri

Güneş enerjisi destekli absorpsiyonlu soğutma sistemleri, özellikle sıcak iklimlerde soğutma ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaktadır. Bu sistemlerin avantajı, soğutma talebinin güneş radyasyonunun en yüksek olduğu dönemlerle çakışmasıdır (Henning, 2007). Bu tür sistemler genellikle LiBr–H₂O veya NH₃–H₂O gibi akışkan çiftleri kullanmakta olup, COP değerleri 0,6–0,8 aralığındadır (Kim ve Ferreira, 2008). Ayrıca, adsorpsiyonlu soğutma, desikant soğutma ve organik Rankine çevrimi tabanlı güneş enerjili soğutma teknolojileri de geliştirilmektedir (Hassan ve Mohamad, 2012).

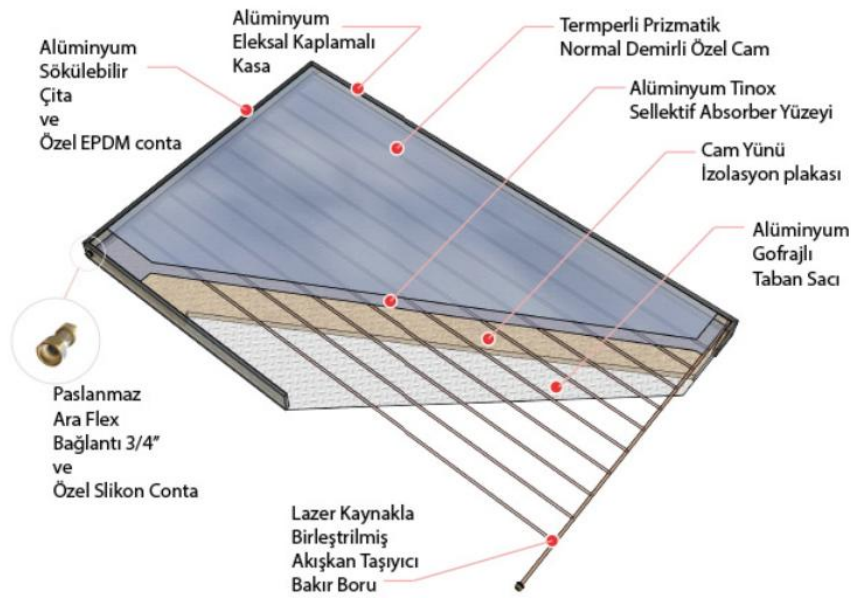
3.2.1.6. Tuzdan arındırma ve su arıtma sistemleri

Güneş termal enerjisi, deniz suyunun tuzdan arındırılması ve atık suyun arıtılması gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok kademeli flaş buharlaştırma (MSF), ters osmoz (RO) ve membran distilasyonu sistemleri, güneş termal kolektörlerle entegre edilerek çalıştırılabilmektedir (Kalogirou, 2005). Bu teknoloji özellikle su kıtlığı

yaşayan veya kıyı bölgelerinde bulunan yerleşimler için ekonomik ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır (Sharon ve Reddy, 2015).

3.2.2. Düzlemsel güneş kolektörü yapısı

Düzlemsel güneş kolektörleri, güneş radyasyonunu termal enerjiye dönüştürmek üzere tasarlanmış, düşük ve orta sıcaklık uygulamalarında yaygın şekilde kullanılan cihazlardır. Basit yapıları, maliyet-etkinlikleri ve iyi bilinen performans karakteristikleri sayesinde konut sıcak suyu, bina ısıtması, tarımsal kurutma ve bazı endüstriyel proses ısı uygulamalarında tercih edilmektedir (Kalogirou, 2014). Düzlemsel kolektörler temel olarak, güneş enerjisini absorbe eden ve bu enerjiyi bir akışkana aktaran altı ana bileşenden meydana gelir: saydam örtü, soğurucu (absorber) yüzey, ısı transfer boru sistemi, yalıtım, kolektör kasası ve bağlantı elemanları (Şekil 3.3) (Solimpeks, 2025). Aşağıda bu bileşenler ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



Şekil 3.3. Düzlemsel güneş kolektör yapısı (Solimpeks, 2025).

3.2.2.1. Saydam örtü

Saydam örtü, kolektöre gelen kısa dalga boylu güneş ışınımını içeri geçirirken, içeride oluşan uzun dalga boylu termal radyasyonun dışarı kaçmasını engelleyerek seracılık (greenhouse) etkisi yaratır. Bu mekanizma kolektör içinde sıcaklık yükselmesini sağlar ve radyatif ısı kayıplarını azaltır (Goswami vd., 2015)

3.2.2.1.1. Cam

Düşük demirli camlar, düzlemsel kolektörlerde en çok tercih edilen saydam örtü malzemesidir. Normal soda–kireç camlar içerdikleri demir oksit nedeniyle hafif yeşilimsi renge sahiptir ve özellikle kısa dalga geçirgenliğini düşürebilir. Düşük demirli camlarda demir oksit içeriği önemli ölçüde azaltılarak (ör. normal camın $\sim 0,1-0,15 \rightarrow$ düşük demirli camda $\sim 0,01-0,04$) güneş geçirgenliği artırılmaktadır (Rubin, 1985). Tipik geçirgenlik değerleri (4 mm kalınlık için) şu aralıklardadır: normal float cam %83–85, düşük demirli cam %94–96 ve ekstra temiz düşük demirli cam %95–98 (Duffie ve Beckman, 2013). Cam kalınlığının artması ile geçirgenlikte azalma gözlenir; uygulamalarda genellikle 3–4 mm kalınlık tercih edilir (Kalogirou, 2014)

3.2.2.1.2. Alternatif saydam malzemeler

Cam dışında çift cidarlı polikarbonat paneller ve PMMA (akrilik) gibi saydam plastikler de kullanılmaktadır. Polikarbonat darbeye dayanımı yüksek olmakla birlikte UV maruziyeti altında zamanla sararma ve geçirgenlik kaybı gösterebilir — başlangıç geçirgenliği ~ 85 iken 5–10 yıl sonra ~ 70 'e ineilmektedir (Kalogirou, 2004). PMMA tabanlı akrilikler başlangıçta yüksek geçirgenlik (%90–92) sunsa da cam kadar ısı kararlılığına sahip olmayıp maksimum çalışma sıcaklığı genellikle 80–90 °C ile sınırlıdır (.Goswami vd., 2015).

3.2.2.2. Soğurucu yüzey (Absorber)

Soğurucu, kolektörün enerji toplama elemanıdır ve güneş ışığını termal enerjiye dönüştürür. Soğurucu yüzeyler genellikle kısa dalga ışımasını yüksek oranda absorbe eden ve uzun dalga boylu yayılan enerjiyi minimuma indiren seçici kaplamalarla kaplanır; ideal seçici yüzeylerde soğurucu $\alpha > 0,95$ ve yayıcılık $\epsilon < 0,10$ hedeflenir (Tian ve Zhao, 2013). Yaygın selektif kaplamalar arasında siyah krom, siyah nikel, TiN_xO_y tipi kaplamalar ile spektral seçici boyalar yer alır. Bazı düşük maliyetli uygulamalarda mat siyah boya tercih edilse de bu durumda emisivite yüksek olacağından radyatif kayıplar artar (Kalogirou, 2009). Soğurucu yüzey genellikle bakır veya alüminyum gibi iyi termal iletkenliğe sahip metallerden üretilir. İdeal bir seçici yüzey kısa dalga (0,3–2,5 μm) enerjisini yüksek oranda absorbe ederken, uzun dalga (2,5–25 μm) termal yayılımı minimize eder (Kennedy, 2002).

3.2.2.2.1. Boyalı soğurucu yüzeyler

Mat siyah boyalar maliyet açısından avantajlıdır ve düşük sıcaklık uygulamalarında (ör. havuz ısıtma) kabul edilebilir performans sunabilir. Ancak seçici olmadıkları için yüksek çalışma sıcaklıklarında radyatif kayıplar artmakta ve verim düşmektedir (Kalogirou, 2004) Tipik özellikleri: $\alpha \approx 0,90-0,96$, $\varepsilon \approx 0,60-0,80$.

3.2.2.2.2. Selektif boyalı soğurucu yüzeyler

Gelişmiş selektif boyalar, karbon nanotüp, grafen veya özel pigment katkıları ile formüle edilerek maliyet–performans dengesine yönelik orta düzey seçicilik sağlar. Bu tür boyalar $\alpha \approx 0,92-0,94$ ve $\varepsilon \approx 0,20-0,35$ aralığında özellik sunabilir; uygulama kolaylığı ve maliyet avantajı nedeniyle bazı uygulamalarda tercih edilmektedir (Zhao ve Tao, 2015).

3.2.2.2.3. Titanyum bazlı (TiN_xO_y) kaplamalar

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) veya reaktif sputtering ile üretilen TiN_xO_y türü kaplamalar, yüksek optik seçicilik ve düşük emisivite sunar. Çok katmanlı yapıları (anti-reflektif / absorber / difüzyon bariyeri / metal taban) sayesinde $\alpha \approx 0,92-0,96$ ve $\varepsilon \approx 0,04-0,08$ (25 °C) gibi değerler elde edilebilir; yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle geniş uygulama aralığı sunarlar (Barshilia vd., 2008; Zhang, 2015).

3.2.2.3. Yalıtım malzemesi

Arka ve yan yüzeylerde kullanılan yalıtım, soğurucudan çevreye olan ısı kayıplarını minimize etmek ve kolektör verimini artırmak için kritik bir bileşendir. Yalıtım seçiminde düşük termal iletkenlik, yüksek sıcaklık dayanımı, yangın güvenliği ve nem direnci gibi kriterler göz önünde bulundurulmalıdır (Tian ve Zhao, 2013). Yaygın malzemeler cam yünü, taş yünü, poliüretan ve poliizosiyanürat köpüklerdir; cam yünü/taşyünü için tipik k değerleri $0,035-0,045$ W/m·K aralığındadır (Sabiha vd., 2015). Poliüretan daha düşük iletkenliğe ($0,020-0,030$ W/m·K) sahip olmakla birlikte yüksek sıcaklıklarda performans düşüşü gösterebilir. Arka yüz yalıtım kalınlıkları genellikle 30–60 mm, yan yalıtımlar 20–50 mm aralığında seçilir; kalınlığın artırılması belirli bir noktadan sonra maliyet–fayda dengesini olumsuz etkileyebilir (Duffie ve Beckman, 2013).

3.2.2.4. Kollektör kasası

Kasa, kollektör bileşenlerini çevresel etkilerden koruyan ve mekanik dayanımı sağlayan yapısal elemandır. Genellikle alüminyum veya galvanizli çelikten üretilir; alüminyum hafiflik ve korozyon direnci avantajı sunarken, galvanizli çelik maliyet açısından cazip bir alternatiftir (Kalogirou, 2009). Kasa tasarımında su sızdırmazlığı, termal genleşmeye izin verme, montaj kolaylığı ve conta/tampon sistemlerinin doğru seçimi kritik öneme sahiptir (Sabiha vd., 2015).

3.2.2.5. Isı transfer borusu

Isı transfer boruları, soğurucu yüzey üzerinde toplanan ısıyı akışkana iletilmesinde merkezi rol oynar. Boru malzemesinin seçimi; ısı iletkenliği, korozyon dayanımı, mekanik mukavemet ve maliyet kriterlerine göre yapılmalıdır (Duffie ve Beckman, 2013). Aşağıda yaygın boru malzemeleri özetlenmiştir.

3.2.2.5.1. Bakır borular

Bakır, yüksek termal iletkenliği ($\approx 385\text{--}400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) ve iyi korozyon özellikleri nedeniyle kolektör uygulamalarında en yaygın kullanılan malzemedir ve endüstri standardıdır (S A Kalogirou, 2014). Tipik özellikleri: yoğunluk $\approx 8960 \text{ kg/m}^3$, özgül ısı $\approx 385 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, iyi mekanik dayanım.

3.2.2.5.2. Paslanmaz çelik borular

Paslanmaz çelik, agresif su koşulları veya yüksek basınçlı uygulamalarda tercih edilir. Ancak bakıra kıyasla ısı iletkenliği oldukça düşüktür ($\approx 16,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), bu nedenle termal performansta dezavantaj oluşturabilir; buna karşın korozyon dayanımı ve mekanik mukavemeti yüksektir (Goswami vd., 2015)

3.2.2.5.3. Alüminyum borular

Alüminyum, hafifliği ve maliyet avantajı nedeniyle bazı düşük maliyetli kolektör tasarımlarında kullanılır. Isı iletkenliği bakırın yaklaşık %50–60'ı düzeyindedir ($\approx 205\text{--}230 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) ve yoğunluğu bakırın $\sim 30\%$ 'u kadardır.

3.2.2.6. Boru ve soğurucu yüzey tasarımları

Boru düzeni (serpantin, serpantin-üstü, enine boru dizilimi vb.) ve akışkan dolaşım şekli, kolektörün yerel ısı transferi ve genel verimini doğrudan etkileyen tasarım parametreleridir. Çeşitli konfigürasyonlar farklı uygulama koşullarına göre optimize edilir; literatürde en çok tercih edilen konfigürasyonlar arasında düz boru-serpantin düzenleri yer almakta ve performans–üretim dengesi açısından yaygın kullanımı bulunmaktadır (Duffie ve Beckman, 2013).

3.2.3. Malzeme özellikleri ve yaklaşık maliyetleri

Bu bölüm, güneş enerjisi ile çalışan termal kolektörlerin temel bileşenlerine ilişkin malzeme özelliklerini ve maliyet unsurlarını incelemektedir. Bakır boru maliyetinin çapı ile doğrusal bir ilişkisi bulunur ve bu ilişki, boru çapı milimetre cinsinden olmak üzere, yaklaşık olarak $0,5 \cdot D$ €/m şeklinde ifade edilebilir. Örneğin, 6 mm çapındaki bir borunun metre fiyatı yaklaşık 3 €'dur; bu da malzeme maliyetlerinin boyutla doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir. Çizelge 3.1 yaygın kullanılan soğurucu yüzey kaplamalarının optik özelliklerini ve yaklaşık maliyetlerini detaylandıran karşılaştırmalı bir analiz sunmaktadır (Ding ve diğerleri, 2022; Henninger, 1984; Lampert, 1979; Wäckelgård, Niklasson ve Granqvist, 2013). Seçici yüzey kaplamalar, üst düzey bir ısı performans (yüksek soğurma α /düşük yayma ϵ) sağlarken, daha yüksek bir fiyat noktasında yer alır. Geleneksel siyah boya ise, kolektör verimliliğini düşüren önemli ölçüde yüksek yayıcılık oranına rağmen, çok daha ekonomik bir alternatiftir.

Çizelge 3.1. Çeşitli emici yüzey kaplamalarının özellikleri ve yaklaşık maliyetleri.

Kaplama türü	Soğuruculuk (α)	Yayıcılık (ϵ)	Yaklaşık maliyet (€/m ²)
Siyah boya	0,90–0,95	0,80–0,90	5–10
Siyah krom	0,92–0,94	0,07–0,12	15–25
Siyah nikel	0,88–0,92	0,10–0,18	20–30
Seçici TiNOX	0,94–0,95	0,04–0,05	30–45
Seçici mavi kaplama	0,93–0,95	0,05–0,08	25–40
CuO bazlı seçici kaplama	0,92–0,96	0,12–0,20	20–35
Al-Ni/Al seçici kaplama	0,93–0,96	0,03–0,06	40–55
TiO ₂ /SiO ₂ dereceli kaplama	0,94–0,96	0,06–0,08	35–50

Çizelge 3.2, güneş enerjisi termal kolektörlerinde yaygın olarak kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayılarını ve maliyetlerini karşılaştırmaktadır (Alghoul,

Sulaiman, Azmi ve Wahab, 2005; Chaurasia, 1992; Ihaddadene, Ihaddadene ve Betka, 2018; Soteris A Kalogirou, 2004; Kaushika ve Sumathy, 2003; Osorio ve diğerleri, 2017; Reim ve diğerleri, 2005).. Mineral yün, maliyet ve ısı performans arasındaki uygun dengesi nedeniyle pratikte en yaygın kullanılan seçenek olmaya devam etmektedir. Aerogel gibi gelişmiş malzemeler üstün bir yalıtım sağlasa da, yüksek maliyetleri pratik kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Poliüretan köpük, mineral yünden daha iyi bir ısı direnci sunmakla birlikte, neredeyse iki katı fiyatı ve daha karmaşık üretim gereksinimleri ile öne çıkar. Yansıtıcı folyo yalıtım ise en ekonomik seçenek olarak öne çıksa da, daha yüksek ısı iletkenliği, onu öncelikle tamamlayıcı yalıtım uygulamaları için uygun kılar. Bu çalışmada, bu tabloda gösterilen malzeme aralığını kabaca kapsayan beş farklı ısı iletim katsayısı (0,015, 0,022, 0,03, 0,04 ve 0,05 W/m·K) incelenmiştir.

Çizelge 3.2. Çeşitli yalıtım malzemelerinin özellikleri ve yaklaşık maliyetleri.

İzolasyon malzemesi	Termal iletkenlik (k) (W/(m·K))	Yaklaşık maliyet (€/m ²)
Poliüretan Köpük (PU)	0,020 – 0,025	10 – 15
Polistiren Köpük (EPS/XPS)	0,030 – 0,040	5 – 10
Mineral Yün (Taş/Cam)	0,035 – 0,045	3 – 8
Hücreli Cam	0,038 – 0,045	15 – 25
Yansıtıcı Folyo İzolasyonu	0,05 – 0,1	2 – 5
Fiberglas İzolasyon	0,035 – 0,045	4 – 9
Aerogel	0,013 – 0,016	30 – 50

3.2.4. Kolektör üretimi

Bu çalışmada deneysel testlerde kullanılmak üzere tasarlanan düzlemsel güneş termal kolektör, EN 12975-1:2006+A1:2010 (Thermal Solar Systems and Components - Solar Collectors - Part 1: General Requirements) standardına uygun olarak üretilmiştir. Numune kolektörün üretim aşamaları aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır.

3.2.4.1. Isı transfer borularının hazırlanması

Düzlemsel güneş kolektöründe kullanılacak bakır toplayıcı (manifold) ve soğurucu (absorber) borular, genellikle rulo formunda temin edilmektedir. Bu borular, üretim öncesinde rulo açma, düzleştirme ve boyuna kesme işlemlerinden geçirilmiştir. Kesme işlemi, Şekil 3.4’de gösterilen otomatik boru kesme makinesi kullanılarak hedeflenen uzunluk ve tolerans değerlerine uygun biçimde gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada absorber borusu 8 mm, manifold borusu 18 mm dış çapa ve 0.70 mm et kalınlığına sahip olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 3.4. Bakır boru kesimi.

Sistemdeki akışkan bağlantılarının sağlanabilmesi için, belirlenen ölçülerdeki bakır borular otomatik delme işlemine tabi tutulmuştur. Delinen uçlara bağlantı elemanlarının montajı amacıyla $\frac{3}{4}$ inç çapında pirinçten imal edilmiş erkek rakorlar takılmıştır. Rakor montajı sonrasında boru bağlantı sistemi tamamlanmış olup, genel görünümü Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Hazırlanan toplayıcı boruların resmi.

Kolektör devresinde yer alan absorber ve manifold borularının birleşimi, oksijen kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra, sistemdeki olası

kaçakların tespiti amacıyla basınç testleri uygulanmış ve kaynak bölgelerinin sızdırmazlığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Boruların birleştirilmesi işlemi.

Kaynak sonrası, soğurucu borular alüminyum şerit malzeme üzerine belirlenen aralıklarla yerleştirilmiş ve lazer kaynak teknolojisi kullanılarak birleştirilmiştir. Bu işlem için özel bir endüstriyel lazer kaynak sistemi kullanılmış olup, ilgili ekipman Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Gerçekleştirilen kaynak işlemi sonucunda kolektörün termal soğurucu (absorber) modülü üretimi tamamlanmıştır.



Şekil 3.7. Endüstriyel lazer kaynak.

3.2.4.2. Yalıtım ve cam montajı

Kolektör kasası, alüminyum profillerden oluşturulmuş olup köşe bağlantıları perçinleme yöntemiyle sabitlenmiştir. Taban sacı monte edildikten sonra, ısı kayıplarını minimize etmek amacıyla kasa içerisine taş yünü izolasyon malzemesi yerleştirilmiştir. Taş yünü hem taban hem de yan yüzeylere homojen bir şekilde uygulanarak ısı kayıplarının azaltılması sağlanmıştır. İzolasyon işleminin ardından, kasanın üst kısmına yerleştirilen cam yüzeyin montajı gerçekleştirilmiştir. Cam, üst çerçeveye sızdırmazlık contaları ve silikon bazlı yapıştırıcılar kullanılarak sabitlenmiştir. Bu birleşim, kolektörün dış ortam koşullarına karşı tam yalıtım sağlamasını ve mekanik dayanımının artmasını mümkün kılmıştır. Montajın genel görünümü Şekil 3.8.'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.8. Yalıtım ve cam birleşimi.

3.2.5. Güneş kolektörünün ısı analiz denklemleri

Güneş kolektörlerinin performansının artırılabilmesi için hem deneysel hem de teorik ısı analizlerin yapılması gerekmektedir (Duffie ve Beckman, 2013; Khedher, 2018). Güneş ışınımı kolektöre ulaştığında bir kısmı cam tarafından yansıtılırken, büyük bir bölümü soğurucu yüzeye ulaşır. Gelen enerjiyi soğurarak sıcaklığını artırır ve bu enerji bakır borular aracılığıyla akışkana aktarılır.

Denklem 3.6’da, soğurucu yüzeye gelen enerji akısı (W), soğurucu yüzey alanı A (m^2), anlık güneş ışınımı I (W/m^2), çalışma akışkanına aktarılan yararlı enerji Q_u (W), ısı kayıplar Q_k (W) ve depolanan enerji Q_l (W) kullanılarak hesaplanmaktadır (Duffie ve Beckman, 2013; Duffie vd., 2020).

$$Q_i = A \cdot I = Q_u + Q_l \quad (3.6)$$

Bununla birlikte, gelen ışınımın bir kısmı gökyüzüne yansıtılır, küçük bir kısmı cam tarafından soğurulur ve geri kalanı camdan geçerek kısa dalga boylu ışınım olarak soğurucu plakaya ulaşır. Bu nedenle dönüşüm faktörü, kolektörün şeffaf kapağından geçen güneş ışınımının (geçirgenlik) ve soğurucu yüzeyde soğurulan kısmın yüzdesini

ifade etmektedir. Başka bir deyişle bu faktör, kapak geçirgenliği (τ) ile soğurma oranının (α) çarpımıdır ve Denklem 3.7 ile ifade edilmektedir (Duffie ve Beckman, 2013; Duffie vd., 2020).

$$Q_i = A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha \quad (3.7)$$

Kolektör ısı soğurduğunda sıcaklığı çevre sıcaklığının üzerine çıkar ve konveksiyon ile radyasyon yoluyla atmosfere ısı kaybı meydana gelir. Isı kaybı oranı (Q_l), kolektörün toplam ısı transfer katsayısı (U_l) ve kolektör sıcaklığına bağlıdır. Denklem 3.8’te $T_{p,m}$ ortalama plaka sıcaklığını, T_o ise ortam sıcaklığını göstermektedir (Duffie ve Beckman, 2013; Duffie vd., 2020).

$$Q_l = U_l \cdot A \cdot (T_{p,m} - T_o) \quad (3.8)$$

Bu durumda, yararlı enerji transferi, kolektör tarafından soğurulan enerji ile çevreye kaybedilen enerji arasındaki fark olarak ifade edilmektedir:

$$Q_u = Q_i - Q_l = A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha - U_l \cdot A \cdot (T_{p,m} - T_o) \quad (3.9)$$

Yararlı enerji kazancı ($\dot{Q}_u$), çalışma akışkanına aktarılan ısı enerji miktarını temsil etmektedir. Denklem 3.10’da görüldüğü üzere, bu değer akışkan debisi ($\dot{m}$), özgül ısı kapasitesi (c_p), giriş sıcaklığı (T_{in}) ve çıkış sıcaklığı (T_{out}) kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (3.10)$$

Kolektörün gerçek yararlı enerji kazancını, tüm yüzeyin giriş akışkan sıcaklığında olduğu varsayımıyla elde edilebilecek yararlı enerji ile ilişkilendiren bir büyüklük tanımlamak daha uygundur. Bu büyüklük “kolektör ısı uzaklaştırma faktörü” (F_R) olarak adlandırılır ve Denklem 3.11’de verilmiştir (Duffie ve Beckman, 2013; Duffie vd., 2020).

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha - U_l \cdot A \cdot (T_{p,m} - T_o)} \quad (3.11)$$

Kolektör verimi (η), belirli bir süre boyunca elde edilen yararlı enerji kazancının ($\dot{Q}_u$) kolektöre gelen güneş ışınlamına oranı olarak tanımlanmaktadır. Anlık ısı verimliliği Denklem 3.12 ve Denklem 3.13 ile ifade edilmektedir (Duffie ve Beckman, 2013; Duffie vd., 2020).

$$\eta = \dot{Q}_u / (A \cdot I) \quad (3.12)$$

$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha - U_l \cdot (T_{out} - T_{in})/I) \quad (3.13)$$

Eğer F_R , τ , α ve U_l sabit kabul edilirse, verim üç temel işletme parametresinin lineer bir fonksiyonu haline gelir: güneş ışınlamı (I), giriş akışkan sıcaklığı (T_{in}) ve ortam sıcaklığı (T_{out}). Dolayısıyla düzlemsel bir kolektörün performansı, bu üç parametrenin deneysel olarak ölçülmesiyle tahmin edilebilir.

3.3. Termal Kolektör Deneyleri ve Simülasyonu

3.3.1. Kullanılan düzlemsel güneş kolektörü

Kolektör, çeşitli kritik bileşenlerden oluşmaktadır. Yüksek yansıtma özelliğine sahip alüminyum yüzey, düşük yayınlılık ile birlikte yüksek optik verimlilik sağlamaktadır. Isı transferi, yüksek ısıl iletkenliği ile bilinen bakır borular aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Cam, düşük demir içerikli temperli camdan üretilmiş olup %94 ışınlam geçirgenliğine sahiptir. Kolektörün yalıtımı mineral yün ile sağlanmış, böylece ısı kayıpları minimuma indirilmiştir. Kolektörün teknik özellikleri Çizelge 3.3’de sunulmaktadır.

Çizelge 3.3. Düzlemsel güneş kolektörünün teknik özellikleri.

Boyutlar	Uzunluk	1988 mm
	Genişlik	1218 mm
	Yükseklik	90 mm
	Brüt Alan	2.42 m ²
Soğurma	Malzeme	Alüminyum
	Soğuruculuk	0,95
	Yayıcılık	0,04
Boru	Malzeme	bakır
	Emici tüp sayısı	12
	Emici boru çapı	8 mm
	Tüp aralığı	105 mm
	Manifold boru çapı	18 mm
Cam	Malzeme	Temperli cam
	Geçirgenlik katsayısı	0,94
	Kalınlık	4 mm
Yalıtım	Malzeme	cam yün
	Termal iletkenlik katsayısı	0,040 W/m·K
	Kalınlık	45 mm

3.3.2. Deneyisel düzende kullanılan diğer ekipmanlar

Depo ile kolektör arasındaki akışkan dolaşımı, 6.5 m basma yüksekliğine sahip bir sirkülasyon pompası ile sağlanmıştır. Kolektörlerden elde edilen ısının depolanması için 300 litrelik sıcak su deposu kullanılmıştır. Isıl genişlemeye bağlı basınç değişimlerini dengelemek için 12 litrelik genişleme tankı sisteme entegre edilmiştir. Sistemde hava birikimini önlemek için hava tahliye vanaları yerleştirilmiştir. Kullanılan ekipmanların teknik özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanların teknik özellikleri.

Pompalar	Maksimum basma yüksekliği	6.5 m
	Maksimum çalışma basıncı	10 bar
	Maksimum çalışma sıcaklığı	130 °C
	Maksimum güç girişi	80 W
Depo	Kapasite	300 l
	Isı kaybı	85 W
	Bobin yüzey alanı	1.83 m ²
Genleşme tankı	Hacim	12 l
	Maksimum çalışma basıncı	10 bar
	On şarj basıncı ayarı	2.2 bar
	Maksimum çalışma sıcaklığı	130 °C
Hava Purjörü	Maksimum çalışma basıncı	10 bar
	Maksimum çalışma sıcaklığı	130 °C

Pompa, depo, genleşme tankı, hava tahliye vanaları ve kontrol sistemi detayları tabloya aktarılmıştır. Ayrıca, sıcaklık ölçümleri PT1000 sensörleri ile yapılmış, güneş ışıınımı ölçümleri ise 300–2800 nm spektral aralığında çalışan piranometre ile gerçekleştirilmiştir. Veri toplama sistemine ait teknik özellikler Çizelge 3.5’de sunulmuştur.

Çizelge 3.5. Ölçüm ve kontrol ekipmanlarının teknik özellikleri.

	Güç değeri	20 W
Otomatik kontrol cihazı	Girişler	4 adet sıcaklık sensörü
	Çıkışlar	2 adet pompa
	Çalışma sıcaklık aralığı	0-40°C
Sıcaklık sensörü (PT1000)	Sıcaklık sensörü (PT1000) – Ölçüm aralığı	0-110°C
	Doğruluk	Class B
Piranometre	Piranometre – Spektral aralık	300-2800 nm
	Duyarlılık	5-20 $\mu\text{V/W/m}^2$
	Maksimum güneş ışıınımı	2000 W/m ²

3.3.3. Deneyisel belirsizlik analizi

Elde edilen deneyisel sonuçların güvenilirliği için ölçülen ve hesaplanan tüm parametrelerin hata payları analiz edilmiştir. Belirsizlik hesapları, kullanılan cihazların hassasiyetleri dikkate alınarak hata yayılım yöntemi ile yapılmıştır. Ölçümlerdeki tüm mutlak ve bağıl belirsizlikler aşağıda yer alan denklem kullanılarak hesaplanmış maksimum termal verim belirsizliği %1,81 olarak hesaplanmıştır. Detaylar Çizelge 3.6’te verilmiştir.

$$U_{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial \dot{m}} U_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_{in}} U_{T_{in}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T_{out}} U_{T_{out}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial G} U_G\right)^2} \quad 3.14$$

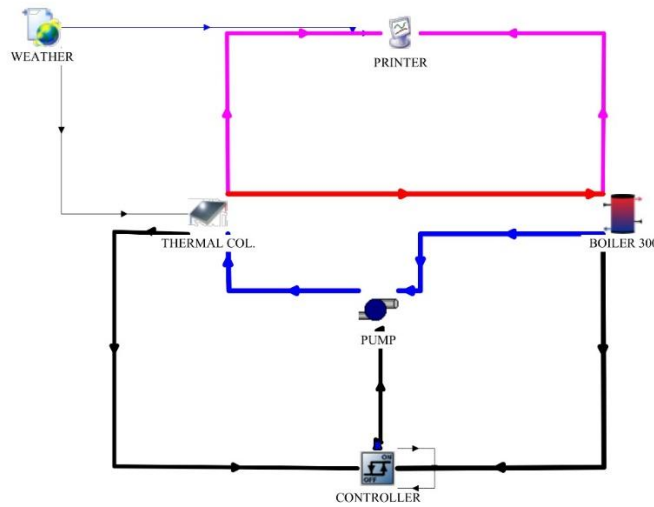
Çizelge 3.6. Termal kolektör deneyinin belirsizlik analizi.

Parametre	Hassasiyet	Belirsizlik
Debimetre (kg/saat)	$\pm 2 \text{ kg/h}$	$\pm 0.89\%$
Giriş Suyu Sıcaklığı (°C)	$\pm 0,1^\circ\text{C}$	$\pm 0.97\%$
Ortam Sıcaklığı (°C)	$\pm 0,1^\circ\text{C}$	$\pm 0.97\%$
Güneş Işıınımı (W/m ²)	$\pm 20 \text{ W/m}^2$	$\pm 0.78\%$
Verimlilik (η)		$\pm 1.81\%$

3.3.4. TRNSYS ile termal kolektörün modellemesi

Düzlemsel güneş kolektörü sisteminin TRNSYS ortamında modellenmesi Şekil 3.9’da verilmiştir. Modelde farklı sistem bileşenleri tanımlanmıştır: kolektör simülasyonu için Type 942, sıcak su deposu için Type 534, pompa için Type 654, otomatik kontrol mekanizmaları için Type 14h ve meteorolojik veri işleme için Type 15-6 kullanılmıştır. Bu bileşenler bir araya getirilerek simülasyon ortamı oluşturulmuştur. Özellikle Type 942 modeli, parametre analizlerinin kapsamlı şekilde yapılabilmesi amacıyla tercih edilmiştir.

Analiz sırasında kullanılan teknik parametreler Çizelge 3.7’de sunulmuştur. İncelenen parametre dışında kalan tüm değerler sabit tutulmuş ve her bir parametrenin verime olan etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Böylece bakır boru çapı, soğurucu yüzey özellikleri, akışkan debisi, sıcaklık farkları, yalıtım kalınlığı, ortam sıcaklığı ve soğurucu yüzey-cam mesafesinin sistem verimine etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Aşağıdaki alt başlıklarda TRNSYS’de kullanılan elemanlar açıklanmıştır.



Şekil 3.9. TRNSYS ortamında modelleme şeması.

Çizelge 3.7. TRNSYS’de tanımlanan düzlemsel güneş kolektörünün başlangıç teknik parametreleri.

Parametre	Değer
Debi	175 kg/h
Giriş suyu sıcaklığı	25 °C
Ortam sıcaklığı	25 °C
Boru çapı	8 mm
Güneş ışıınımı	1000 W/m ²
Soğuruculuk	%95
Yayınırılık	%5
Yalıtım kalınlığı	45 mm

3.3.4.1. Type 942 - Düzlemsel güneş kolektörü

Type 942, düzlemsel güneş kolektörlerinin detaylı termal analizini yapmak için geliştirilmiş bir modeldir. Bu model, kolektörün ısı performansını etkileyen parametrelerin kapsamlı şekilde incelenmesine olanak tanır. Kolektör verimliliği, ısı kayıpları, sıcaklık dağılımları ve akışkan özellikleri gibi çok sayıda parametre bu model ile analiz edilebilir (TRNSYS, 2017; Zentrum, 2006).

3.3.4.2. Type 534 - Tabakalı sıcak su deposu

Type 534, termal enerji depolama tankını modellemek için kullanılır. Bu model, tank içerisinde oluşan sıcaklık tabakalaşmasını (stratification) dikkate alarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlar. Farklı yüksekliklerde sıcaklık dağılımını hesaplayabilir (Drück, 2006).

3.3.4.3. Type 654 - Değişken hızlı pompa

Type 654, sistemdeki akışkan sirkülasyonunu sağlayan pompa modelidir. Değişken hızlarda çalışabilen bu pompa modeli, farklı debilerde enerji tüketimini ve sistem performansını analiz etmeye olanak tanır (Thermal Energy System Specialists, 2012).

3.3.4.4. Type 14h - Zaman ayarlı kontrol fonksiyonu

Type 14h, sistemin otomatik kontrolü için kullanılan bir zamanlama ve kontrol bileşenidir. Pompaların devreye girmesi, sistemin açılıp kapanması gibi kontrol mekanizmalarını belirli zaman aralıklarında veya sıcaklık şartlarına bağlı olarak yönetir (Klein vd., 2017).

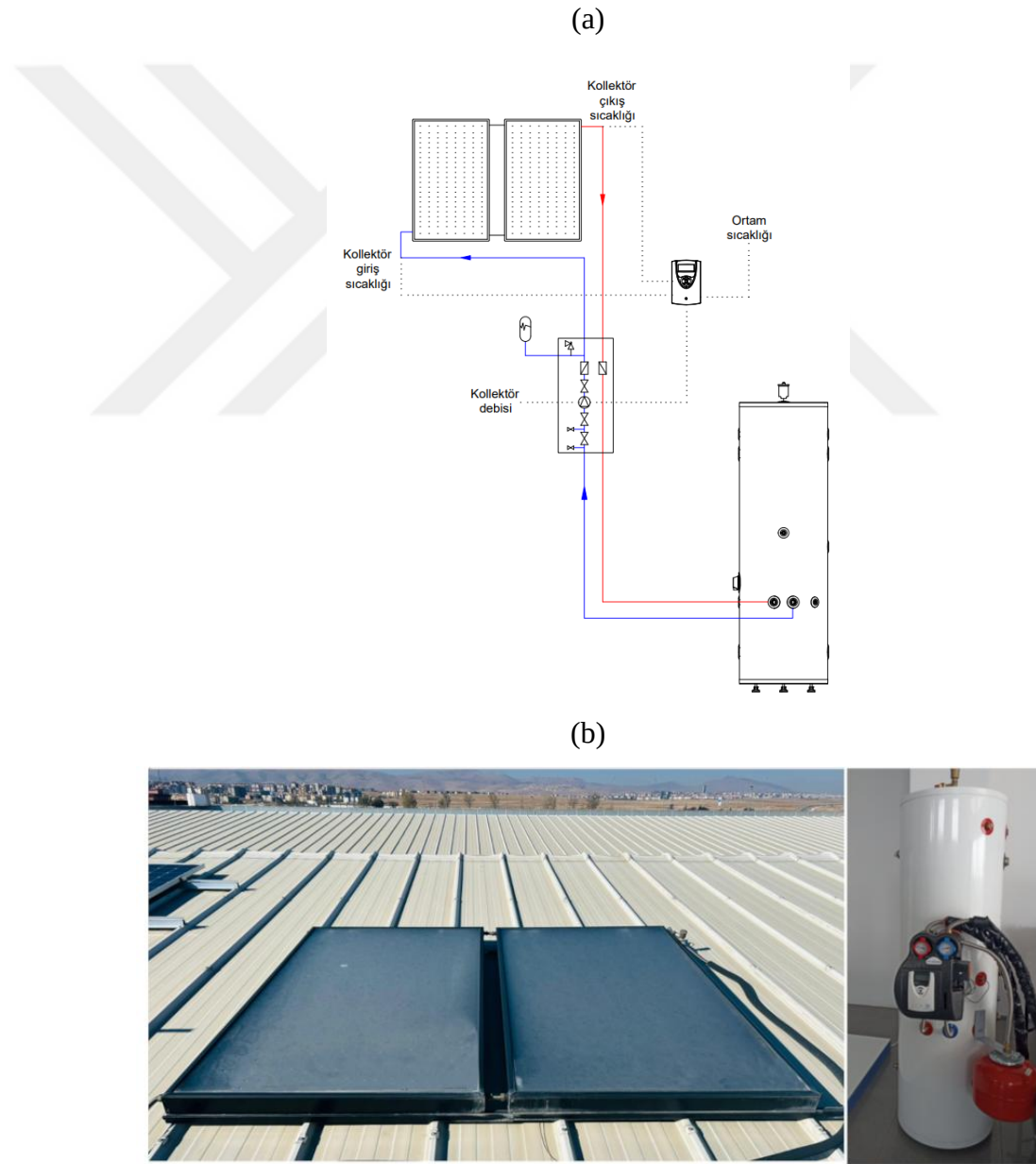
3.3.4.5. Type 15-6 - Meteorolojik veri okuyucu

Type 15-6, TRNSYS'nin hava durumu verilerini simülasyon için okunabilir bir formata dönüştüren ve işleyen bir bileşenidir. Bu tip, bir meteorolojik veri dosyasını okuyarak simülasyon süresince her bir adım için gerekli olan güneş ışıınımı, ortam sıcaklığı ve nem gibi parametreleri diğer bileşenlere (özellikle Type 942'ye) sağlar. Farklı

formatlardaki veri dosyalarını işleyebilmesi, TRNSYS'nin dünya genelindeki farklı konumlar için simülasyon yapma yeteneğini artırır.

3.3.5. Deney düzeneği

Şekil 3.10'da deneysel düzenek verilmiştir: (a) sistemin şematik diyagramı, (b) düzlemsel güneş kolektörleri (solda) ve sıcak su deposu (sağda). Deneysel sistem dört ana bileşenden oluşmaktadır: düzlemsel güneş kolektörleri, pompalar, dikey sıcak su deposu ve otomatik kontrol ünitesi. Tüm bileşenler, TRNSYS modellemesine uygun şekilde kurulmuş ve test edilmiştir.



Şekil 3.10. (a) Deney düzeneğinin şematik gösterimi (b) kolektörler (solda) ve sıcak su deposu (sağda).

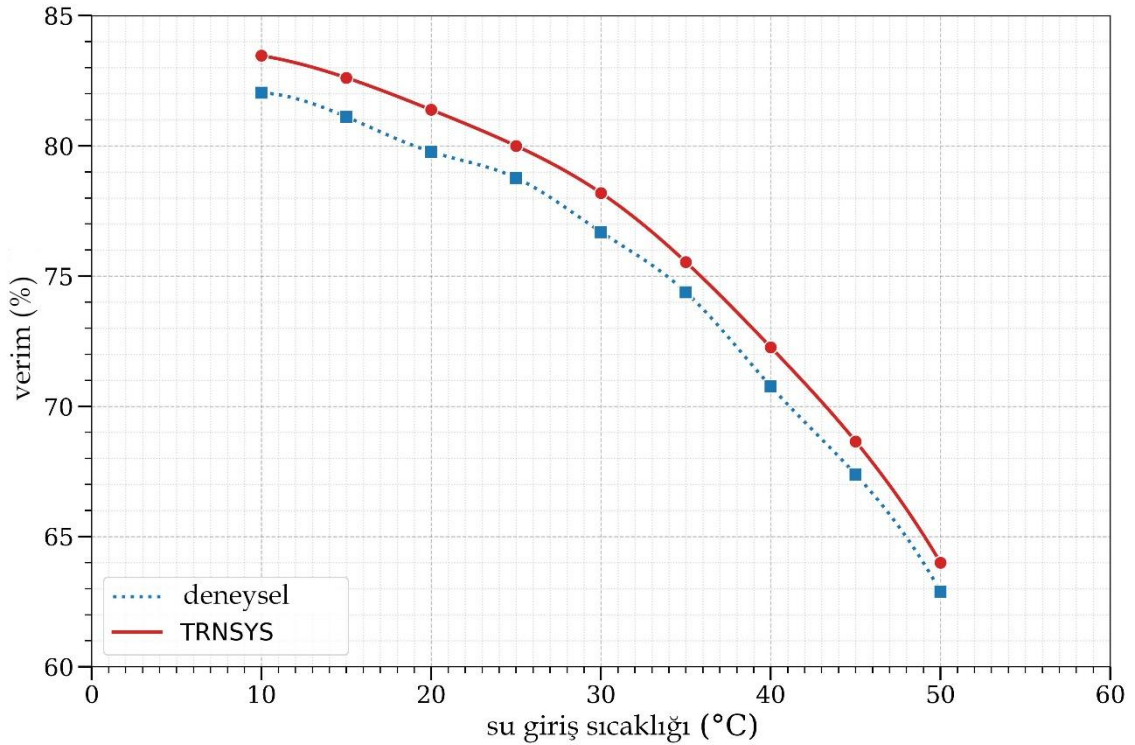
Deneyler, yarı kurak iklim kuşağında yer alan Konya, Türkiye’de (37.87°K, 32.48°D) gerçekleştirilmiştir. Bölge yazları sıcak ve kurak, kışları ise soğuk geçmektedir. Kolektörler, fabrika çatısının eğimine uygun olarak yaklaşık 15° sabit eğimle monte edilmiştir. Bu sabit açı, farklı eğim açıları için optimizasyon yapılmasına imkân tanımadığı için çalışmanın kısıtlarından biridir. Çalışma boyunca deneysel veriler, TRNSYS sonuçları ile karşılaştırılarak sayısal modelin doğruluğu değerlendirilmiştir.



4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

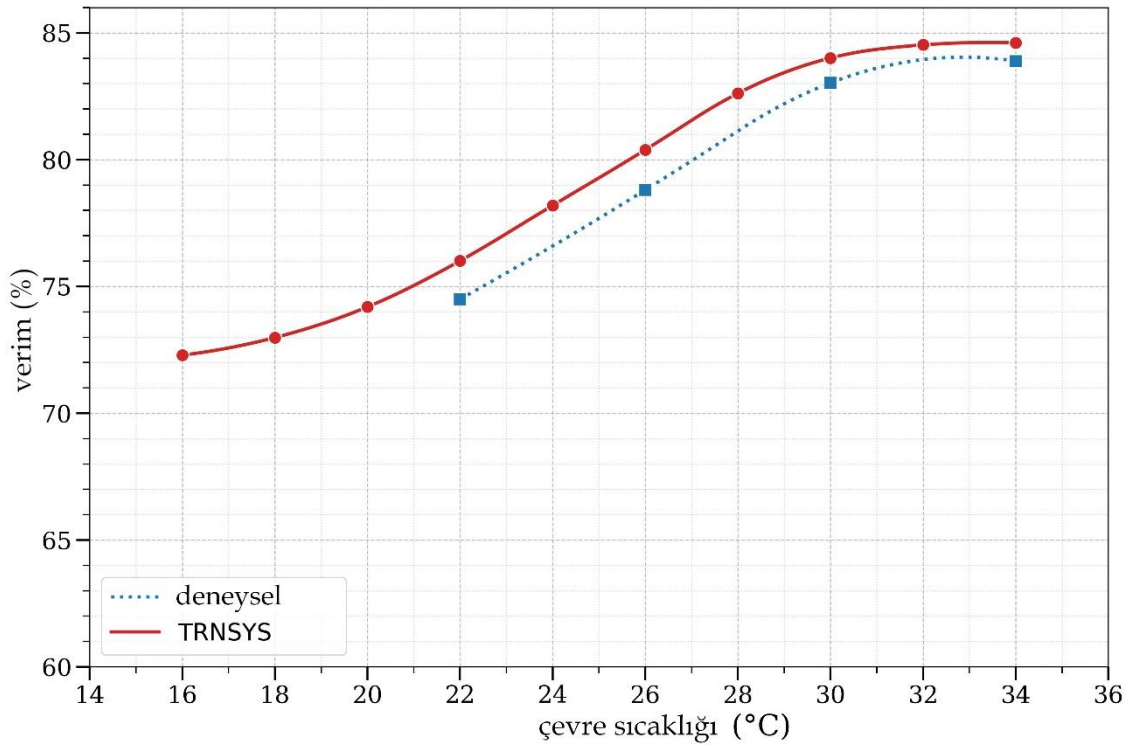
İki adet düzlemsel güneş kolektörü üretilmiş ve deneysel testler gerçekleştirilerek debi, giriş suyu sıcaklığı ve ortam sıcaklığının kolektör ısı verimine etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar ile TRNSYS simülasyon çıktıları karşılaştırıldığında, elde edilen ısı verim değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. 175 kg/h debide TRNSYS simülasyonunda verim %81,2 iken deneysel sonuç %79,8 olarak bulunmuştur. 30 °C ortam sıcaklığında TRNSYS verimi %84,1 iken, deneysel testlerde %81,4 olarak ölçülmüştür. 25 °C giriş suyu sıcaklığında TRNSYS verimi %81 olurken, deneysel sonuç %78,8'dir. Yapılan analiz, deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farkın yaklaşık %4 civarında olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, giriş suyu sıcaklığının artışı kolektör veriminde düşüşe yol açmaktadır. Sayısal sonuçlara göre, 10 °C giriş sıcaklığında verim %83,5 iken, 50 °C'de bu değer %64,7'ye gerilemektedir. Bu eğilim, ısı transferini sağlayan soğurucu plaka ile giriş suyu arasındaki sıcaklık farkıyla açıklanabilir. Düşük giriş sıcaklıklarında sıcaklık farkı daha yüksek olduğu için ısı transferi artar ve verim yükselir. Ancak giriş sıcaklığı arttıkça sıcaklık farkı azalır, bu da ısı transfer hızını düşürerek verimi azaltır. Bu durum, ısı transferinin temel prensipleri ile tutarlıdır.



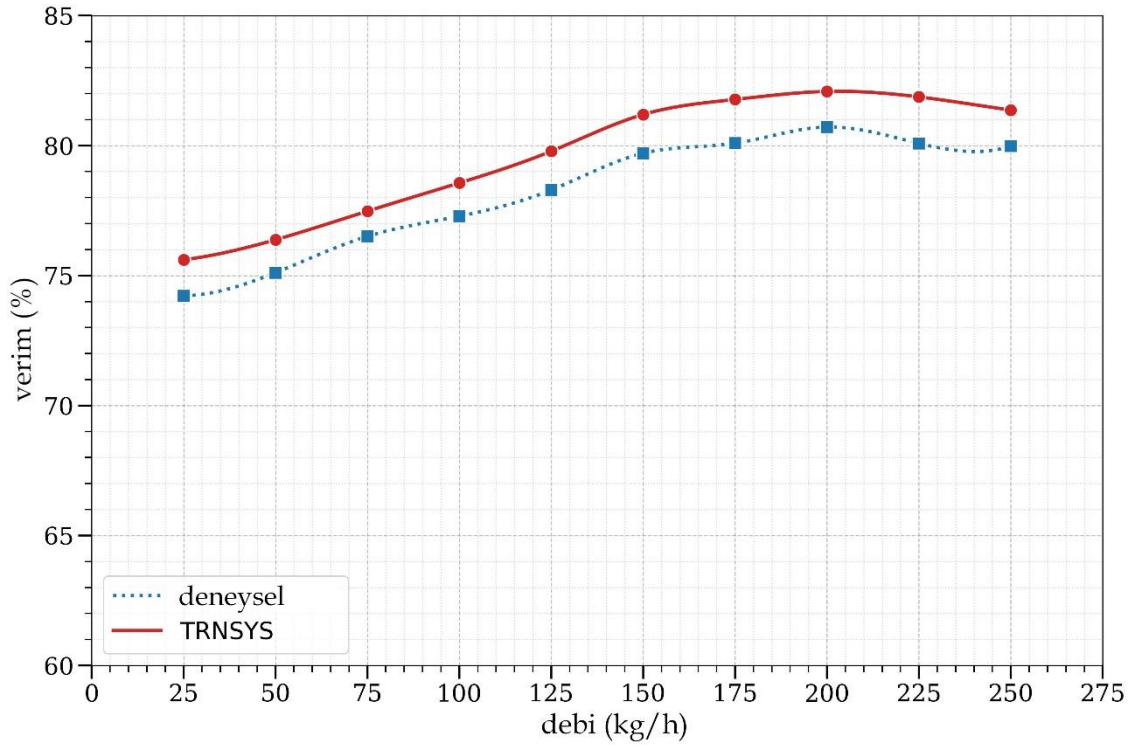
Şekil 4.1. Giriş suyu sıcaklığının kolektör verimine etkisi (deneysel: mavi noktalı çizgi, sayısal: kırmızı düz çizgi).

Şekil 4.2’de ortam sıcaklığının verim üzerindeki etkisi sunulmuştur. Ortam sıcaklığı arttıkça, soğurucu yüzey sıcaklığındaki artış nedeniyle verim yükselmektedir. Bunun temel nedeni, daha yüksek ortam sıcaklıklarının, soğurucu plaka ile çevre arasındaki sıcaklık farkını azaltarak konvektif ve radyatif kayıpları düşürmesidir. Ancak 34 °C’nin üzerinde verimdeki artış hızı azalmaktadır. Bunun sebebi, ortam sıcaklığı yükseldikçe plaka sıcaklığının da artması ve radyatif kayıpların hızla artmasıdır. Stefan–Boltzmann yasasına göre radyatif kayıplar, plakanın mutlak sıcaklığının dördüncü kuvveti ile orantılıdır. Bu nedenle, belirli bir noktadan sonra verim kazancı sınırlı kalmaktadır.



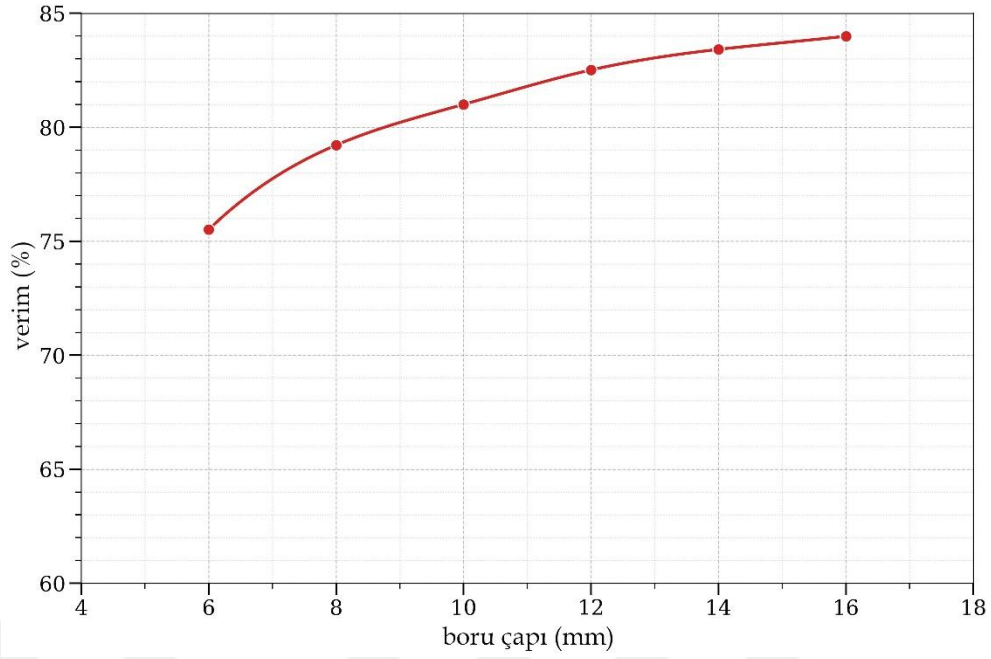
Şekil 4.2. Ortam sıcaklığının kolektör verimine etkisi (deneysel: mavi noktalarlı çizgi, sayısal: kırmızı düz çizgi).

Şekil 4.3’de debi ile verim arasındaki ilişki gösterilmektedir. Debi 25 kg/h’dan 200 kg/h’ye artırıldığında kolektör veriminde belirgin bir artış gözlenmiştir, ancak bu noktadan sonra verim bir miktar azalmıştır. TRNSYS sonuçlarına göre maksimum verim %81,2 ile 175 kg/h debide elde edilmiştir.



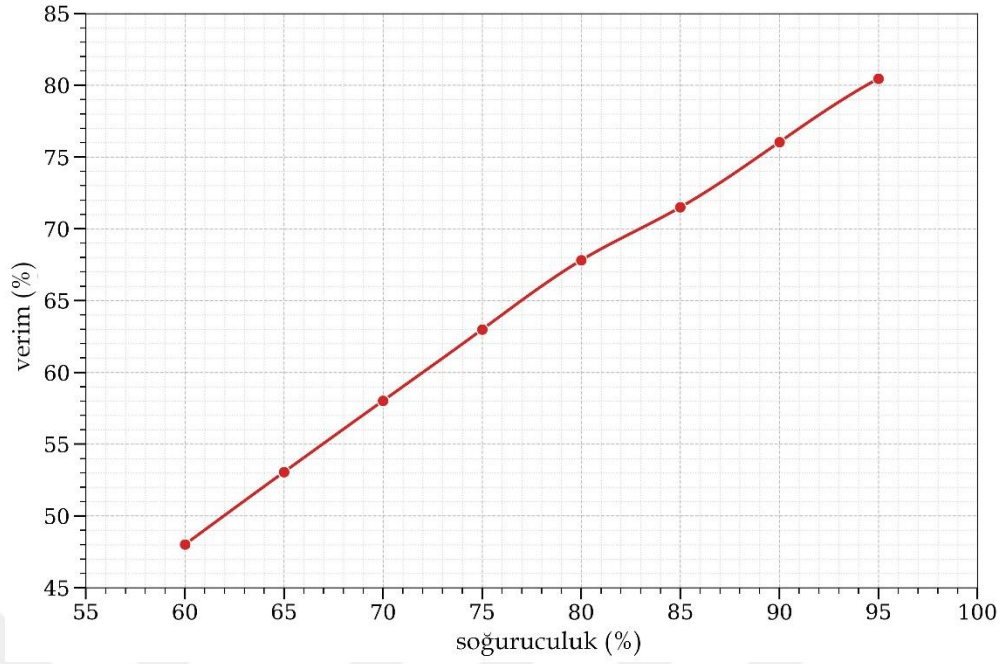
Şekil 4.3. Debinin kolektör verimine etkisi (deneysel: mavi noktalı çizgi, sayısal: kırmızı düz çizgi).

Bu noktadan itibaren yalnızca sayısal simülasyon sonuçları sunulmaktadır. TRNSYS analizleri, bakır boru çapının artırılmasının ısı transfer yüzey alanını büyütürken kolektör verimini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir. Ancak bu artış, malzeme maliyetlerinin yükselmesiyle dengelenmelidir. Şekil 4.4'teki sonuçlar, boru çapı 6 mm'den 16 mm'ye çıkarıldığında verimin %75,6'dan %84,3'e yükseldiğini göstermektedir. Fakat verim artışı boru çapı büyüdükçe azalan bir eğilim göstermektedir. Örneğin çapın 6 mm'den 8 mm'ye çıkarılması yaklaşık %4 verim artışı sağlarken, 10 mm'den 16 mm'ye çıkış yalnızca %2 ilave artış sağlamaktadır. Dolayısıyla, ekonomik uygulanabilirlik açısından 8–10 mm çap aralığı en uygun çözümü sunmaktadır. Ayrıca büyük çaplı boruların üretim zorlukları (ultrasonik kaynaklama vb.) da dikkate alınmalıdır.



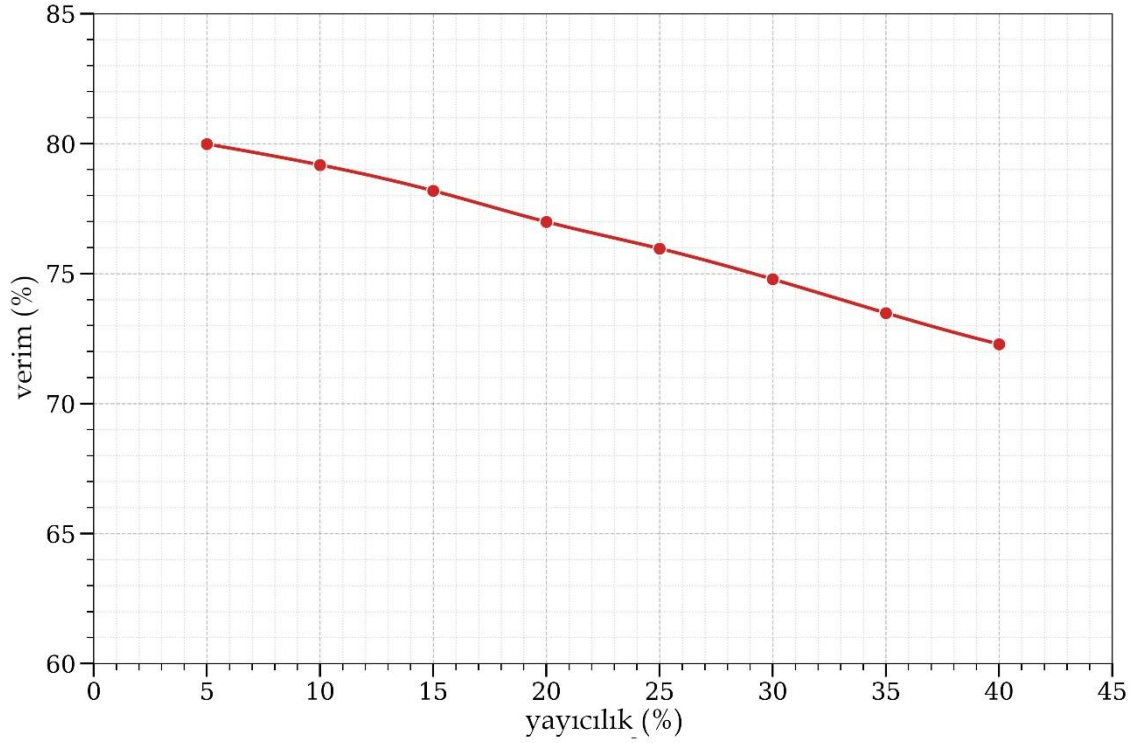
Şekil 4.4. Boru çapının kolektör verimine etkisi.

Şekil 4.5, soğurucu plakanın verim üzerindeki etkisini göstermektedir. Soğuruculuk katsayısı arttıkça verim neredeyse doğrusal bir artış göstermektedir. Örneğin, soğuruculuk 0,60 olduğunda verim %48,4 iken, 0,95 değerinde %81,2'ye çıkmaktadır. Yüksek soğuruculuk, gelen ışıının daha büyük kısmının yakalanmasını sağlayarak verimi artırmaktadır. Modern güneş kolektörlerinde tipik soğuruculuk değerleri 0,90–0,95 aralığında olup, performans ve maliyet arasında iyi bir denge sunmaktadır.



Şekil 4.5. Soğuruculuk oranının kolektör verimine etkisi.

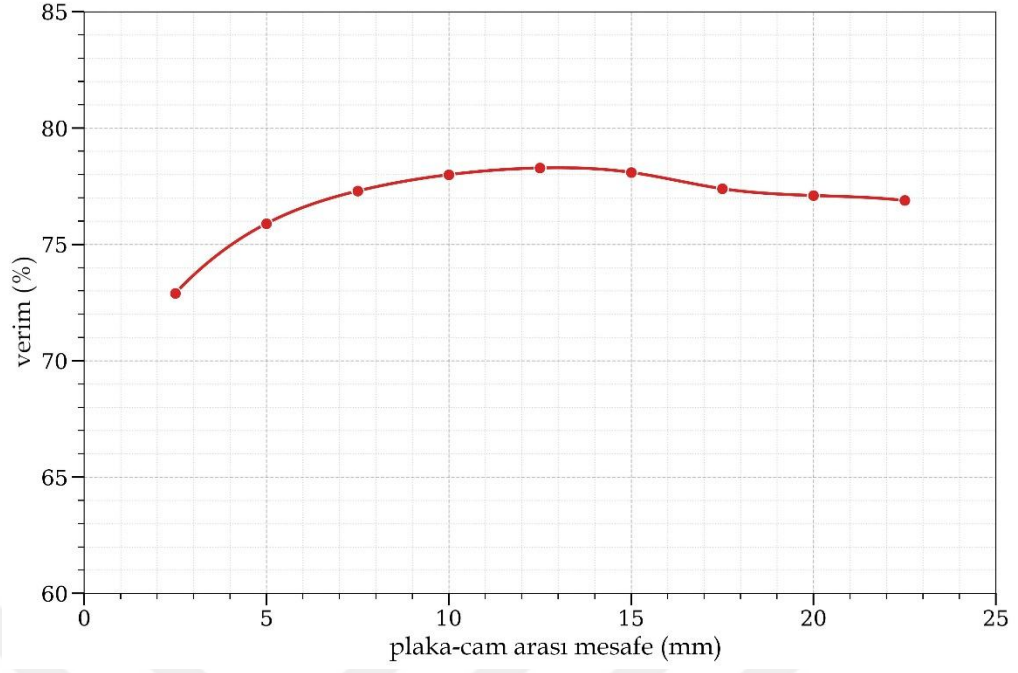
Şekil 4.6’da yayıcılık (emissivity) verim üzerindeki etkisi verilmiştir. Yayıcılık arttıkça radyatif kayıplar artmakta ve verim düşmektedir. Stefan–Boltzmann yasasına göre, radyatif kayıp plakanın sıcaklığının dördüncü kuvveti ve yüzey yayıcılığı ile orantılıdır. Analizler, yayıcılık katsayısı 0,05’ten 0,40’a yükseldiğinde verimin %81,2’den %72,9’a düştüğünü göstermektedir. Bu nedenle modern seçici kaplamalar (örneğin TiNOX, Al-N/Al) genellikle 0,04–0,08 aralığında düşük yayıcılık değerlerine sahiptir.



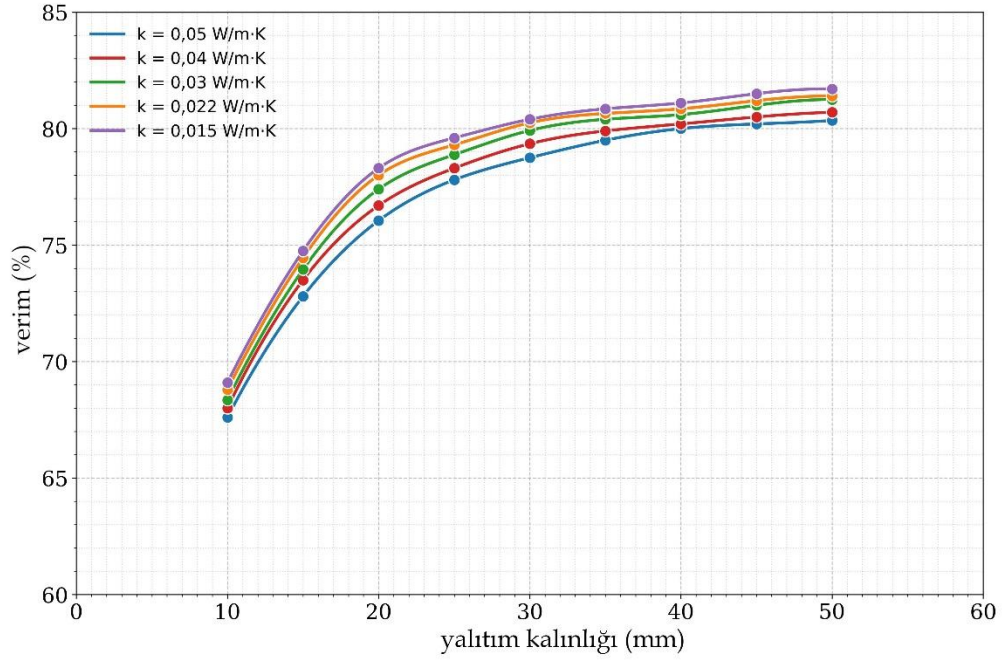
Şekil 4.6. Yayıcılığın kolektör verimine etkisi.

Soğuruc plaka ile cam arasındaki hava boşluğu da kolektör performansını etkilemektedir (Şekil 4.7). Hava boşluğu, konvektif ısı kayıplarını azaltarak yalıtım görevi görmektedir. Analiz sonuçları, hava boşluğu 2,5 mm iken verimin %72,5 olduğunu, 13 mm'ye çıkarıldığında ise %78'e yükseldiğini göstermektedir. Ancak boşluk 15 mm'nin üzerine çıktığında kenar kayıpları artmakta ve verim düşmektedir. 22,5 mm boşlukta verim %77,4 olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.8'de farklı yalıtım malzemeleri ve kalınlıklarının verim üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Isıl iletkenlik katsayısı 0,015–0,05 W/m·K aralığında değişen beş malzeme incelenmiştir. Mineral yün ($k=0,04$ W/m·K), 45 mm kalınlıkta %81,2 verim sağlamıştır. Aerogel ($k=0,015$ W/m·K), çok daha düşük kalınlıklarda benzer verim sunmuş ancak maliyeti oldukça yüksektir. Poliüretan köpük ($k=0,022$ W/m·K), eşdeğer kalınlıklarda mineral yünden daha iyi performans sağlamıştır. Düşük maliyetli ancak daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin ise yüksek verime ulaşabilmesi için daha fazla kalınlığa ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Sonuçlar, (1) düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip malzemelerin daha ince kalınlıklarda yeterli performans sağladığını, (2) 45 mm'nin üzerindeki kalınlıklarda verim artışının ihmal edilebilir düzeye indiğini göstermektedir.



Şekil 4.7. Plaka-cam arası mesafesinin kolektör verimine etkisi.



Şekil 4.8. Yalıtım kalınlığının kolektör verimine etkisi.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu kapsamlı çalışma, güneş enerjisi termal kollektör performansı üzerinde çeşitli tasarım parametrelerinin etkisini sayısal simülasyon ve deneysel doğrulama yöntemleriyle ortaya koymuştur. TRNSYS simülasyon sonuçları ile deneysel veriler arasında yalnızca %4'lük bir sapma olması, geliştirilen modelin güvenilirliğini ve tasarım iyileştirmeleri için kullanılabilirliğini teyit etmiştir.

Çalışmadan elde edilen temel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- **Akış Debisi:** Maksimum termal verim değerlerine 175-225 kg/h debi aralığında ulaşılmış olup, en yüksek verim %81,2 ile 175 kg/h'de gözlemlenmiştir. Bu debinin üzerinde yapılan artışların verim üzerinde ihmal edilebilir bir katkısı olduğu tespit edilmiştir.
- **Ortam Sıcaklığı:** Termal verim, sıcaklık değişimlerine karşı oldukça hassastır. En iyi performansın 30-34°C ortam sıcaklığı aralığında sağlandığı ve %84,1 verim değerine 34°C'de ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu aralığın dışında termal verimde kayda değer bir artış gözlenmemiştir.
- **Soğurma (Absorpsiyon) Katsayısı:** Soğurma katsayısı ile kollektör verimi arasında doğrudan bir lineer ilişki olduğu kanıtlanmıştır. Soğurma katsayısı 0,60'dan 0,95'e yükseldiğinde, sistem verimi %48,4'ten %81,2'ye çıkmış; bu da yüksek kaliteli seçici yüzey kaplamalarının önemini açıkça ortaya koymuştur.
- **Yayıcılık Katsayısı:** Yayıcılık katsayısının verim üzerinde negatif bir etkisi bulunmaktadır. Katsayının 0,05'ten 0,40'a yükselmesi, verimi %81,2'den %72,9'a düşürmüştür. Ancak, soğurma katsayısının pozitif etkisiyle kıyaslandığında, bu olumsuz etkinin daha zayıf kaldığı ve performans artırımı için önceliğin soğurma oranını artırmaya verilmesinin daha etkili olacağı anlaşılmıştır.
- **Yalıtım Performansı:** Düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip malzemelerin (ör. aerogel, $k=0,015 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), geleneksel seçeneklere kıyasla hedeflenen verim değerlerine daha ince kesitlerde ulaşabildiği görülmüştür. Yalıtım kalınlığının 45 mm'yi aşması durumunda ise verimdeki artışın azalarak devam ettiği (azalan verim yasası) gözlemlenmiştir.
- **Plaka-Cam Aralığı:** Optimum termal verim değerlerine yaklaşık 13 mm'lik bir plaka-cam aralığında ulaşıldığı tespit edilmiştir. Mesafenin 2,5 mm'ye

düşürülmesi verimi %5,5 oranında azaltırken, 22,5 mm'ye çıkarılması ise %0,6'lık bir düşüşe sebep olmuştur. Bu bulgu, konvektif ısı kaybını minimize eden ve sistem performansını dengeleyen ideal bir aralığın varlığını kanıtlamıştır.

5.2. Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen bulgular ışığında, gelecekte yapılacak araştırmalar ve uygulamalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır.

Tasarım ve uygulama önerileri:

- Soğurucu yüzey için 0,90-0,95 aralığında yayıcılık ise 0,20'den düşük yayma katsayısına sahip modern seçici kaplamaların tercih edilmesi önerilmektedir.
- Mineral yün ($k=0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) ile 45 mm yalıtım kalınlığı, maliyet-performans dengesi açısından optimal çözüm olarak değerlendirilebilir.
- Plaka-cam arasındaki hava boşluğunun 13 mm civarında tutulması, sistem verimliliği için kritik öneme sahiptir.

Gelecek çalışma önerileri:

- Farklı iklim koşulları altında uzun dönemli performans değerlendirme çalışmalarının yürütülmesi,
- Kollektör sistemlerinin yaşam döngü maliyeti ve geri ödeme süreleri üzerine detaylı ekonomik analizlerin gerçekleştirilmesi,
- Nanoteknoloji tabanlı gelişmiş kaplama malzemelerinin kollektör performansına etkilerinin araştırılması,
- Hibrit sistemler (PV/T kollektörler) için benzer çalışmaların yapılması,
- Farklı kollektör geometrilerinin (vakum tüplü, düzlemsel vb.) karşılaştırmalı analizlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abu Mallouh, M., AbdelMeguid, H. ve Salah, M. (2022). A comprehensive comparison and control for different solar water heating system configurations. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 35, 101210. doi:10.1016/J.JESTCH.2022.101210
- Agnihotri, O. P. ve Gupta, B. K. (1981). *Solar Selective Surfaces*. John Wiley & Sons.
- Alghoul, M. A., Sulaiman, M. Y., Azmi, B. Z. ve Wahab, M. A. (2005). Review of materials for solar thermal collectors. *Anti-Corrosion methods and materials*, 52(4), 199-206.
- Alqahtani, T., Mellouli, S., Askri, F., Algarni, S., Alshammari, B. M. ve Kolsi, L. (2024). Numerical investigation on thermal performance of three configurations of solar thermal collector integrated with metal hydride. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63, 105314. doi:10.1016/J.CSITE.2024.105314
- Altiparmak, A. E. (2019). *Implementation and analysis of thermal performance testing of thermal solar collectors with different properties*. Haran University, ŞANLIURFA.
- Anderson, G. P., Clough, S. A., Kneizys, F. X., Chetwynd, J. H. ve Shettle, E. P. (1995). *AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0-120 km)*. Environmental Research Papers, No. 954.
- Anderson, T., Duke, M. ve Carson, J. K. (2010). The Effect of Colour on the Thermal Performance of Building Integrated Solar Collectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 350-354. doi:10.1016/j.solmat.2009.10.012
- Ayompe, L. ve Duffy, A. (2013). Analysis of the Thermal Performance of a Solar Water Heating System With Flat Plate Collectors in a Temperate Climate. *Applied Thermal Engineering*, 58(1-2), 447-454. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.04.062
- Barone, G., Buonomano, A., Kalogirou, S., Ktistis, P. ve Palombo, A. (2024). A holistic methodology for designing novel flat plate evacuated solar thermal collectors: Modelling and experimental assessment. *Renewable Energy*, 232. doi:10.1016/j.renene.2024.120967
- Barshilia, H. C., Selvakumar, N., Rajam, K. S. ve Biswas, A. (2008). Optical properties and thermal stability of TiAlN/AlON tandem absorber prepared by reactive DC/RF magnetron sputtering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(9), 1425-1433.

- Besagni L.; Nesa R.; Molinaroli L.; Quaglia P., G. ; C. (2017). Field tests of a novel solar-assisted dual source multifunctional heat pump. *Proceedings of the ISES Solar World Congress*, 2178-2189.
- Bird, R. E. ve Riordan, C. (1986). Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(1), 87-97.
- Buker, M. S. ve Riffat, S. B. (2015). Building integrated solar thermal collectors - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 327-346. doi:10.1016/j.rser.2015.06.009
- Charvát, P., Pech, O. ve Hejčík, J. (2013). Experimental Investigations of the Performance of a Solar Air Collector With Latent Heat Thermal Storage Integrated With the Solar Absorber. *Epj Web of Conferences*, 45, 01127. doi:10.1051/epjconf/20134501127
- Chaurasia, P. B. L. (1992). Comparative study of insulating materials in solar water storage systems. *Energy Conversion and Management*, 33(1), 7-12. doi:10.1016/0196-8904(92)90141-I
- Choi, H. U. ; et al. (2018). Experimental study on the heat gain of water in hybrid solar collector integrated with fin-and-tube heat exchanger with respect to air and water flow rate. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 383(1), 012123.
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12(3), 333-346.
- Ding, Z., Qi, C., Wang, Y., Tu, J., Wang, C. ve Du, X. (2022). Spectrally selective absorption coatings and their applications: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102031.
- Drück, H. (2006). Multiport Store Model for TRNSYS-Stratified Fluid Storage Tank with four Internal Heat Exchangers. *Ten Connections for Direct Charge and Discharge and an Internal Electrical Heater (type340)*, University of Stuttgart, Germany.
- Duffie, J A ve Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. (4th ed., Ed.). John Wiley & Sons.
- Duffie, John A. ve Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*. *Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition*. doi:10.1002/9781118671603
- Duffie, John A, Beckman, W. A. ve Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons.

- Dutkowski, K., Kruzel, M. ve Bohdal, T. (2021). Experimental Studies of the Influence of Microencapsulated Phase Change Material on Thermal Parameters of a Flat Liquid Solar Collector. *Energies*, 14(16), 5135. doi:10.3390/en14165135
- Ekechukwu, O. V ve Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 615-655.
- Enerji Bakanlığı. (2025). *Bilgi Merkezi - Güneş*. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> adresinden erişildi.
- Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L. ve Pérez, M. (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1695-1721.
- Foukal, P. V. (1990). *Solar Astrophysics*. John Wiley & Sons.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Othman, M. ve Yahya, M. (2011). Analytical and Experimental Studies on the Thermal Efficiency of the Double-Pass Solar Air Collector With Finned Absorber. *American Journal of Applied Sciences*, 8(7), 716-723. doi:10.3844/ajassp.2011.716.723
- Fuentes-Silva, A. L., Lizárraga-Morazán, J. R., Picón-Núñez, M. ve Martínez-Rodríguez, G. (2019). Incorporating the concept of flexible operation in the design of solar collector fields for industrial applications. *Energies*, 12(570), 1-20.
- Goswami, D. Y., Kreith, F. ve Kreider, J. F. (2015). *Principles of Solar Engineering*. (3rd ed., Ed.). CRC Press.
- Günay, A. A., Kim, H., Nagarajan, N. H., Lopez, M. I. S., Kantharaj, R., Alsaati, A. A., ... Miljkovic, N. (2018). Optically Transparent Thermally Insulating Silica Aerogels for Solar Thermal Insulation. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 10(15), 12603-12611. doi:10.1021/acsami.7b18856
- Hassan, H. Z. ve Mohamad, A. A. (2012). A review on solar-powered closed physisorption cooling systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2516-2538.
- Henning, H. M. (2007). Solar assisted air conditioning of buildings – an overview. *Applied Thermal Engineering*, 27(10), 1734-1749.
- Henninger, J. H. (1984). *Solar absorptance and thermal emittance of some common spacecraft thermal-control coatings* (C. 1121). National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical

- Ihaddadene, N., Ihaddadene, R. ve Betka, A. (2018). Experimental investigation of Using a Novel insulation Material on the Functioning of a Solar Thermal Collector. *Journal of Solar Energy Engineering*, 140(6), 061001.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press.
- IRENA - International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable Capacity Statistics 2025*. IRENA. <https://www.irena.org/Statistics> adresinden erişildi.
- Kalogirou, S A. (2003). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy*, 76(4), 337-361.
- Kalogirou, S A. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(3), 242-281.
- Kalogirou, S A. (2014). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. (2nd ed., Ed.). Academic Press.
- Kalogirou, S A, Karellas, S., Braimakis, K., Stanciu, C. ve Badescu, V. (2016). Exergy analysis of solar thermal collectors and processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 56, 106-137. doi:10.1016/j.pecs.2016.05.002
- Kalogirou, Soteris A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in energy and combustion science*, 30(3), 231-295.
- Kanyarusoke, K. (2020). Problems of engineering entrepreneurship in Africa: A design optimization example in solar thermal engineering. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(2), 345-356. doi:10.1016/J.JESTCH.2019.05.002
- Kaushika, N. D. ve Sumathy, K. (2003). Solar transparent insulation materials: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 7(4), 317-351.
- Kaya, M. N., Aksoy, M. H. ve Kose, F. (2017). Renewable energy in Turkey: potential, current status and future aspects. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 15(1), 65.
- Kennedy, C. E. (2002). *Review of mid-to high-temperature solar selective absorber materials*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Khedher, N. Ben. (2018). Experimental Evaluation of a Flat Plate Solar Collector Under Hail City Climate. *Engineering Technology & Applied Science Research*, 8(2), 2750-2754. doi:10.48084/etasr.1957
- Kırar, E., Güven, C., Işiker, Y. ve Aktacir, M. A. (2018). Düzlemsel Tip Güneş Kollektörlerde Verim Artırıcı Uygulamalar. *Harran Üniversitesi Mühendislik*

- Dergisi*, 3(3), 38-42. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/humder/issue/42425/439755> adresinden erişildi.
- Kim, D. S. ve Ferreira, C. A. I. (2008). Solar refrigeration options – a state-of-the-art review. *International Journal of Refrigeration*, 31(1), 3-15.
- Klein, S. A., Beckman, W. A., Mitchell, J., Duffie, J., Duffie, N., Freeman, T., ... Kummer, J. (2017). TRNSYS 18: A transient system simulation program: Standard Component Library Overview. *TRNSYS*, 3, 389-396.
- Kong, W., Han, J., Perers, B., Furbo, S. ve Fan, J. (2015). Side by Side Tests of Two SDHW Systems With Solar Collectors With and Without Antireflection Treatment. *Energy Procedia*, 70, 462-469. doi:10.1016/j.egypro.2015.02.148
- Kostić, L. T. ve Pavlović, Z. T. (2012). Optimal position of flat plate reflectors of solar thermal collector. *Energy and Buildings*, 45, 161-168. doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.059
- Kumar, S., Thakur, R., Suri, A. R. S., Kashyap, K., Singhy, A., Kumar, S. ve Kumar, A. (2021). A comprehensive review of performance analysis of with and without fins solar thermal collector. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 16. doi:10.5098/hmt.16.4
- Lampert, C. M. (1979). Coatings for enhanced photothermal energy collection I. Selective absorbers. *Solar Energy Materials*, 1(5-6), 319-341.
- Leong, K. Y., Ong, H. C., Amer, N. H., Norazrina, M. J., Risby, M. S. ve Ku Ahmad, K. Z. (2016). An overview on current application of nanofluids in solar thermal collector and its challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1092-1105. doi:10.1016/j.rser.2015.09.060
- Li, Q., Zheng, C., Shirazi, A., Bany Mousa, O., Moscia, F., Scott, J. A. ve Taylor, R. A. (2017). Design and analysis of a medium-temperature, concentrated solar thermal collector for air-conditioning applications. *Applied Energy*, 190, 1159-1173. doi:10.1016/j.apenergy.2017.01.040
- Li Y.; Pan Y.; Zhang F.; Meng Z.; Zhang Y., Z. ; Du. (2022). Experimental performance study of solar-assisted enhanced vapor injection air-source heat pump system. *Energies*, 15(20), 7730.
- Lorenzo, E. (2011). Energy collected and delivered by PV modules. A. ; H. Luque S. (Ed.), *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* içinde (ss. 984-1042). John Wiley & Sons.

- Mellouli, S., Askri, F., Alqahtani, T., Algarni, S., Alshammari, B. M. ve Kolsi, L. (2024). Feasibility study of a metal hydride-based solar thermal collector system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61, 105005. doi:10.1016/J.CSITE.2024.105005
- Messenger, R. A. ve Abtahi, A. (2017). *Photovoltaic Systems Engineering*. (4th ed., Ed.). CRC Press.
- Nann, S. ve Emery, C. (1992). Spectral effects on PV-device rating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 27(3), 189-216.
- O’Kane, M. (2025, 2 Ağustos). Solar Spectrum: Solar Radiation and Irradiance. 22 Haziran 2025 tarihinde <https://www.ossila.com/pages/the-solar-spectrum> adresinden erişildi.
- Omar, M. A. ve Hamdemir, V. (2024). Güneş Kollektörlerinde Elips Kesitli Boru Kullanımının İncelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(1), 1-13. doi:10.31466/kfbd.1255722
- Osorio, J. D., Rivera-Alvarez, A., Girurugwiro, P., Yang, S., Hovsopian, R. ve Ordonez, J. C. (2017). Integration of transparent insulation materials into solar collector devices. *Solar Energy*, 147, 8-21.
- Özcan, Y. ve Deniz, E. (2023). Solar thermal waste heat energy recovery in solar distillation systems by using thermoelectric generators. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 40, 101362. doi:10.1016/J.JESTCH.2023.101362
- Özdemir, M. B., Yatarkalkmaz, M. M. ve Dağlı, G. (2017). Farklı soğurucu yüzey tiplerine sahip düzlemsel kolektörlerin deneysel analizi. *Politeknik Dergisi*, 20(2), 441-449.
- Reim, M., Körner, W., Manara, J., Korder, S., Arduini-Schuster, M., Ebert, H. P. ve Fricke, J. (2005). Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting. *Solar Energy*, 79(2), 131-139. doi:10.1016/J.SOLENER.2004.08.032
- Rubin, M. (1985). Optical properties of soda lime silica glasses. *Solar energy materials*, 12(4), 275-288.
- Rusea, D., Moldovan, M. ve Visa, I. (2023). Novel Pseudo 3D Design of Solar Thermal Facades with Triangle and Trapeze Solar Thermal Collectors for Increased Architectural Acceptance. *Mechanisms and Machine Science* içinde (C. 134 MMS, ss. 27-36). doi:10.1007/978-3-031-32439-0_4
- Rüther, R. ve Klesis, D. (1996). Spectral effects on amorphous silicon solar module fill factors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 41-42, 485-491.

- Sabiha, M. A., Saidur, R., Mekhilef, S. ve Mahian, O. (2015). Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1038-1054.
- Sager J. P., J. ; P. (2021). Assessing the performance and cost-competitiveness of a dual-source solar assisted heat pump in cold climates. *E3S Web of Conferences*, 246, 06007.
- Sethi, V. P. ve Sharma, S. K. (2007). Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 81(12), 1447-1459.
- Sharma, A., Chen, C. R. ve Lan, N. V. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1185-1210.
- Sharon, H. ve Reddy, K. S. (2015). A review of solar energy driven desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1080-1118.
- Shi, Y., Zhu, L. J., Cao, Y. Z. ve Shen, M. C. (2014). Numerical Simulation Study on Optimization of Solar Flat-Plate Collector. *Applied Mechanics and Materials*, 635-637, 523-527. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.635-637.523
- SHURA. (2021). *Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Kullanımı Raporu*. İstanbul Enerji Platformu.
- Solimpeks. (2025). Solar Collectors. 23 Nisan 2025 tarihinde <https://www.solimpeks.com.tr/wunder-als-termal-gunes-kollektorleri/> adresinden erişildi.
- Spencer, J. W. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), 172.
- Sukhatme, S. P. ve Nayak, J. K. (1997). Solar energy in western Rajasthan. *Current Science*, 62-68.
- Sultan, S. M., Abdullah, M. Z., Hussein, H. M., Tso, C. P. ve Sopian, K. (2021). Modified methods for assessing photovoltaic solar thermal collectors. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101690. doi:10.1016/J.CSITE.2021.101690
- Tanaka, H. (2011). Solar thermal collector augmented by flat plate booster reflector: Optimum inclination of collector and reflector. *Applied Energy*, 88(4), 1395-1404. doi:10.1016/j.apenergy.2010.10.032
- Thermal Energy System Specialists, L. L. C. (2012). *TESS Libraries Documentation - Type 654: Variable Speed Pump*.
- Tian, Y. ve Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538-553.

- TRNSYS. (2017). *TRNSYS 18 Documentation: Mathematical Reference - Type 942: Flat-Plate Solar Collector*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- Visa, I., Moldovan, M. ve Duta, A. (2020). Experimental performance assessment of vertically installed solar thermal collectors. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 8(4), 692-700. doi:10.13044/j.sdewes.d7.0287
- Wäckelgård, E., Niklasson, G. A. ve Granqvist, C. G. (2013). Selectively solar-absorbing coatings. *Solar Energy* içinde (ss. 109-144). Routledge.
- Wang Y.; Hu T.; Yu W.; Han X., G. ; Y. (2022). Analysis of key influencing factors for multi-mode solar heat pump systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 14(5).
- Weiss, W. ve Rommel, M. (2008). *Process Heat Collectors: State of the Art within Task 33/IV*. IEA Solar Heating and Cooling Programme.
- Wu M.; Feng J., J. ; S. (2023). The application of a solar–air-source heat pump dual-supply heating system in a high-cold area in China. *Processes*, 11(3), 737.
- Yassen, T. A. (2012). Experimental and Theoretical Study of a Parabolic Trough Solar Collector. *Anbar Journal for Engineering Sciences*, 5(1), 109-125. doi:10.37649/aengs.2012.41141
- Zaboli, M., Ajarostaghi, S. S. M., Saedodin, S. ve Pour, M. S. (2021). Thermal Performance Enhancement Using Absorber Tube With Inner Helical Axial Fins in a Parabolic Trough Solar Collector. *Applied Sciences*, 11(16), 7423. doi:10.3390/app11167423
- Zambolin, E. ve Del Col, D. (2010). Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy*, 84(8), 1382-1396.
- Zanetti D., E. ; D. C. (2020). Numerical modelling of a PV-T collector working as evaporator in a solar assisted heat pump. *Journal of Physics: Conference Series*, 1599(1), 012039.
- Zentrum, D. (2006). A TRNSYS Model Library for Solar Thermal Electric Components (STEC) Reference Manual Release 3.0.
- Zhang, Q. C. (2015). Recent progress in high-temperature solar selective coatings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 62(1-2), 63-74.
- Zhao, D. ve Tao, T. (2015). Recent advances in selective absorbing coatings for solar thermal applications. *Applied Energy*, 152, 212-225.

- Zohri, M., Nurato, N., Bakti, L. D. ve Fudholi, A. (2018). Exergy Assessment of Photovoltaic Thermal With v-Groove Collector Using Theoretical Study. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 16(2), 550. doi:10.12928/telkomnika.v16i2.8433
- Дабра, В., Yadav, L. ve Yadav, A. (2018). The Effect of Tilt Angle on the Performance of Evacuated Tube Solar Air Collector: Experimental Analysis. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5(4), 100-110. doi:10.4314/ijest.v5i4.9

