
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

DÜZLEM YÜZEY GÜNEŞ KOLEKTÖRÜNDE NANOPARTİKÜL KAPLI EMİCİ YÜZEYİN PERFORMANSA ETKİSİ

Müslüm Mücahit UZANLIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2025

ETİK BEYAN

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

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

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

Müslüm Mücahit UZANLIK

15/08/2025

DÜZLEM YÜZEY GÜNEŞ KOLEKTÖRÜNDE NANOPARTİKÜL KAPLI EMİCİ YÜZEYİN PERFORMANSA ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Müslüm Mücahit UZANLIK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Agustos 2025

ÖZET

Güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla yapılan bu çalışmada, düzlemsel güneş kolektörlerinin emici yüzeylerine termal boya ve $ZnFe_2O_4$ (Çinko Ferrit) nano partikül kaplamanın performans etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma, plakalı ve plakasız iki farklı kolektör dizaynı üzerinde, 0,3 L/dk, 0,4 L/dk ve 0,5 L/dk debi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, iki aşamada yürütülmüştür: ilk aşamada yalnızca termal boya kullanılmış, ikinci aşamada ise termal boyaya $ZnFe_2O_4$ nanopartikülü eklenerek kaplama yapılmıştır. Veriler, güneş ışınım şiddeti (G), giriş-çıkış sıcaklıkları (Tg, Tç), ortam sıcaklığı (Ta), ortalama sıcaklık (Tm), termal verim (η) ve üretilen güç (W) parametreleri üzerinden analiz edilmiştir. Sonuçlar, nanopartikül kaplamanın, özellikle plakalı kolektörlerde termal verimi belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Termal verimler incelendiğinde plakasız düzlemsel güneş kolektörlerinde %13,21 performans artışı, plakalı düzlemsel güneş kolektörlerinde ise %19,58 performans artışı olmuştur. Plakasız kolektörlerde ise verim artışı daha düşük olmakla birlikte, nanopartikül kaplamanın etkisi gözlemlenmiştir. Ayrıca, (Tm-Ta)/G parametresi ile kolektörün ısıl performansı değerlendirilmiş ve nanopartikül kaplamanın ısı tutma kapasitesini artırdığı tespit edilmiştir. Çalışma, nanopartikül katkılı kaplamaların güneş enerjisi sistemlerinde verimliliği artırmak için umut vaat eden bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Bilim Kodu	:	92802
Anahtar Kelimeler	:	Güneş kolektörü, nanopartikül, termal verim, $ZnFe_2O_4$, güneş enerjisi, enerji verimliliği
Sayfa Adedi	:	59
Danışman	:	Prof. Dr. Adnan SÖZEN

THE EFFECT OF NANOPARTICLE-COATED ABSORBER SURFACE ON THE PERFORMANCE OF FLAT PLATE SOLAR COLLECTORS

(M. Sc. Thesis)

Müslüm Mücahit UZANLIK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2025

ABSTRACT

The present study was conducted with the objective of enhancing the efficiency of solar energy systems. To this end, the performance effect of thermal paint and $ZnFe_2O_4$ (zinc ferrite) nanoparticle coating on the absorber surfaces of flat plate solar collectors was investigated through experimental means. The study was conducted on two different collector designs, with and without plates, at flow rates of 0.3 L/min, 0.4 L/min, and 0.5 L/min. The experiments were conducted in two stages. Initially, thermal paint was utilized in isolation. Subsequently, $ZnFe_2O_4$ nanoparticles were incorporated into the thermal paint to formulate the coating. The data were analyzed based on the parameters of solar radiation intensity (G), inlet and outlet temperatures (Tg, Tç), ambient temperature (Ta), average temperature (Tm), thermal efficiency (η), and power output (W). The findings demonstrated that the nanoparticle coating led to a substantial enhancement in thermal efficiency, particularly in plate collectors. An examination of thermal efficiencies revealed a 13.21% performance enhancement in flat-plate solar collectors devoid of plates, accompanied by a 19.58% performance augmentation in flat-plate solar collectors equipped with plates. Despite the comparatively diminished efficiency observed in collectors devoid of plates, the impact of the nanoparticle coating was evident. Furthermore, the thermal performance of the collector was evaluated using the (Tm-Ta)/G parameter, and it was determined that the nanoparticle coating increased the heat retention capacity. The study revealed that nanoparticle-containing coatings are a promising method for increasing efficiency in solar energy systems.

Science Code	:	92802
Key Words	:	Solar collector, nanoparticle, thermal efficiency, $ZnFe_2O_4$, solar energy, energy efficiency
Page Number	:	59
Supervisor	:	Prof. Dr. Adnan SÖZEN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren yalnızca tez çalışmamda değil her alanda elinden gelen tüm imkanları benim için kullanan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Adnan SÖZEN' e, bu çalışmada bana bilgi ve tecrübeleriyle destek olan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Tayfun MENLİK' e saygılarımla teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın başından itibaren kıymetli fikirleriyle tez çalışmamı kolaylaştıran Sayın Ergül HİÇYILMAZ'a ve Sayın Arş. Gör. Coşkun YÜKSEL hocama teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatım boyunca bana yardımcı olan, her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen babam Vedat UZANLIK' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. GÜNEŞ ENERJİSİ 5

2.1. Güneş Kolektörü 6

2.1.1. Düzlemsel güneş kolektörü 7

2.1.2. Vakum tüplü güneş kolektörü 8

2.1.3. Sabit bileşik parabolik kolektörler (CPC) 9

2.1.4. Parabolik oluk kolektör (PTC) 9

2.1.5. Doğrusal fresnel kolektörler (LFR) 10

2.1.6. Parabolik çanak kolektör 11

2.1.7. Hibrit PV-Termal kolektör (PVT) 11

3. NANO PARTIKÜL TEKNOLOJİSİ 13

3.1. Manyetik Spinel Ferrit (MFe_2O_4) Nano partiküllerinin Özellikleri 14

3.1.1. $ZnFe_2O_4$ (Çinko Ferrit) Nano partikülünün kullanım alanları 14

4. LİTERATÜR TARAMASI 15

5. DENEYSEL ANALİZ 21

Sayfa

5.1. Deneysel Çalışma 21
5.2. Deney Düzeneğinin Hazırlanması 23
5.3. Deney Düzeneğinde Kullanılan Ekipmanlar 25
5.3.1. Data logger 26
5.3.2. Termokupl (Isıl Çift) 27
5.3.3. Manometre 28
5.3.4. Küresel Vana 29
5.3.5. Solarimetre 29
5.3.6. Debimetre 30
5.3.7. 3 Kademeli sirkülasyon pompası 30
5.2. Deneyin Yapılışı 31
6. TEORİK ANALİZ 35
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 37
7.1. Plakasız Düzlemsel Güneş Kolektörü 37
7.2. Plakalı Düzlemsel Güneş Kolektörü 41
7.3. Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörleri 47
7.4. Nano Partikül ve Termal Boya Kaplamalı Düzlemsel Güneş Kolektörleri 47
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 51
KAYNAKLAR 55
ÖZGEÇMİŞ. 59

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Mevcut çalışma ile literatürdeki çalışmaların karşılaştırılması 19

Çizelge 5.1. Deney düzeneğinde kullanılan kaplama malzemeleri 25

Çizelge 5.2. Deney düzeneğinde kullanılan veri toplama sistemi 26

Çizelge 5.3. Deney düzeneğinde kullanılan ısıl sistem elemanları..... 26

Çizelge 6.1. Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanların belirsizlik analizi 36

Çizelge 7.1. Plakasız kolektörlerde nano partikülün performansa etkisi..... 40

Çizelge 7.2. Plakalı kolektörlerde nano partikülün performansa etkisi 43

Çizelge 7.3. Termal boya ile kaplanan güneş kolektörlerinin verim karşılaştırması..... 44

Çizelge 7.4. Nano partikül ve termal boya ile kaplanan güneş kolektörlerinin verim karşılaştırması 45

Çizelge 7.5. Düzlemsel güneş kolektörlerinin performans karşılaştırması..... 48

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi 23

Şekil 5.2. Deney düzeneğinde kullanılan düzlemsel güneş kolektörlerinin ölçüleri 25

Şekil 5.3. Deneysel prosedür akış şeması 34

Şekil 7.1. Plakasız güneş kolektörünün güç faktörüne göre verim değişimleri 39

Şekil 7.2. Plakalı güneş kolektörünün güç faktörüne göre verim değişimleri 42

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Düzlemsel güneş kolektörü bileşenleri 8

Resim 2.2. Vakum tüplü güneş kolektörü çalışma prensibi..... 9

Resim 2.3. Sabit bileşik parabolik oluk kolektör 9

Resim 2.4. Parabolik oluk güneş kolektörü 10

Resim 2.5. Doğrusal fresnel güneş kolektörü 10

Resim 2.6. Parabolik çanak güneş kolektörü 11

Resim 2.7. Hibrit PV-Termal güneş kolektörü 12

Resim 3.1. $ZnFe_2O_4$ (Çinko Ferrit) Nanopartikülü 14

Resim 5.1. Kurulan deney düzeneği 21

Resim 5.2. Kaynaklanmış ve sızdırmazlık testi yapılmış bakır borular 24

Resim 5.3. Örnek data logger 27

Resim 5.4. Termokupl (Isıl Çift)..... 27

Resim 5.5. Örnek manometre 28

Resim 5.6. Örnek küresel vana 29

Resim 5.7. Örnek solarimetre 30

Resim 5.8. Örnek şamandıralı debimetre..... 30

Resim 5.9. Örnek sirkülasyon pompası 31

Resim 5.10. Termal boya ile kaplanan güneş kolektörleri..... 32

Resim 5.11. Nano partikül ve termal boya ile kaplanan güneş kolektörleri 33

Resim 7.1. Plakasız güneş kolektörü 38

Resim 7.2. Düzlemsel güneş kolektörüne plakanın yerleştirilme işlemi 42

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
°C	Santigrat
A_a	Açıklık alanı
C_p	Suyun özgül ısısı
dk	Dakika
G	Işınım şiddeti
K	Kelvin
kW	Kilowatt
L	Litre
$\dot{m}$	Kütlesel debi
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
mm	Milimetre
MW	Megawatt
η	Verim
nm	Nanometre
Ta	Ortam sıcaklığı
Tç	Güneş kolektörlerinde akışkan çıkış sıcaklığı
Tg	Güneş kolektörlerinde akışkan giriş sıcaklığı
Tm	Ortalama akışkan sıcaklığı
W	Watt

Kısaltmalar	Açıklamalar
EMF	Elektromotor kuvvet/ gerilim
M.Ö.	Milattan önce

Kısaltmalar	Açıklamalar
PF	Performans faktörü
PV	Fotovoltaik panel
PVT	Fotovoltaik ısıl kolektör

1. GİRİŞ

Güneş, sahip olduğu yüksek enerji potansiyeli ve çevresel açıdan sürdürülebilir yapısıyla, yenilenebilir enerji kaynakları arasında stratejik bir öneme sahiptir. Artan dünya nüfusu, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerjiye olan küresel talep her geçen gün yükselmekte; bu durum, mevcut enerji kaynaklarının verimli kullanımını ve alternatif enerji çözümlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olması, çevresel kirlilik oluşturması ve sera gazı emisyonlarını artırması nedeniyle bu kaynaklara olan bağımlılık, çevre ve enerji politikaları açısından sürdürülebilir bir seçenek olmaktan uzaklaşmaktadır. Bu çerçevede, yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının enerji üretim sistemlerine entegrasyonu günümüz mühendislik çalışmalarının öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır. Güneş enerjisi, doğrudan kullanılabilirliği, çevresel etkilerinin düşük olması ve uzun vadeli ekonomik avantajları sayesinde elektrik üretiminden ısıtma sistemlerine, aydınlatmadan tarımsal uygulamalara kadar çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu dönüşüm, sadece enerji üretim biçimlerini değil, aynı zamanda enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik temelli yeni teknolojilerin geliştirilmesini de teşvik etmektedir.

Küresel ölçekte hızla artan nüfus, kentleşme oranındaki yükseliş ve iklim değişikliğinin etkileri, içme suyuna erişimi giderek daha karmaşık ve sınırlı hâle getirmiştir. Özellikle küresel ısınma sonucu buharlaşmanın artması, yağış rejimlerinin değişmesi ve buzulların erimesi gibi faktörler, tatlı su kaynaklarının miktar ve kalitesinde ciddi düşüşlere neden olmaktadır. Su, tüm canlıların yaşamını sürdürebilmesi ve ekosistemlerin dengede kalabilmesi için temel bir bileşendir. Bu nedenle mevcut su kaynaklarının verimli, sürdürülebilir ve bilinçli bir şekilde kullanılması günümüzün öncelikli çevresel hedeflerinden biri hâline gelmiştir. İçme suyu kullanımında tasarruflu davranmak, sadece bireysel değil, toplumsal düzeyde de çevresel farkındalığın artması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji teknolojilerinin, özellikle de güneş enerjisi sistemlerinin kullanımı, suyun daha verimli yönetilmesine katkı sağlayan yenilikçi çözümler sunmaktadır. Güneş enerjisi destekli su arıtma, damıtma ve pompalama sistemleri gibi uygulamalar hem enerji tüketimini azaltmakta hem de suya erişimi daha sürdürülebilir kılmaktadır. Bu tür teknolojiler, enerji-su ilişkisini optimize ederek hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır.

Güneş enerjisi sistemleri, çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, enerji üretiminin en temiz ve en güvenli yollarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, doğrudan güneş ışınımını kullanarak elektrik veya ısı enerjisi üretmekte ve bu süreçte herhangi bir sera gazı emisyonu oluşturmamaktadır. Özellikle fotovoltaik paneller ve düzlem yüzeyli güneş kolektörleri gibi teknolojiler, enerji dönüşümünde fosil yakıtlara alternatif oluşturarak karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Küresel ısınma, artan sera gazı salımları ve fosil yakıt bağımlılığı ile doğrudan ilişkilidir ve bu durum, iklim sistemleri üzerinde geri dönülmesi güç etkiler yaratmaktadır. Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, bu süreci yavaşlatmak ve iklim değişikliğinin etkilerini sınırlamak adına stratejik bir öneme sahiptir. Enerji sistemleri mühendisliği kapsamında ele alındığında, güneş enerjisi tabanlı sistemlerin entegrasyonu hem enerji arz güvenliğini artırmakta hem de çevresel etkileri minimumda tutarak geleceğe yönelik sürdürülebilir çözümler sunmaktadır.

Isıl güneş teknolojileri, yenilenebilir enerji sistemleri içerisinde hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sunan uygulamalar arasında yer almaktadır. Bu teknolojiler kullanılarak, özellikle su gibi sıvıların ısıtılması işlemi daha düşük maliyetle ve minimum karbon salınımı ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu durumun en somut örneklerinden biri, düzlemsel yüzeyli ve odaklamalı türleriyle yaygın olarak kullanılan güneş kolektörleridir. Güneş kolektörleri, güneş ışınımını yüzeylerinde absorbe ederek içerisinde dolaşan ısı transfer akışkanının sıcaklığını artırmak üzere tasarlanmış termal sistem bileşenleridir. Bu sistemler, pasif ya da aktif sirkülasyon yoluyla çalışarak, güneş enerjisini doğrudan ısı enerjisine dönüştürme kabiliyetine sahiptir. Kullanım amacına ve uygulama alanına bağlı olarak düzlem yüzeyli, vakum tüplü, parabolik oluklu veya merkezi alıcılı gibi çeşitli kolektör tipleri geliştirilmiştir. Güneş kolektörlerinin bu yapısal ve işlevsel çeşitliliği, sıcak su temininden endüstriyel ısıtma süreçlerine, tarımsal kurutmadan bölgesel ısıtma sistemlerine kadar çok sayıda alanda etkin kullanım olanağı sunmaktadır. Ayrıca coğrafi konum, iklim koşulları, güneşlenme süresi ve uygulama ölçeği gibi etkenlere bağlı olarak farklı türde kolektörlerin tercih edilmesi, sistem verimliliğinin artırılması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Güneş kolektörlerinin verimli çalışabilmesi için, güneşten gelen ışınımın maksimum düzeyde absorbe edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kolektörlerin emici yüzeyleri yüksek soğuruculuk ve düşük yansıtıcılık özelliklerine sahip materyallerle kaplanmaktadır.

Genellikle koyu renkli ve mat yapıda olan bu yüzey kaplamaları, güneş ışınımını etkili bir şekilde absorbe ederek ısıl kayıpları minimuma indirir. Bu sayede, kolektör yüzeyinde toplanan güneş enerjisi, yüksek verimle ısı enerjisine dönüştürülerek sistem içerisindeki ısı transfer akışkanına iletilir. Akışkanın sıcaklığı, kolektör tasarımı ve güneşlenme koşullarına bağlı olarak belirli bir seviyeye yükselir ve bu termal enerji, kullanım amacına göre farklı uygulamalarda değerlendirilir. Güneş kolektörleriyle ısıtılan akışkan, yalnızca konut ve ticari yapılarda sıcak su temini için değil; aynı zamanda tarımsal ürünlerin kurutulması, termik enerji destekli güç üretimi, absorpsiyonlu soğutma sistemleriyle iklimlendirme ve çeşitli endüstriyel ısıtma süreçlerinde de etkin şekilde kullanılmaktadır. Bu bağlamda, güneş kolektörleri, güneş enerjisinin doğrudan kullanılabilir termal enerjiye dönüştürülmesini sağlayan önemli bir mühendislik çözümüdür ve enerji dönüşüm sistemlerinin çevreci ve sürdürülebilir bileşenleri arasında yer almaktadır.

Güneş kolektörlerinin tasarımı, sistemin performansını doğrudan etkileyen bir dizi parametreye bağlı olarak şekillendirilmektedir. Kolektör geometrisi, emici yüzey malzemesi, kaplama özellikleri, akışkan tipi, izolasyon düzeyi ve sistemin yerleştirileceği coğrafi konum gibi faktörler, kolektör verimliliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Güneş kolektörü sistemleri genel olarak iki temel prensibe dayanır: ışınların yoğunlaştırılması (yoğunlaştırıcı sistemler) ve doğrudan soğurulması (düzlemsel sistemler). Yoğunlaştırıcı sistemlerde, güneş ışınları yansıtıcı yüzeyler aracılığıyla belirli bir odak noktasında toplanarak yüksek sıcaklıklarda enerji üretimi sağlanır. Diğer yandan, düzlemsel yüzeyli kolektörlerde güneş ışınımı doğrudan emici yüzey tarafından absorbe edilerek, bu enerji sistemde dolaşan akışkana iletilir. Her iki prensipte de temel amaç, güneş ışınımının mümkün olan en yüksek verimle ısı enerjisine dönüştürülmesini sağlamaktır. Tasarım parametrelerinin doğru seçilmesi ve mühendislik esaslarına uygun şekilde uygulanması, kolektör sistemlerinin farklı iklim ve uygulama koşullarında etkin bir şekilde çalışmasını mümkün kılmaktadır.

Güneş kolektörlerinde, güneş ışınımının etkin bir şekilde absorbe edilebilmesi için kullanılan emici yüzeyler, yüksek soğurma ve düşük yansıma özelliklerine sahip özel materyallerle kaplanmaktadır. Bu yüzeylerde sıklıkla, koyu renkli termal boyalar ve seçici kaplamalar gibi yüksek emicilik gösteren malzemeler tercih edilmektedir. Son yıllarda gelişen malzeme teknolojileriyle birlikte, nano ölçekte yapılandırılmış partiküllerin bu tür kaplama sistemlerinde kullanımı dikkat çekici avantajlar sunmaya başlamıştır.

Nanopartiküller, yüksek özgül yüzey alanı ile ısı transfer yüzeyinin artırılmasına katkı sağlamakta ve böylece kolektörlerin termal verimliliğinde anlamlı bir artış elde edilmektedir. Ayrıca metal oksit veya karbon bazlı nanopartiküller hem yüksek termal iletkenlik hem de bazı durumlarda yüksek elektriksel iletkenlik özellikleri sayesinde güneş enerjisi sistemlerinde çok çeşitli mühendislik uygulamalarına olanak tanımaktadır. Bu özellikler, kolektör içerisinde akışkana ısı transferini iyileştirerek daha verimli bir enerji dönüşüm süreci sunar. Günümüzde nanoteknoloji alanındaki gelişmelerle birlikte, farklı türde nanopartiküllerin laboratuvar ve endüstriyel ölçekte üretim maliyetleri önemli ölçüde düşmüş, bu da onları güneş kolektörü uygulamalarında ekonomik olarak daha uygulanabilir hâle getirmiştir. Bu nedenle, nanopartikül katkılı kaplama malzemeleri, klasik yüzey kaplamalarına alternatif olarak değerlendirilmekte ve kolektör performansını artırma potansiyeli açısından önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir.

Bu deneysel çalışmada, güneş enerjisi sistemleri içerisinde yaygın olarak kullanılan düzlemsel güneş kolektörlerinin performansı, belirli parametreler doğrultusunda incelenmiş ve karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği kapsamında, biri plakalı diğeri plakasız olmak üzere iki farklı düzlemsel güneş kolektörü prototipi tasarlanarak imal edilmiştir. İlk aşamada, her iki kolektör yüzeyi yüksek emicilik özelliğine sahip siyah termal boya ile kaplanmış ve bu durumdaki kolektörlerin termal verimleri ölçülerek karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise aynı kolektör yüzeylerine $ZnFe_2O_4$ (çinko ferrit) nanopartikülleri ile modifiye edilmiş termal boya uygulanmış ve bu kaplamanın kolektör performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen termal verim değerleri, yalnızca termal boya kullanılan durum ile nanopartikül katkılı kaplama uygulaması karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırma, nanopartikül katkısının düzlemsel güneş kolektörü performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymak açısından önemli bir veri sunmaktadır.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en temiz ve en sürdürülebilir olanlardan biridir. Kurulum ve kullanım kolaylığı, çevreye zarar vermemesi ve zararlı atık üretmemesi gibi avantajları sayesinde son yıllarda önemli bir enerji kaynağı alternatifi olarak öne çıkmıştır. Güneş enerjisi, Güneş'in çekirdeğinde gerçekleşen nükleer füzyon reaksiyonları sonucunda (hidrojen atomlarının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ışıma enerjisidir. Güneş, yaklaşık $3{,}9 \times 10^{26}$ watt güç yayarak devasa bir enerji kaynağı oluşturur; ancak bu enerjinin yalnızca çok küçük bir bölümü Dünya'ya ulaşır. Atmosferin dış yüzeyine metrekare başına ortalama 1367 watt güç düşerken, atmosfer bu enerjinin bir kısmını emebilir veya uzaya yansıtır [1].

Dünyada güneş enerjisinden faydalanma çalışmaları çok eskiye dayanmaktadır. M.Ö. 400'de Sokrat, evlerin güneye bakan cephesine pencere açılarak güneş ışığının içeri alınabileceğini önermiştir. M.Ö. 250'de Arşimet, içbükey aynalarla güneş ışığını odaklayarak düşman gemilerini yakmıştır. 1600'lü yıllarda Galilei'nin merceği bulmasıyla gelişmeler sürmüştür. 1725'te Belidor güneş enerjisiyle çalışan ilk su pompasını, 1860'ta Fransız Mohuchok ise parabolik aynalarla çalışan küçük bir buhar makinesi geliştirmiştir [2].

Birinci Dünya Savaşı sırasında petrolün ön plana çıkması, güneş enerjisine olan ilgiyi azaltmıştır. 1930'lardan itibaren araştırmalar yeniden başlamış, ancak pratik uygulamalar sınırlı kalmıştır. 1949'da ABD'de ilk güneş evi yapılmış, 1954'te ise ilk fotovoltaik güneş pili üretilmiştir [2].

1950'li yıllarda güneş enerjili su ısıtıcıları başta ABD, Japonya ve Avrupa ülkelerinde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak yüksek maliyetler, bu teknolojinin yaygınlaşmasını engellemiştir. 1970'lerde petrol krizinin etkisiyle güneş enerjisi yeniden ilgi görmüş, ABD ve diğer ülkelerde güneş termik santralleri kurulmuştur [2].

Güneş enerjisinin değerlendirilmesi konusunda son yıllarda çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Fosil yakıtların çevreye verdiği zararlar pek çok ülkeyi yenilenebilir enerji kaynağı kullanmaya teşvik etmiştir. Bu bağlamda güneş enerjisi yenilenebilir enerji

kaynakları kullanımı konusunda temel unsur hale gelmiştir. Güneş enerjisinden elektrik ve ısı üretimi için çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir. Güneş enerjisinden elektrik ve ısı üretimi amacıyla geliştirilen çeşitli teknolojiler arasında, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (PV) sistemler, en yaygın ve en fazla tercih edilen yöntem olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi teknolojileri, özellikle 1970'lerden sonra büyük ilerleme kaydetmiş, maliyetleri düşmüş ve sistem verimlilikleri artmıştır. Güneş enerjisinin temiz bir enerji kaynağı olması düşük işletme maliyetleri sunması gibi avantajlar, bu teknolojilerin enerji üretiminde giderek artan oranda tercih edilmesinde belirleyici etkenler olmuştur [1].

Güneş enerjisinden faydalanmak amacıyla çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, güneş enerjisini doğrudan ısı veya ışık olarak kullanılmasını sağladığı gibi, enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülerek de kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Güneş enerjisinin başlıca kullanım alanları şu şekildedir,

• Elektrik enerjisi üretimi (fotovoltaik paneller ve yoğunlaştırılmış termal sistemler aracılığıyla)
• Güneş kolektörleri kullanılarak sıcak su temini
• Binalarda alan ısıtma ve soğutma uygulamaları
• Endüstriyel süreçlerde ihtiyaç duyulan ısının sağlanması
• Seraların ısıtılması ve tarımsal ürünlerin kurutulması [1].

2.1. Güneş Kolektörü

Güneş kolektörleri güneşten gelen enerjiyi kullanarak ısı ve elektrik enerjisi üretmek için kullanılan sistemlerin ismidir. Güneş çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Güneşten gelen ısı ve ışık güneş kolektörlerinin emici yüzeyleri tarafından yakalanarak enerji üretmek ve depolamak için kullanılır.

Güneş kolektörleri maliyetlerinin düşük olması ve uygulanma çeşitliliği fazla olduğundan ev, iş yerleri ve endüstriyel tesislerde sıcak su temini, ısıtma, elektrik üretimi ve kurutma sistemleri gibi çeşitli amaçlarla kullanılır. Özellikle ısıtma, sıcak su temini ve kurutma sistemleri için kullanılan güneş kolektörleri emici bir yüzey ile güneş enerjisini yakalayıp enerjisini su veya havaya aktaran sistemlerden oluşur.

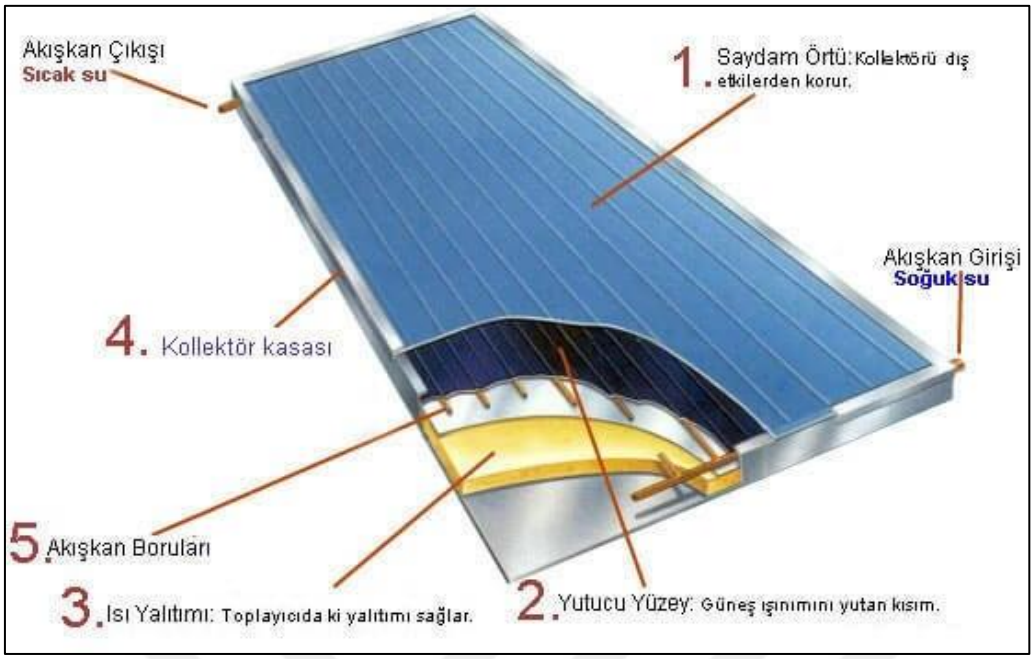
Isıtma, kurutma ve sıcak su temini için kullanılan güneş kolektörlerinde su veya kullanılan sıvı güneş enerjisi ile ısıtılır. Isıtılan sıvılar toplama tankında birikir ve istenildiği zaman kullanılmak üzere sıcak su temini, kurutma ve ısıtma sistemlerinde kullanılır. Güneş kolektörlerinin ısıtma, kurutma ve sıcak su temininde kullanılması bu alanlarda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır ve sıcak su temini, kurutma ve ısıtma sistemleri için enerji maliyetini önemli ölçüde düşürür.

Güneş enerjisinden elektrik enerji elde etmek için kullanılan güneş kolektörleri ise fotovoltaik (PV) hücrelerden meydana gelir. Fotovoltaik hücreler güneş ışığındaki fotonları elektrik enerjisine dönüştürür. Üretilen elektrik enerjisi çeşitli depolama yöntemleri ile depolanabildiği gibi doğrudan şebekeye bağlanarak enerji sağlar. Güneş enerjisi kullanılarak üretilen elektrik enerjisi fosil yakıtlar ile üretilen elektrik enerjisine kıyasla daha çevre dostudur [3].

Güneş enerjisi ile ısı enerjisi üretiminde çeşitli güneş kolektörleri kullanılabilir. Üretilmek istenilen ısı enerjisinin kullanım alanları da çeşitlilik gösterir. Bu nedenle güneş kolektörü çeşitleri farklı parametreler ve akışkanlar içerebilir.

2.1.1. Düzlemsel güneş kolektörü

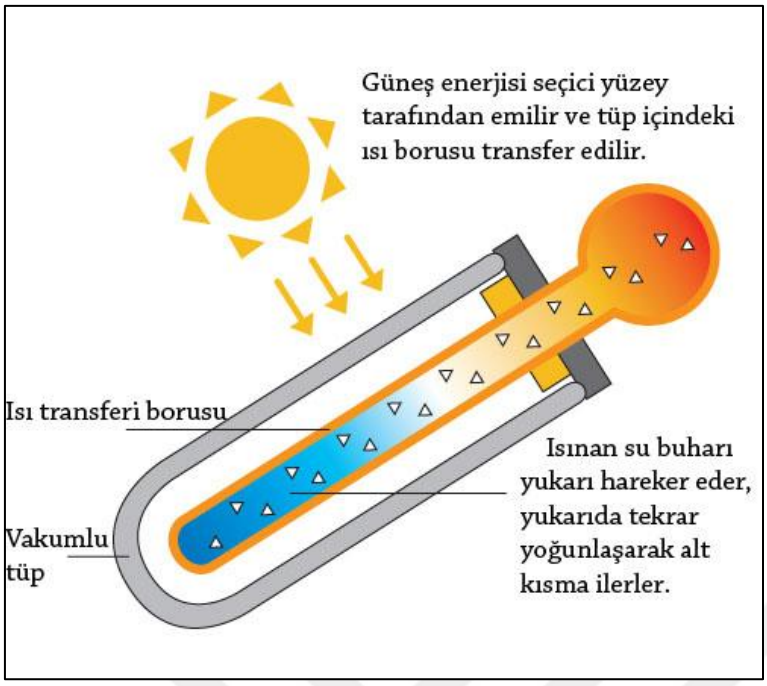
Güneş enerjisi düzlemsel güneş kolektörlerinin üst yüzeyine çarpar. Üst yüzey yüksek emicilik özelliği taşıyan selektif kaplamalı cam örtüden meydana gelir. Üst yüzeye çarpan güneş enerjisinin büyük bir bölümü düzlemsel güneş kolektörlerindeki emici plakaya çarpar. Emici plaka içerisinde akışkan taşıyan bakır veya alüminyum borulara ısı transfer mekanizmaları ile ısı enerjisini iletir. Düzlemsel güneş kolektörlerinde arka yüzeyde yalıtımlı bir panel bulunur. Bu sayede ısı kaybı miktarı düşürülmüş olur. Düzlemsel güneş kolektörlerinde optimum çalışma sıcaklık aralığı 30°C ve 80°C arasındadır [4].



Resim 2.1. Düzlemsel güneş kolektörü bileşenleri [5]

2.1.2. Vakum tüplü güneş kolektörü

Vakum tüplü güneş kolektörlerinde çift camlı vakum tüpleri kullanılır. Bu sayede iletim ile ısı kayıplarının engellenmesi sağlanır. Vakum tüplü güneş kolektörlerinde iki çeşit model bulunur. Direk akışlı sistemlerde akışkan tüpün içinden geçer. Isı borulu sistemlerde ise kullanılan akışkan yoğuşma-buharlaşma döngüsü ile ısıyı taşır. Vakum tüplü güneş kolektörlerinde optimum çalışma sıcaklığı 50°C ve 120°C arasındadır. U tüplü modellerinde ise bu sıcaklık 150°C'ye kadar artmaktadır [6].



Resim 2.2. Vakum tüplü güneş kolektörü çalışma prensibi [7]

2.1.3. Sabit bileşik parabolik kolektörler (CPC)

Sabit bileşik parabolik kolektörlerde parabolik şekilde tasarlanmış yansıtıcılar güneşten gelen ışınları alıcıya odaklar. Böylece güneşten gelen ışınlar yakalanmış olur. Sabit bileşik parabolik kolektörlerde kabul açısı 30° ile 60° arasındadır [8].



Resim 2.3. Sabit bileşik parabolik oluk kolektör [9]

2.1.4. Parabolik oluk kolektör (PTC)

Parabolik şekilde yerleştirilen yansıtıcı bir oluk sistemi kullanılarak güneş ışınları doğrusal bir odak çizgisinde yoğunlaştırılır. Bu doğrusal odak çizgisinden geçen ve içerisinde yüksek sıcaklıklara dayanıklı termal yağ bulunan boru yaklaşık 400°C'ye kadar ısıtılır. Optik verim

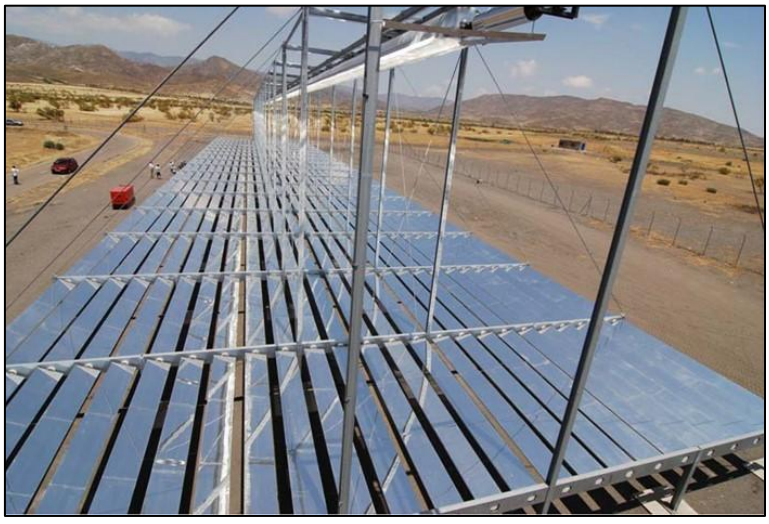
değerleri %80'e kadar yükselir. Güneş ışınlarını gün boyunca yakalayabilmek için tek eksenli bir güneş takip sistemi kullanılır [10].



Resim 2.4. Parabolik oluk güneş kolektörü [11]

2.1.5. Doğrusal fresnel kolektörler (LFR)

Doğrusal fresnel kolektörlerde sabit bir alıcı ve bu alıcın etrafında düzlemsel aynalar vardır. Bu düzlemsel aynalar belirli açı değerlerinde özel olarak yerleştirilerek sabit doğrusal bir alıcı bölgeye güneş ışınlarını yansıtır. Bazı modellerinde aynalar güneşin hareketine göre hareketli olarak da bulunur. Bir güç çevrimi ile elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir [12].



Resim 2.5. Doğrusal fresnel güneş kolektörü [13]

2.1.6. Parabolik çanak kolektör

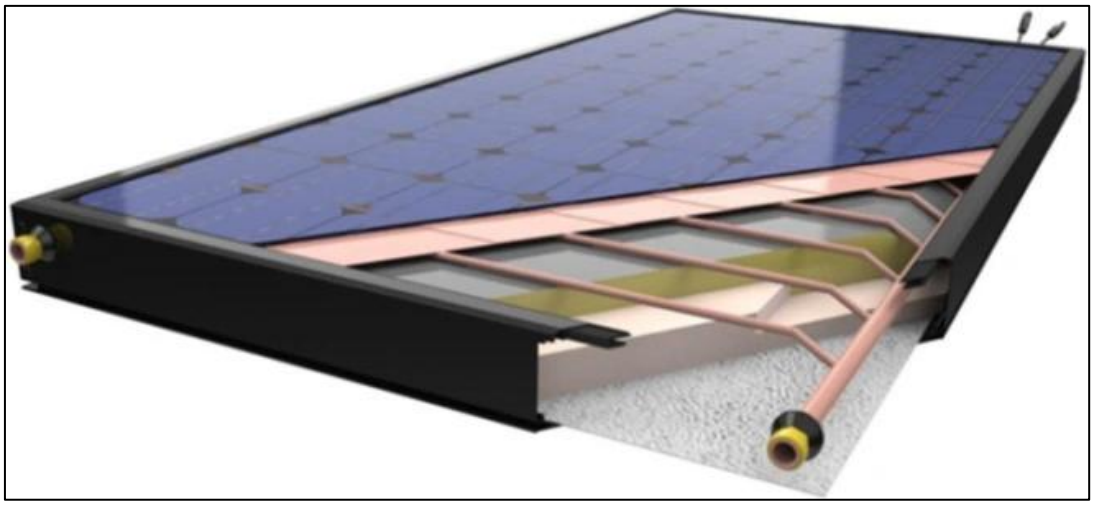
Parabolik çanak kolektör sisteminde çanak şeklinde bir yansıtıcı güneş ışınlarını odak noktasına yoğunlaştırır. Stirling motoru veya termokimyasal reaktörler kullanılarak ısı enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek için de kullanılabilir. Güneş ışınlarını maksimum seviyede yakalamak için iki eksenli takip sistemi kullanılır. Parabolik çanak kolektörlerinde odak noktasındaki sıcaklık 500°C ve 1500°C arasındaki oldukça yüksek sayılabilecek sıcaklık değerlerine çıkabilir [14].



Resim 2.6. Parabolik çanak güneş kolektörü [15]

2.1.7. Hibrit PV-Termal kolektör (PVT)

Fotovoltaik hücreler güneş enerjisini absorb edebilmek için koyu renkli yüzeylere sahiptir. Ancak bu durumda güneş panellerinin yüzeylerinde sıcaklık artışı meydana gelir. Artan sıcaklık elektrik üretimini olumsuz etkilediği için fotovoltaik hücrelerin arka yüzeyinde soğutucu kanallar oluşturulur. Bu soğutucu kanallardan su veya hava geçirilerek soğutma yapılmış olur. Fotovoltaik hücrelerin bu soğutma kanalları sayesinde soğutulması aynı zamanda soğutma kanallarında gezen akışkanları ısıtır ve bu sayede hem elektrik üretimi süreci daha kararlı hale gelir hem de sıcak su eldesi ve mahal ısıtması gibi ek faydalar ortaya çıkar. Bu ısı transferi mekanizmaları sonucunda özellikle su soğutmalı hibrit sistemlerde fotovoltaik hücrelerde 30°C' varan sıcaklık düşüşü meydana gelir [16].



Resim 2.7. Hibrit PV-Termal güneş kolektörü [17]

3. NANO PARTİKÜL TEKNOLOJİSİ

Nano partiküller günümüzde hemen hemen her yerde karşımıza çıkan bir teknolojik üründür. Nano boyuttaki parçacıkların günümüzdeki gibi çeşitli alanlarda kullanılabileceğini 1857 yılında ilk olarak Faraday değinmiştir. Faraday bu konuda ilk araştırmaları yapmış olsa bile nano partiküllerin kullanımı daha eski tarihlere dayanmaktadır. 6. Yüzyıl ve 15. Yüzyıl arası Avrupa katedrallerinin cam süslemelerinde 17. Yüzyılda İslam Dünyası'nda seramik işçiliklerinde çeşitli renkleri elde etmek için nano partiküller kullanılmıştır. Bilimsel olarak nano parçacıkların ilk incelenmesi 19. Yüzyılda Faraday tarafından gerçekleştirilmiştir. Faraday yaptığı çalışma ile nano boyutlu teknolojinin temellerini atmıştır.

Nano malzemelerin büyüklüğü 1-100 nm arasındadır. Nano malzemeleri yapılarına göre nano partiküller, tabakalı veya lamelli nano yapılar, telsi nano yapılar ve kütlesel nano yapılı malzemeler şeklinde sınıflandırılmıştır. Nano malzemelerin önemli avantajları arasında yüzey alanlarının yüksek olması ve kuantum alan etkisine faydası söylenebilir. Yüzey/hacim oranları yüksek olduğu için çevrelerindeki malzemelerle etkileşim kuvvetleri oldukça fazladır.

Nano partiküller yüksek elektriksel ve termal özellikler gösterirler. Nano partikül teknolojileri günümüzde hızla gelişmekte ve gün geçtikçe bilimsel ve akademik olarak değerlenmektedir [18].

Nano partiküller faz değiştiren materyallerin termal verimliliğini arttırmakta kullanılır.

Nano partiküller boyutlarına göre sınıflandırılır:

- 0-Boyutlu (0-D): Küresel nano partiküller (örneğin, Al_2O_3, CuO).
- 1-Boyutlu (1-D): Nanotüpler ve nanofiberler (örneğin, karbon nanotüpler).
- 2-Boyutlu (2-D): Grafen ve türevleri.
- 3-Boyutlu (3-D): Metal oksit çerçeveleri ve aerogeller [19].

Nano partiküller elektrik-elektronik, otomotiv, biyomedikal, kimya, enerji gibi birçok endüstriyel alanda kullanılır. Bu sebeple birçok üretim yöntemi keşfedilmiştir. Nano partiküller temelde yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya prensipleriyle üretilir. Burada

yukarıdan aşağıya prensibi hacimsel olarak büyük malzemelerin kimyasal veya mekanik işlemlerle nano boyuta indirgenmesi prensibidir. Aşağıdan yukarıya prensibi ise atomların kimyasal tepkimelere maruz bırakılması sonucu nano boyutta parçacıkların elde edilmesi prensibidir [20].

3.1. Manyetik Spinel Ferrit (MFe_2O_4) Nano partiküllerinin Özellikleri

Spinel ferritler yapıları gereği MFe_2O_4 formülüne sahiptir. Burada kullanılan M ifadesi iki değerliğe sahip metal iyonlarını temsil eder. Ferritler, fiziksel özellik bakımından çeşitlilik gösterir. Üretim maliyetleri düşüktür. Yüksek kimyasal kararlık gösterirler. Bu avantajlarından dolayı biyomedikal, su arıtma ve elektronik cihazların bileşenlerinin üretilmesinde kullanılırlar [21]. Bu çalışmamızda spinel ferrit nano partikülleri arasından maliyetinin düşük üretiminin kolay olması nedeniyle $ZnFe_2O_4$ (Çinko Ferrit) nano partikülünü tercih ettik.

3.1.1. $ZnFe_2O_4$ (Çinko Ferrit) Nano partikülünün kullanım alanları

Çinko Ferrit nano partikülü üretim maliyetinin düşük olması ve üretiminin kolay olması sayesinde kaplama, elektriksel komponentler, tekstil, biyomedikal, optik ve manyetik uygulamalarda sıklıkla tercih edilir. Özellikle anti-mikrobiyal bir yapısı olması sebebiyle biyomedikal uygulamalarda sıklıkla kullanılır [22].



Resim 3.1. $ZnFe_2O_4$ (Çinko Ferrit) Nano partikülü [23]

4. LİTERATÜR TARAMASI

Güneş enerjisi birçok alanda kullanıldığı gibi akışkan ısıtmak için de kullanılan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Akışkan ısıtma teknolojilerinde güneş enerjisi kullanımının en yaygın örneği güneş kolektörleridir. Güneş kolektörleri temelde güneş enerjisinin emici bir yüzey tarafından emilerek güneş ışınlarının çarptığı yüzeyde sıcaklığı arttırması ile kolektörün içerisinden geçen akışkanın ısı transfer mekanizmaları ile ısıtılması prensibiyle çalışır. Güneş kolektörü sistemlerinde birçok tasarım üretilmiştir. Mevcut güneş kolektörü tasarımlarından düzlemsel güneş kolektörü ile ilgili olanlar bu çalışmanın temelini oluşmuştur. Güneş enerjisi ile akışkan ısıtmak oldukça popüler bir yöntemdir. Bu alanda birçok çalışma yapılmıştır.

Bharathiraja ve ark. düzlemsel güneş kolektörünün performansını arttırmak için parafin ve nano katkılı bir faz değiştiren malzeme kullanımı ile düzlemsel güneş kolektörlerinde termal enerji depolama üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Kullanılan nano malzeme için silikon dioksit (SiO_2) seçmiştir. Bu deneysel çalışma sonucunda düzlemsel güneş kolektörünün çıkışında 70 °C sıcaklık değeri gözlemlemiştir. Termal verimin ise %71,7' ye ulaştığını hesaplamıştır [24].

Gürbüz ve ark. geleneksel güneş hava kolektöründe Fe_3O_4 nano partikül takviyeli emici yüzey kaplaması ile mesh tüpler kullanarak deneysel bir karşılaştırma yapmıştır. Yalnızca mesh tüpler kullanılan sistem termal verimliliği %22,5 arttırırken nano partikül takviyeli emici yüzey kaplaması ile mesh tüplerin kullanılması ile yapılan deney düzeneğinde termal verimliliği %40,45 arttırmıştır [25].

Öztürk ve ark. fotovoltaik-termal güneş sisteminin üç farklı şekilde deneysel analizini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada V-oluklu fotovoltaik-termal güneş sistemleri (PVT) kullanılmıştır. V-oluklu PVT, nano-takviyeli V-oluklu PVT ve termal enerji depolama birimine sahip V-oluklu PVT şeklinde tasarlanan çalışmada nano takviyeli V oluklu PVT %54,01 termal termal verimliliğe ulaşmıştır [26].

Pustovalov, bu çalışmasında katı nano yapılı malzemelerin güneş kolektörlerinde kullanılması ile ilgili çalışmasında nano partiküllerin emicilik özelliklerine vurgu yapmış ve

optik özelliklerini incelemiştir. Katı yapılı nano partiküllerin endüstride kullanılabileceği alanlarla ilgili önerilerde bulunmuştur [27].

Nawsud ve ark. parabolik oluklu güneş kolektörlerinde nano parçacıkların kullanımı ile ilgili teorik bir çalışma yaparak çeşitli nano partikül ve faz değiştiren malzemeleri incelemiştir. Nano parçacık sentezi , nano akışkanların kullanımı ve çeşitleri ile ilgili detaylı bilgiler vermiştir [28].

Kulkarni ve ark. çinko ve grafen içerikli nano parçacıkları kullanarak endüstride kullanılan malzemelerin kaplanmasında kullanarak deneysel veriler elde etmiştir. Elde ettiği veriler ile çinko ve grafen içerikli nano parçacıkların malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve korozyona karşı dirençlerini arttırdığını gözlemlemiştir [29].

Sathish, bu çalışmasında vakum tüplü güneş kolektörlerinin performansını arttırmak amacıyla seryum oksit (CeO_2) nano parçacıkları ile kaplama yaparak deney düzeneği oluşturmuştur. Yapmış olduğu çalışmada vakum tüplü güneş kolektörünü seçmesinin nedeni yüksek verimli olmasıdır. Çalışmasında önce siyah mat boya kullanmış sonrasında ise CeO_2 nano partiküllerini kaplamaya ekleyerek performans analizleri yapmıştır. yapmış olduğu çalışmada CeO_2 ile kaplanmış vakum tüplü güneş kolektörlerinin termal verimi siyah mat boya ile kaplanması sonucu ortalama %40,1 olarak hesaplanmıştır. Deney düzeneği CeO_2 nano partikül ile kaplandığında termal verim ortalama %65,6 olarak hesaplanmıştır [30].

Rahman ve ark. düzlemsel güneş kolektörlerinde termal performansı gözlemlemek için su bazlı silikon nitrür (Si_3N_4) nano akışkanını kullanmıştır. Düzlemsel güneş kolektörlerinde akışkan seçiminin kolektörün termal verimine etkisini deneysel olarak hesaplamıştır. Yapılan çalışmada düzlemsel güneş kolektörlerinde su bazlı silikon nitrür (Si_3N_4) kullanılması termal verimlilikte su ile kıyaslandığında %8 daha performanslı çıkmıştır [31].

Thakur ve ark. bakır oksit (CuO) ve çinko oksit (ZnO) nano partikülleri kullanarak güneş enerjili damıtıcı sisteminde ısı transfer katsayısının incelemesi için deneysel bir çalışma yapmıştır. Yaptıkları bu çalışmada çeşitli eğim açıları ve su derinlikleri kullanılmıştır. CuO nano partikülü kullanılan güneş damıtma ünitesi ile geleneksel güneş damıtma ünitesine göre iç ısı transfer katsayısının %155,2 daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. ZnO nano partiküllü

güneş damıtma ünitesi ile geleneksel güneş damıtma ünitesine göre iç ısı transfer katsayısının %64,8 daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Belirli mevsimler için güneş damıtma ünitelerinin eğim açıları üzerine çıkarım yapılmıştır [32].

Karimzadehkhouei ve ark. alüminyum düzlem ısıtıcılar kullanarak titanyum dioksit (TiO2) ve bakır oksit (CuO) nano partiküllerinden oluşan su bazlı nano akışkanların havuz kaynama sıcaklıklarının incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Belirli kütle kesirlerinde nano partiküller su ile karıştırılarak nano akışkanlar oluşturulmuştur. Oluşturulan nano akışkanlar saf su ile karşılaştırılmıştır. TiO2'in en seyreltik kütle kesrine sahip olduğu nano akışkanın saf su ile kıyaslandığında %15 ısı transferi artmıştır. TiO2'in kütle kesri arttıkça ısı transferi azalmıştır. Kütle kesrine bağlı olarak ısı transferi %5 değerinin altına düşmüştür. CuO nano partikülünün %0,2 kütle kesrine sahip olduğu nano akışkan saf suya kıyasla %36' ya varan ısı transferi değeri ile pozitif sonuca varmıştır [33].

Zaraki ve ark. nano partiküller kullanılarak oluşturulmuş nano akışkanları incelemiştir. Çeşitli nano akışkanlar belirli deneyler ile incelenmiş ve güçlü matematiksel yaklaşımlar ile deney çalışması desteklenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda çalışma sıcaklığı arttıkça nano akışkanların ısı transferlerindeki iyileşme miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Sıcaklık arttıkça nano akışkanlarda dinamik vizkozite ve ısıl iletkenlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Yapılan deneysel çalışma sonucunda nano akışkanlarda yüzey aktif maddeler gibi katkı maddelerinin eklenmesinin yüksek sıcaklık çalışmaları için faydalı olabileceği öngörülmektedir [34].

Arshad ve ark. faz değiştiren malzemeler (FDM) kullanarak mikto işlemcilerdeki ısınma sorununu çözmek adına pasif soğutma sistemleri için bir teknik ortaya çıkarmıştır. Çalışma için seçilen nano partiküller hibrit karışımlar şeklinde kullanılmıştır. Belirli bir ısı akısında termal performans değerleri incelenmiştir. Isı emici bölgelerinde hibrit nano partiküller kullanılması ile sıcaklığın düştüğü gözlemlenmiştir. Isı transfer hızı incelendiğinde hibrit nano partikül kullanımı performansı arttırmıştır. Hibrit nano partiküller ve hibrit nano kompozit faz değiştiren malzemeler karşılaştırıldığında ise hibrit nano kompozit malzemelerin ısı transfer yoğunluğunun %10 soğutma fazında maksimum %13,84 olduğu tespit edilmiştir [35].

Mousazadeh ve ark. mangan kobalt ferrit ($MnCoFeO_4$) nano parçacıkları ile su kullanarak oluşturulan nano akışkanın çift borulu bir ısı değiştiricisi yardımıyla termal performansını ve kararlılığını incelemiştir. Nano akışkan sıcaklığı için 55 °C sıcaklık seçilmiştir. Soğutucu akışkan ise 23,4 L/dk hızında çift borulu ısı değiştiricine girmektedir. Saf su ile kıyaslandığında konveksiyon ısı transfer katsayısında %40 artış gözlemlenmiştir. Deney sonucunda nano akışkanların termal sistemlerde enerji tasarrufu ve termal verimlilik konuları için pozitif katkı sağlayacağına yönelik öngörülerde bulunulmuştur [36].

Jayanthi ve ark. metal oksit nano akışkanları ile vakum tüplü ısı borulu güneş kolektörleri kullanarak termal performans incelemesi için deneysel bir çalışma yapmıştır. Çeşitli konsantrasyonlarda nano akışkanlar hazırlanmış ve hazırlanan nano akışkanlar birbirileri ile karşılaştırılmıştır. %4 konsantrasyona sahip CuO-H_2O karışımı nano akışkan 78 °C çıkış sıcaklığına ulaşmış ve %56,95 termal verim değeri hesaplanmıştır. Daha sonra nano akışkanlar R134a ve saf su ile ısı transfer performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma nano akışkanların her konsantrasyon değerinde R134a ve saf su akışkanlarından termosifon tipli ısı borularında daha üstün termal performans gösterdiği gözlemlenmiştir [37].

Zhang ve ark. içten yanmalı motorlarda pistonların ısı transfer performansını arttırmak için deneysel bir çalışma yapmıştır. Yapılan deneysel çalışmada silisyum dioksit nano partikülü (SiO_2) ve su ile oluşturulan nano akışkanın taşınım ile ısı transfer katsayısı incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda SiO_2 konsantrasyonu arttığında taşınım ısı transfer katsayısının da arttığı gözlemlenmiştir. Saf su ile karşılaştırıldığında oluşturulan nano akışkan maksimum %36,8 oranında taşınım ısı transfer katsayısında artış olduğu gözlemlenmiştir [38].

Liu ve ark. açılmamış ve 8 delikli spiral kanatlı iki ısı depolama tüpünde çeşitli nano partiküller kullanarak üretilen faz değiştiren malzemelerin sayısal olarak simülasyonunu yapmıştır. Bu çalışmada faz değiştiren malzeme olarak laurik asit seçilmiştir. Laurik asit ile alüminyum (Al), bakır (Cu), ve bakır oksit (CuO) nano partikülleri karıştırılmıştır. Yapılan simülasyon sonucunda laurik asit ve nano partikül boyutunda bakır karışımı ile oluşturulan karışımın ısıl iletkenliği %16,55 oranında arttırabileceği hesaplanmıştır. Mevcut simülasyon sonucunda erime sürelerinde açılmamış spiral kanatlı ısı depolama tüpünde %11,43 tasarruf sağlanırken 8 delikli spiral kanatlı ısı depolama tüpünde bu tasarruf miktarı %13,5 olarak hesaplanmıştır [39].

Çizelge 4.1. Mevcut çalışma ile literatürdeki çalışmaların karşılaştırılması

Farklı Çalışmalar	Çalışma Tipi	Ana Bulgular
Bharathiraja ve ark. (2024)] [24]	Deneysel Çalışma	Silikon dioksit (SiO_2) nano partikülünü kullanılmıştır. Termal verimi %71,7 olarak hesaplamıştır.
Gürbüz ve ark. (2023) [25]	Deneysel Çalışma	Fe_3O_4 nano partikülünü kullanmıştır. Termal verimliliği %40,45 arttırmıştır.
Öztürk ve ark. (2024) [26]	Deneysel Çalışma	V-Oluklu PVT deneyleri sonucu %54,01 termal verim hesaplanmıştır.
Pustovalov (2025) [27]	Teorik Çalışma	Nano partiküllerin emicilik özelliklerini incelemiştir.
Nawsud ve ark. (2022) [28]	Teorik Çalışma	Nano parçacıkların sentezlenmesi ve nano akışkan kullanımını incelemiştir.
Sathish (2025) [30]	Deneysel Çalışma	Seryum oksit (CeO_2) nano partikülünü kullanmıştır. Termal verimi%65,6 olarak hesaplamıştır.
Thakur ve ark. (2021) [32]	Deneysel Çalışma	CuO ve ZnO nano partikülleri ile güneş damıtma ünitesi çalışmalarında %155,2 iç ısı transfer katsayısı artışı hesaplamıştır.
Jayanthi ve ark. (2025) [37]	Deneysel Çalışma	CuO-H_2O nano akışkan karışımı ile saf su ve R134a akışkanlarının ısı transfer performanslarını karşılaştırmıştır.

5. DENEYSEL ANALİZ

5.1. Deneysel Çalışma



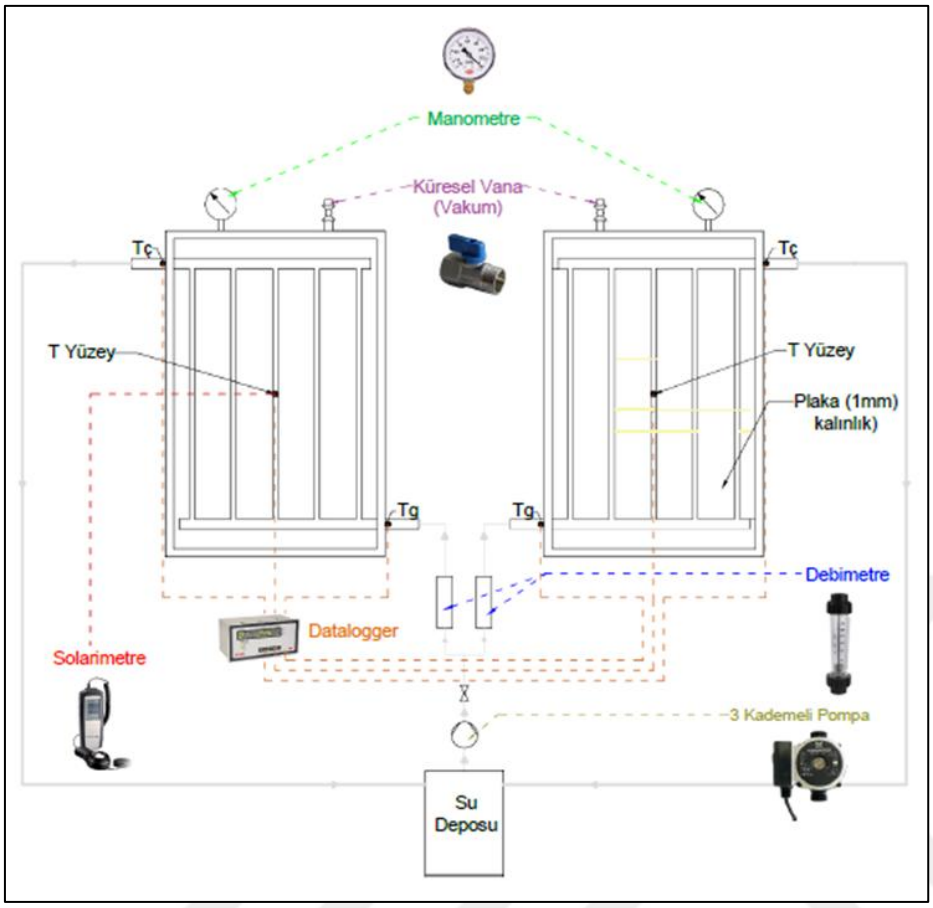
Resim 5.1. Kurulan deney düzeneği

Deney düzeneğinin ilk aşamasında, her iki tip düzlemsel güneş kolektörü yüzeyi yalnızca siyah termal boya ile kaplanmış ve bu konfigürasyon altında sistemin performansına ilişkin deneysel veriler toplanmıştır. Bu veriler, temel termal verim hesaplamalarında referans değer olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında ise, siyah termal boya içerisine belirli oranlarda $ZnFe_2O_4$ (çinko ferrit) nanopartikülü ilave edilerek hazırlanan kaplama karışımı, kolektör yüzeylerine uygulanmıştır. Bu yeni yüzey kaplama ile sistem aynı çevresel koşullarda test edilerek, nanopartikül katkısının düzlemsel güneş kolektörlerinin termal performansı üzerindeki etkisini ortaya koymaya yönelik deneysel veriler elde edilmiştir. Her iki durumda da sıcaklık değişimleri, akışkan debisi, güneş ışınımı ve çevresel koşullar dikkate alınarak termal verim hesaplamaları yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi Merkez Kampüsü (Ankara, Türkiye) bünyesinde, haziran ve temmuz aylarında gerçekleştirilmiştir. Güneş ışınımının en yüksek değerlere ulaştığı zaman aralığı dikkate alınarak, ölçümler her gün saat 10:00 ile 14:00 arasında yapılmıştır. Bu zaman aralığı, güneş kolektörlerinin performans analizinde daha sağlıklı ve karşılaştırılabilir verilerin elde edilmesini sağlamıştır.

Deney düzeneği, biri plakalı diğeri plakasız olmak üzere iki farklı düzlemsel güneş kolektöründen oluşmaktadır. Her iki kolektörün giriş hattına birer adet hassas debimetre entegre edilerek, sistemde hedeflenen akışkan debisi ölçülmüş ve sabit bir debi koşulunun sağlanması hedeflenmiştir. Akışkan sirkülasyonu, üç kademeli santrifüj pompa aracılığıyla gerçekleştirilmiş olup, bu pompa kolektörlere sürekli ve kontrollü bir akış sağlamıştır. Kolektör çıkışlarında ısınan akışkan, tek bir toplama tankında birleştirilmiş ve bu tank aynı zamanda sistemin tekrar beslenmesinde akışkan rezervuarı olarak kullanılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan düzlemsel güneş kolektörleri, çift cam levha arasına yerleştirilmiş olup, bu boşluk vakum ortamına alınarak ısıl kayıpların minimize edilmesi amaçlanmıştır. Vakum ortamının oluşturulması için her kolektörün üzerinde birer adet küresel vana yerleştirilmiş ve bu vanalar aracılığıyla sistem bir kompresör yardımıyla vakumlanmıştır. Oluşturulan vakum ortamının sürekliliğini izlemek ve kontrol altında tutmak amacıyla her kolektör üzerine birer manometre monte edilmiştir. Bu sayede deney süresince sistemin iç basıncı düzenli olarak izlenmiş ve gerekli durumlarda müdahale edilerek vakum koşullarının sürekliliği sağlanmıştır.

Her iki düzlemsel güneş kolektörüne, sistem performansının izlenebilmesi amacıyla üç farklı noktadan tip-K termokupl (ısıl çift) yerleştirilmiştir. Bu sensörler sayesinde kolektörlerin giriş, çıkış ve emici yüzey sıcaklıkları ayrı ayrı ölçülerek detaylı bir sıcaklık profili oluşturulmuştur. Tüm sıcaklık verileri, termokupllar aracılığıyla veri toplama cihazı (data logger) üzerinden kaydedilmiştir. Data logger, bilgisayar bağlantısı ile sürekli veri aktarımı sağlamış ve deney süresince elde edilen sıcaklık değişimleri dijital ortamda düzenli olarak arşivlenmiştir. Ayrıca, data logger sistemine entegre edilmiş ortam sıcaklığı sensörü aracılığıyla, deneyin gerçekleştirildiği süre boyunca çevresel sıcaklık koşulları da eş zamanlı olarak izlenmiş ve kaydedilmiştir. Güneş ışınımının deneysel veriler üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, deney düzeneğinden bağımsız olarak her 30 dakikada bir solarimetre kullanılarak yatay düzlemdeki güneş ışınımı şiddeti ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Bu sayede elde edilen deneysel verilerin doğruluğu ve karşılaştırılabilirliği artırılmıştır.



Şekil 5.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

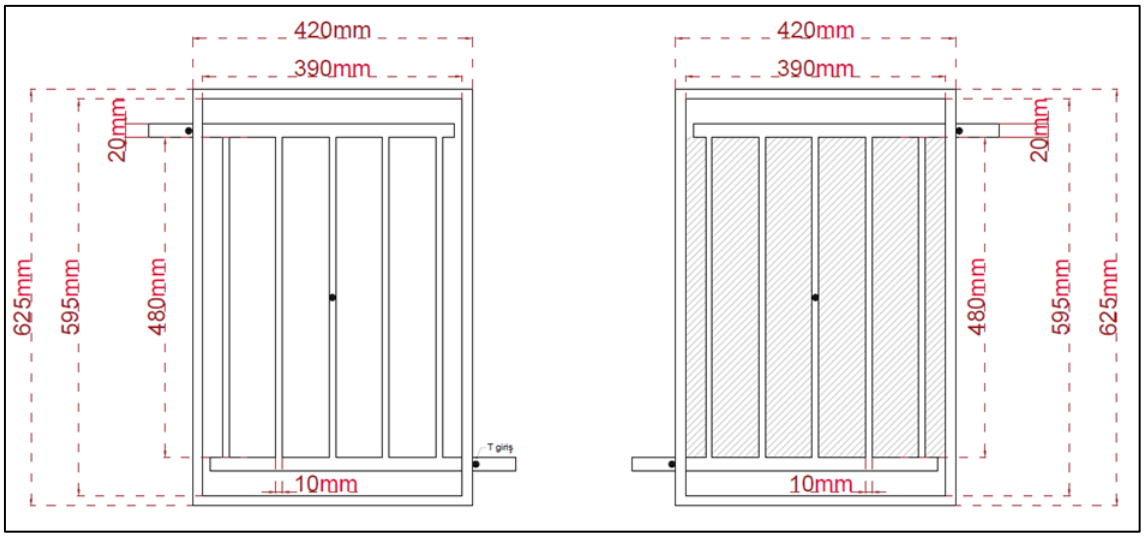
5.2. Deney Düzeneğinin Hazırlanması

Deney düzeneğinin kurulumu sırasında, kolektör içerisindeki akışkan dolaşımını sağlamak amacıyla iki farklı çapta alaşımlı bakır borular kullanılmıştır. Bu kapsamda, dış çapı 10 mm, et kalınlığı 1 mm ve uzunluğu 480 mm olan toplam 10 adet alaşımlı bakır boru ile dış çapı 20 mm, et kalınlığı 1 mm ve uzunluğu 550 mm olan 4 adet alaşımlı bakır boru temin edilmiştir. Akışkan dağılımını sağlayacak yapının oluşturulabilmesi için, 20 mm çapındaki bakır boruların üzerine eşit aralıklarla 5 adet delik açılmıştır. Daha sonra, 10 mm çapındaki ince borular, bu deliklere eksenel hizalanarak her iki uçtan kaynak yöntemiyle ana boruya sabitlenmiştir. Böylece kolektör içerisindeki akışkanın homojen dağılımını sağlayacak ızgara tipi boru yapısı elde edilmiştir. Kaynak işlemlerinin tamamlanmasının ardından, bağlantı bölgelerinde herhangi bir sızdırma olup olmadığını kontrol etmek amacıyla sızdırmazlık (kaçak) testi uygulanmış ve sistemin basınca dayanıklılığı doğrulanmıştır. Bu adım, kolektörün uzun süreli ve güvenli çalışmasını sağlamak adına kritik bir yapısal kalite kontrol sürecidir.



Resim 5.2. Kaynaklanmış ve sızdırmazlık testi yapılmış bakır borular

Deney düzeneğinde, düzlemsel güneş kolektörlerinden biri için 390 mm × 420 mm boyutlarında ve 1 mm kalınlığında bakır bir plaka kullanılmıştır. Bu plaka, uygun açılarla bükülerek kolektör gövdesine entegre edilmiş ve 10 mm dış çapa sahip ısı transfer borularıyla doğrudan temas etmesi sağlanmıştır. Emici yüzeyin güneş ışınımını maksimum düzeyde soğurabilmesi amacıyla, bu yapı siyah termal boya ile kaplanmış ve ilk deneysel ölçümler bu yüzey konfigürasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, deney düzeneğinin üst bölümü, 625 mm uzunluğa, 420 mm genişliğe ve 50 mm derinliğe sahip iki cam levha arasında oluşturulan bölmeye yerleştirilmiştir. Bu çift cam yapısı, kolektörün ısı kayıplarını minimize edecek şekilde tasarlanmış ve vakum ortamı oluşturularak dış ortamla ısı transferi azaltılmak istenmiştir. Sistem vakumlanmadan önce üst cam panelin üzerine bir adet küresel vana ve bir adet manometre monte edilmiştir. Küresel vana, vakum ortamının oluşturulmasını sağlarken; manometre ise deney süresince sistemin iç basıncının izlenmesini ve vakum seviyesinin kontrolünü mümkün kılmıştır. Bu yapı sayesinde kolektörün daha kararlı ve yalıtımlı bir ortamda test edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.2. Deney düzeneğinde kullanılan düzlemsel güneş kolektörlerinin ölçüleri

5.3. Deney Düzeneğinde Kullanılan Ekipmanlar

Çizelge 5.1. Deney düzeneğinde kullanılan kaplama malzemeleri

Malzeme	Kimyasal Formül	Saflık	Özellikler
Termal Boya	SiO_2+Polimer	%98	0,95 absorpsiyon, 0,85 emisyon
$ZnFe_2O_4$ Nano partikül	$ZnFe_2O_4$	%99,8	20-40 nm partikül boyutu

Çizelge 5.2. Deney düzeneğinde kullanılan veri toplama sistemi

Ekipman	Model	Özellikler	Doğruluk
Data Logger	Elimko-IB-11	16 kanal, -200÷1370°C aralığı	±0,1°C
K-tipi Termokupl	Omega TT-K-24-SLE	0-400°C, 304 paslanmaz çelik kılıf	±0,5°C
Solarimetre	CEM DT-1307	285÷2800 nm spektral aralık	±1,5%
Debimetre	Key Instruments	0.1-5 L/dk, Analog Okuma	±0,01 L/dk

Çizelge 5.3. Deney düzeneğinde kullanılan ısıl sistem elemanları

Ekipman	Teknik Özellikler
3 Kademeli Pompa	Grundfos UPS 25-40, 0,37 kW, 6 m³/saat
Su Tankı	19 L Polikarbonat Isıya Dayanaklı Tank

5.3.1. Data logger

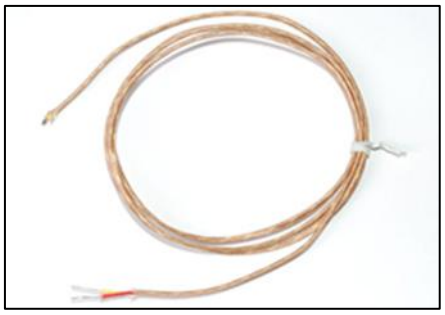
Data logger cihazları, sıcaklık, bağıl nem, basınç, voltaj, su seviyesi gibi çeşitli fiziksel ve çevresel parametreleri önceden tanımlanmış zaman aralıklarında otomatik olarak kaydedebilen veri toplama sistemleridir. Bu cihazlar, kullanıcı tarafından belirlenen örnekleme frekansına göre ölçüm alarak uzun süreli izleme ve analiz yapılmasına olanak tanımakta, deneysel çalışmalarda sistem performansının detaylı şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır.



Resim 5.3. Örnek data logger

5.3.2. Termokupl (Isıl Çift)

Termokupl, sıcaklık ölçümü yapan bir sensördür. İki ayrı iletken madde içerir. Bu malzemelerin iki ucunu (sıcak noktalar) bir araya getirip ısıttığınızda, diğer ucunda (soğuk noktalar) gerilim oluşur. Bu voltajın miktarı, kullanılan malzemenin türüne ve bağlantının ısınma düzeyine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sıcak ve soğuk noktaların sıcaklık dağılımından bağımsız olarak, ortaya çıkan voltaj, sıcak ve soğuk noktalar arasındaki sıcaklık farkı ile orantılıdır. Sıcak nokta ile soğuk nokta arasında oluşan sıcaklık farkı, termokupl içinde bir voltaj (EMF) meydana getirir. Eğer sıcak noktanın sıcaklığı sabit kalırsa, o zaman soğuk noktanın sıcaklığı değiştiğinde farklı bir sıcaklık değeri gözlemleyeceksiniz. Bu nedenle, mV tablosundaki değerler için bir standart oluşturmak amacıyla soğuk noktanın 0°C'de tutulmasıyla ölçülen sıcaklığın değeri belirlenir. Termokupllar, -200° ile 2320°C arasında farklı sıcaklıkları ölçmek ve kontrol etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, sıcaklık değişimlerini elektrik enerjisine çevirirler.



Resim 5.4. Termokupl (Isıl Çift)

5.3.3. Manometre

Manometreler, basit bir yapıya sahip olup, merkür veya renkli alkol gibi sıvılarla yapılan analog sistemlerden, en yeni dijital sensörlerle donatılmış cihazlara kadar çeşitlilik göstermektedir. Farklı türde manometreler, ölçüm yöntemleri ve doğruluk dereceleri ile çeşitlenir; ancak ana hedefleri her zaman aynı kalır: basıncı etkili bir şekilde ölçmektir. Kullanım alanına ve ölçüm ihtiyaçlarına bağlı olarak çeşitli manometre türleri ile ölçekleri bulunmaktadır. Mesela, düşük basınçların ölçülmesi gereken hallerde, daha doğru ölçüm kapasitesine sahip U-tipi manometreler tercih edilebilir. Yüksek basınçların ölçülmesi gereken durumlarda, Bourdon tüpü gibi elemanlara sahip manometrelerin kullanılması tercih edilmektedir. Çoğu manometre, basıncın fiziksel gücünü bir okuma değeri haline getirebilir. Örneğin, bir sıvı basıncını ölçerken, sıvının yaptığı basınç doğrudan manometre içindeki sıvı sütununa etki eder ve bu sütun yükselip alçalmaktadır. Bu değişim, manometrenin üzerinde yer alan ölçekli yüzeyde belirli bir değere karşılık gelmektedir ve basınç ölçümü bu yöntemle gerçekleştirilmektedir. Dijital manometrelerde genellikle yarı iletken yapıdaki basınç sensörleri kullanılmaktadır. Bu sensörler, basınca duyarlı parçalar barındırır ve basınç değişimlerini elektrik sinyallerine dönüştürerek dijital bir ekran üzerinden okunabilir hale getirirler. Bu teknoloji, ölçüm yaparken daha fazla doğruluk ve veri işleme yeteneği sağlayarak karmaşık işlemler için daha elverişli hale gelmektedir. Her manometre modeli, belirli bir kullanım süresi ve doğruluk standardına sahip olduğundan, düzenli olarak kalibre edilmesi gereklidir. Kalibrasyon işlemi, manometrelerin basınç ölçümündeki doğruluğu ve güvenilirliği sağlamak amacıyla düzenli olarak uzman kişiler tarafından gerçekleştirilmelidir. Kalibrasyonsuz manometreler, zamanla hatalı ölçümler gerçekleştirebilir ve bu durum önemli güvenlik ve performans problemlerine neden olabilir.



Resim 5.5. Örnek manometre

5.3.4. Küresel Vana

Küresel vanalar, suyun akışını düzenlemenin en etkili yöntemidir. Bu vanalar; suyun akışını dengelemek, düzenlemek ve yönlendirmek amacıyla kullanılan tesisat ekipmanlarıdır. Sızdırmaz yapıları ve düşük maliyetli olmaları sebebiyle birçok tesisat projesinde tercih edilen ekipmanlar arasındadır.



Resim 5.6. Örnek küresel vana

5.3.5. Solarimetre

Solarimetre, güneş ışınlarının miktarını ve yoğunluğunu belirlemek amacıyla geliştirilmiş bir alettir. Bu cihazlar, güneş enerjisi potansiyelini analiz etmek, güneş panellerinin etkinliğini takip etmek, meteorolojik verileri toplamak, tarımsal uygulamalar için uygun güneş ışığı sürelerini tespit etmek ve diğer güneş enerjisi projelerini organize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Güneş ışınlarını yatay veya dikey düzlemde ölçmek için sıklıkla solarimetreler kullanılmaktadır. Güneş ışınlarının açısını, yoğunluğunu ve düşme süresini ölçmek amacıyla çeşitli türlerde ve teknolojilerde solarimetreler bulunmaktadır. Bu cihazlar, optik, elektronik ve sensör temelli teknolojileri barındırabilir.



Resim 5.7. Örnek solarimetre

5.3.6. Debimetre

Bu tür şamandıralı akış ölçer, düşük akış hızında olan sıvıları kesin bir şekilde ölçmek amacıyla tasarlanmıştır. Metal bir yapıya sahip olup, darbelere karşı sağlamdır. Boru hattına dik bir şekilde monte edilir ve aşağıdan yukarıya akış hızını ölçmeye olanak tanır. Ayar vanası sayesinde akış hızının hassas bir şekilde düzenlenmesini sağlar.



Resim 5.8. Örnek şamandıralı debimetre

5.3.7. 3 Kademeli sirkülasyon pompası

Isıtma sistemlerinde, kazanda ısınan su, pompanın yardımıyla tesisattaki dirençleri aşarak ısı yayıcılarına ulaştırılır. Suyun kalorifer sistemleri içinde dolaşımını sağlamak amacıyla yalnızca santrifüj pompalar uygundur. Pompanın çalışması esnasında emme borusundaki basınç düşerken, basma borusundaki basınç yükselir. Pompa basıncı, boru hattındaki basınç kayıplarını telafi etmeyi mümkün kılar.



Resim 5.9. Örnek sirkülasyon pompası

5.2. Deneyin Yapılışı

Deney düzeneği iki ayrı fazda gerçekleştirilmiştir. Bu çok aşamalı yaklaşım sayesinde, yalnızca siyah termal boya ile kaplanmış düzlemsel güneş kolektörlerinin performansı ile termal boya içerisine $ZnFe_2O_4$ (çinko ferrit) nanopartikülleri ilave edilerek kaplanmış kolektörlerin performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu doğrultuda çalışmanın birinci fazı, klasik termal boya kaplamanın güneş kolektörünün termal verimine etkisini değerlendirmeye yönelik olarak planlanmış; ikinci fazda ise nanopartikül katkısının emici yüzey performansına olan etkileri analiz edilmiştir. Her iki fazda da benzer çevresel koşullar sağlanarak, elde edilen verilerin karşılaştırılabilirliği ve değerlendirme güvenilirliği artırılmıştır.

Deneysel çalışmanın birinci fazında, her iki düzlemsel güneş kolektörü yalnızca siyah termal boya ile kaplanmış ve çift cam yapının arasına yerleştirilerek vakum ortamı oluşturulmuştur. Deney düzeneği, sabah saat 10:00 itibarıyla bilgisayara bağlanmış; pompa ve veri toplama sistemi (data logger) çalıştırılarak sistem aktif hâle getirilmiştir. Akışkan debisi, sistemin giriş noktalarına yerleştirilen debimetreler aracılığıyla kontrol edilerek sırasıyla 0,3 L/dk, 0,4 L/dk ve 0,5 L/dk olmak üzere üç farklı debi değeri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Sistemin kararlı akış koşullarına ulaşması sağlanana dek debimetreler sürekli izlenmiş ve akış dengesinin sağlandığı an itibarıyla veri kaydı başlatılmıştır.

Güneş ışınımı değerleri, deney düzeneğinin üzerine yerleştirilen solarimetre aracılığıyla

ölçülmüş ve her 30 dakikada bir olmak üzere düzenli aralıklarla kaydedilmiştir. Deney süresi boyunca sistem sürekli olarak gözlem altında tutulmuş, böylece deney sırasında meydana gelebilecek olası arızalar ya da sapmaların erkenden fark edilerek müdahale edilmesi sağlanmıştır. Güneş ışınımının şiddetinde gözlemlenen azalma ve sistemin genel olarak kararlı hâle gelmesi, deneyin bitiş zamanı olan saat 14:00'ün belirlenmesinde etkili olmuştur.

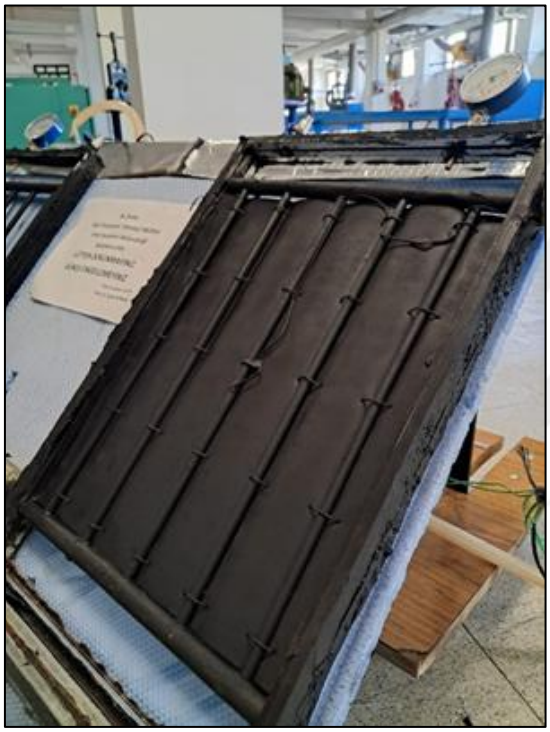


Resim 5.10. Termal boya ile kaplanan güneş kolektörleri

Deney düzeneğinin ikinci fazına geçilmeden önce, her iki düzlemsel güneş kolektörünün ön yüzeyinde bulunan cam paneller dikkatli bir şekilde sistemden ayrılmıştır. Bu işlem, kolektörlerde yer alan ve birinci fazda yalnızca siyah termal boya ile kaplanmış olan emici yüzeylere erişim sağlanması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen erişim sayesinde, mevcut termal boya tabakası yüzeyden temizlenmiş ve yerini $ZnFe_2O_4$ (çinko ferrit) nanopartikülleri ile zenginleştirilmiş yeni bir kaplama malzemesi almıştır. Bu nanopartikül katkılı kaplama, yüzeye dikkatlice uygulanmış ve homojen bir kaplama elde edilerek sistemin uzun süreli performansına katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Kaplama işleminin tamamlanmasının ardından, kolektörlerin ön cam yüzeyleri tekrar

yerleştirilmiş ve sızdırmazlık sağlamak amacıyla tüm çevre bağlantıları silikon malzeme ile yalıtılmıştır. Ardından, sistem bir kompresör yardımıyla vakumlanarak deney koşulları birinci fazla tutarlı hâle getirilmiştir. İkinci faz deneyleri, birinci fazda uygulanan prosedürle birebir aynı şekilde yürütülmüş; sıcaklık, akışkan debisi ve güneş ışınımı verileri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Elde edilen veriler grafiksel olarak analiz edilerek, nanopartikül katkısının düzlemsel güneş kolektörlerinin termal performansı üzerindeki etkilerine yönelik bilimsel çıkarımlar yapılması amaçlanmıştır.



Resim 5.11. Nano partikül ve termal boya ile kaplanan güneş kolektörleri

Şekil 5.3. Deneysel prosedür akış şeması



Deney düzeneğinde belirli bir prosedüre uymak deneyin kararlılığı ve güvenilirliği açısından önemlidir.

6. TEORİK ANALİZ

Teorik analiz yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin işlenmesi ve matematiksel hesaplamalar yapılarak termodinamik ve akışkanlar mekaniği prensiplerine uygun olarak sonuçlar bulunmasını kapsamaktadır. Deney düzeneğinde düzlemsel güneş kolektörlerinin giriş kısmında bulunan termokupldan okunan (Tg) sıcaklık değeri ve düzlemsel güneş kolektörlerinin çıkış kısmında bulunan termokupldan (Tç) sıcaklık değeri ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda deney düzeneğinde kullanılan data loggera entegre bulunan termokupl ile ortam sıcaklığı (Ta) verileri kaydedilmiştir. Solarimetre ile belirli aralıklarla ölçülen veriler hesaplanmalara eklenmiştir. Elde edilen deneysel veriler termodinamik ve akışkanlar mekaniği prensiplerine uygun denklemler yardımıyla çeşitli parametrelerde hesaplamalar yapmakta kullanılmıştır. Deneysel veriler elde edilerek analiz yapabilmek için gerekli denklemler verilmiştir.

Ortalama akışkan sıcaklığının (Tm) hesaplandığı Eş. 6.1 ifadesi ile düzlemsel güneş kolektöründe akışkanın giriş ve çıkış sıcaklığı değerlerinin ortalaması alınarak Tm değeri hesaplanmıştır.

$$Tm = \frac{\mathrm{Tg+Tç}}{2}\ (K) \tag{6.1}$$

Termal Verim Hesaplaması (η) için düzlemsel güneş kolektörlerinin çıkış sıcaklığı (Tç) ve giriş sıcaklığının farkı hesaplanır. Bulunan değer kütlesel debi değeri ve deney düzeneğinde kullanılan akışkanın (su) özgül ısısı ile çarpılır. Bulunan değer kolektörün açıklık alanı ve güneş ışınımı şiddetinin çarpımına bölünür. Bu değer bize 0 ile 1 arasında bir verim değeri verir. Ardından bu değer 100 ile çarparak yüzdelik hale getirilir.

$$\eta = \frac{\dot{m}.\mathrm{C_p}.(\mathrm{Tç}-\mathrm{Tg})}{\mathrm{G}.\mathrm{A_a}} \times 100\ (\%) \tag{6.2}$$

ṁ: Kütlesel debi (kg/s) (Q: m3/s, ρ: 1000 kg/m³)

Cp: Suyun özgül ısısı = 4186 J/kgK

Aa : Kolektör açıklık alanı = 0,23205 m2

Performans faktörü (Km^2/W) hesaplamak için Eş. 6.3 denklemi kullanılmıştır. Performans faktörü güneş enerjisi sistemlerinde termal verim hesaplamalarını anlamlı hale getirmek için kullanılmıştır.

$$PF = \frac{(\mathrm{Tm}-\mathrm{Ta})}{\mathrm{G}} \ (m^2K/W) \tag{6.3}$$

Güç çıkışı (W) düzlemsel güneş kolektörlerinde üretilen gücü belirtmek için kullanılmıştır.

$$P = \dot{m}.Cp.(Tç-Tg) \ (W) \tag{6.4}$$

Çizelge 6.1. Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanların belirsizlik analizi

Parametre	Ölçüm Cihazı	Belirsizlik Değeri	Hata Yayılımı
Sıcaklık	Termokupl	±0,5°C	0,87%
Güneş Işığı Yoğunluğu	Solarmetre	±1,5%	1,32%
Debi	Debimetre	±0,01 L/dk	0,93%
Toplam Belirsizlik	-	-	2,24%

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmamın bu bölümünde, $ZnFe_2O_4$ (çinko ferrit) nanopartikül katkılı kaplamaların düzlemsel güneş kolektörlerinin termal performansı üzerindeki etkileri çeşitli parametreler dikkate alınarak sistematik bir şekilde incelenmiştir.

İlk aşamada, düzlemsel güneş kolektörlerinde kaplama materyali değişken tutularak termal verim karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu kapsamda iki ayrı değerlendirme gerçekleştirilmiştir:

1. Plakasız düzlemsel güneş kolektörü için yalnızca termal boya kaplanmış yüzey ile $ZnFe_2O_4$ nanopartikülleri katkılı termal boya kaplanmış yüzeyin termal verimleri karşılaştırılmıştır.
2. Plakalı düzlemsel güneş kolektörü için de benzer şekilde, klasik termal boya ile nanopartikül katkılı termal boya uygulamalarının performansları incelenmiştir.

İkinci aşamada ise, kaplama türü sabit tutularak, kolektör tipinin (plakalı ve plakasız) sistem performansına etkisi analiz edilmiştir. Bu kapsamda iki ayrı karşılaştırma yapılmıştır:

1. Sadece termal boya kaplamalı düzlemsel güneş kolektörlerinde, plakalı ve plakasız yapıların termal verim açısından gösterdiği performans farkları değerlendirilmiştir.
2. $ZnFe_2O_4$ nanopartikül katkılı termal boya ile kaplanmış düzlemsel güneş kolektörlerinde, yine plakalı ve plakasız tasarımlar arasındaki verim farkları analiz edilmiştir.

Yapılan bu çok boyutlu karşılaştırmalar hem yüzey kaplama malzemesinin hem de kolektör mimarisinin güneş kolektörünün genel enerji dönüşüm verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymak açısından önemli sonuçlar sağlamıştır.

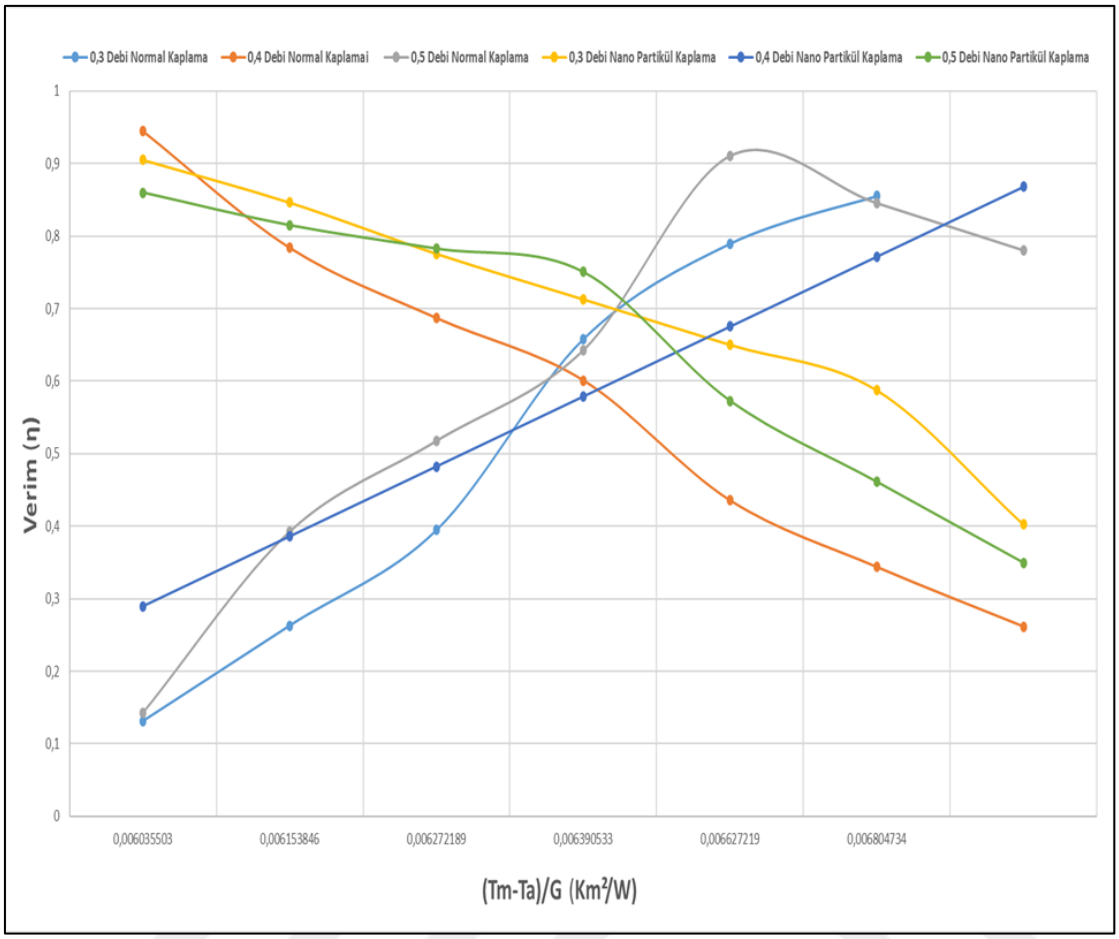
7.1. Plakasız Düzlemsel Güneş Kolektörü

Plakasız düzlemsel güneş kolektörü sisteminde, yalnızca alaşımlı bakır borular ve vakumlu cam yapı kullanılarak basit bir emici yüzey oluşturulmuştur. Bu sistemde, bakır boruların doğrudan güneş ışınımını absorbe etme kapasitesi incelenmiş ve ısı transfer performansı değerlendirilmiştir. Plakasız kolektör konfigürasyonu, düzlemsel güneş kolektörü

tasarımında plakanın katkısını analiz edebilmek amacıyla referans noktası olarak kullanılmıştır. Böylece, aynı koşullar altında gerçekleştirilen deneylerle, plaka ilavesinin termal performansa olan etkisi daha sağlıklı ve karşılaştırılabilir bir şekilde analiz edilebilmiştir. Bu karşılaştırma, emici plakanın güneş ışınımının absorpsiyonu ve ısı iletimi üzerindeki katkısını ortaya koymak açısından çalışmanın önemli bir bileşenini oluşturmaktadır.



Resim 7.1. Plakasız güneş kolektörü



Şekil 7.1. Plakasız güneş kolektörünün güç faktörüne göre verim değişimleri

Deneysel çalışmalarda elde edilen termal verim değerleri incelendiğinde, nano partikül katkılı termal boya ile kaplanan plakasız düzlemsel güneş kolektörlerinin, özellikle düşük güç faktörü aralıklarında daha yüksek termal verim değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, 0,3 L/dk ve 0,5 L/dk debi değerlerinde açıkça ortaya çıkmış; bu debilerde sistemin başlangıçta daha verimli çalıştığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, yalnızca termal boya ile kaplanmış plakasız kolektör, 0,4 L/dk debi değerinde ve düşük güç faktörü aralığında yüksek verim göstermiştir. Ancak sistemin çalışma koşullarında kararlılığa ulaşmasıyla birlikte, artan güç faktörü değerlerine paralel olarak bu kolektördeki verim düşüşü daha hızlı gerçekleşmiştir. Özellikle 0,4 L/dk debisinde, termal boya kaplı sistemin verimi, zamanla belirgin şekilde azalmıştır.

Öte yandan, nano partikül ve termal boya ile kaplanmış plakasız düzlemsel güneş kolektörü, 0,4 L/dk debi değerinde doğrusal artışa yakın bir eğilimle verim kazanımı göstermiştir. Bu kolektör, tüm plakasız kolektörler arasında en yüksek verim değerine ulaşmıştır. Bu

sonuçlar, plakasız yapıdaki düzlemsel güneş kolektörlerinde $ZnFe_2O_4$ nanopartikül katkısının termal performansı olumlu yönde etkilediğini ve sistem verimliliğinde anlamlı bir artış sağladığını göstermektedir.

Çizelge 7.1. Plakasız kolektörlerde nano partikülün performansa etkisi

Debi	Plakasız Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörü Ortalama Verim Değerleri	Plakasız Nano Partikül ve Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörü Ortalama Verim Değerleri	Performans Artışı (%)
0,3 L/dk	0,52	0,70	35,35%
0,4 L/dk	0,63	0,58	-8,49%
0,5 L/dk	0,58	0,66	14,06%

Ortalama termal verim değerleri incelendiğinde, plakasız düzlemsel güneş kolektörlerinde $ZnFe_2O_4$ nanopartikülü katkılı termal boya kullanımı ile özellikle 0,3 L/dk ve 0,5 L/dk debi değerlerinde anlamlı performans artışları elde edilmiştir. Düşük debi aralığı olan 0,3 L/dk'da, nano partikül katkısının sağladığı verim artışı, yüksek debi değeri olan 0,5 L/dk'ya kıyasla daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Bu durum, düşük debi koşullarında akışkanın daha uzun süre yüzeyle temas etmesi sayesinde ısı transferinin daha verimli gerçekleştiğini ve nano partiküllerin bu süreçte etkili rol oynadığını göstermektedir.

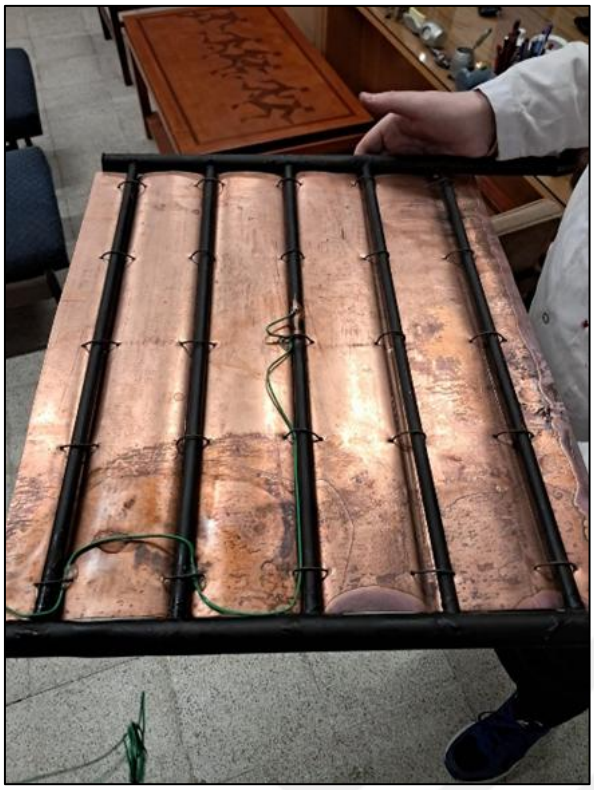
Buna karşın, 0,4 L/dk debi değerinde, yalnızca termal boya ile kaplanmış plakasız kolektör, nano partikül katkılı kaplamaya sahip kolektöre göre daha yüksek bir ortalama termal verim sergilemiştir. Bu bulgu, orta debi aralığında nano partikül kullanımının her zaman verim

artışı sağlamadığını; belirli koşullarda ısı transfer karakteristiğini olumsuz yönde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, özellikle geçiş debi bölgelerinde sistemin kararlı çalışma durumu, akış rejimi ve nanopartikül dağılım homojenliği gibi parametrelerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir.

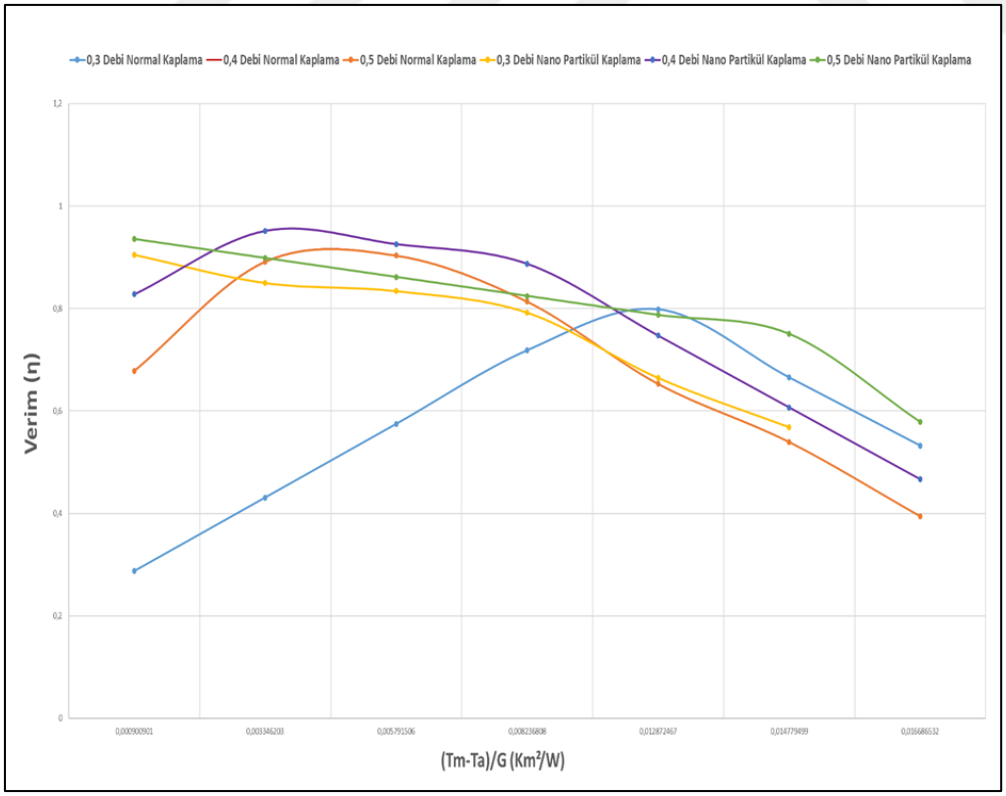
7.2. Plakalı Düzlemsel Güneş Kolektörü

Plakasız düzlemsel güneş kolektörü konfigürasyonundan farklı olarak, bu tasarımda her bir bakır borunun altına, ısı transferini artırmak amacıyla özel olarak bükülmüş 1 mm kalınlığında bir bakır plaka yerleştirilmiştir. Bu plaka, bakır borularla doğrudan temas edecek şekilde konumlandırılarak, yüzey alanının artırılması ve güneş ışınımının daha etkin soğurulması hedeflenmiştir. Emici yüzeyin hazırlanmasının ardından yapı, siyah termal boya ile kaplanarak güneş ışınlarının absorpsiyon kapasitesi daha da artırılmıştır.

Hazırlanan bu kolektör, çift camlı muhafaza sistemine entegre edilerek, iki cam tabaka arasına yerleştirilmiş ve çevresel ısı kayıplarını minimize etmek amacıyla cam çerçeve bağlantı noktalarına yüksek ısı dayanımlı silikon uygulanarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Son aşamada, sistem deney ortamına entegre edilmek üzere özel olarak tasarlanan hareketli test platformuna yerleştirilmiş ve ölçüm sürecine başlanmaya hazır hâle getirilmiştir.



Resim 7.2. Düzlemsel güneş kolektörüne plakanın yerleştirilme işlemi



Şekil 7.2. Plakalı güneş kolektörünün güç faktörüne göre verim değişimleri

Plakalı düzlemsel güneş kolektörüne ait deneysel veriler incelendiğinde, ilk dikkat çeken bulgu; yalnızca termal boya ile kaplanmış kolektörde, 0,3 L/dk debi değerinde elde edilen ortalama verimin, diğer debi değerlerine ve kaplama türlerine kıyasla daha düşük olmasıdır. Bu durum, düşük debi koşullarında emici plaka bulunmasına rağmen sistemin yeterli ısı transferini sağlayamadığını ve özellikle termal boya kaplamanın bu koşullarda performans kaybına neden olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, düşük debideki akışkanın daha uzun süre ısıl yüzeyle temas etmesine rağmen, emici plaka üzerinde oluşan ısının etkin bir şekilde taşınamaması sonucu birikim yaparak sistemin verimini düşürdüğünü işaret etmektedir.

Buna karşın, $ZnFe_2O_4$ nano partikülleri ile zenginleştirilmiş termal boya kaplaması, sistemin tüm debi değerlerinde daha kararlı ve yüksek ortalama verim değerlerinde çalışmasını sağlamıştır. Özellikle 0,5 L/dk debi değerinde, sistemin termal dengesini koruduğu ve ani verim değişimleri göstermediği gözlemlenmiştir. Ancak en yüksek ortalama termal verim, 0,4 L/dk debi değerinde ve nano partikül katkılı kaplama uygulanmış durumda elde edilmiştir. Bu sonuç, orta debi aralığında hem akışkanın yeterli süre yüzeyle temas etmesi hem de nano katkının yüzey ısısını daha verimli bir şekilde iletmesiyle açıklanabilir.

Çizelge 7.2. Plakalı kolektörlerde nano partikülün performansa etkisi

Debi	Plakalı Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörü Ortalama Verim Değerleri	Plakalı Nano Partikül ve Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörü Ortalama Verim Değerleri	Performans Artışı (%)
0,3 L/dk	0,57	0,77	34,33%
0,4 L/dk	0,70	0,77	11,07%
0,5 L/dk	0,70	0,81	15,68%

Ortalama termal verim değerleri dikkate alındığında, düzlemsel güneş kolektörlerinde nano partikül katkılı termal boya kaplamasının, sistem performansı üzerinde her üç debi aralığında da olumlu etkiler sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, özellikle 0,3 L/dk gibi düşük debi koşullarında nano partikül katkısının termal verim üzerinde oluşturduğu artış, diğer debi değerlerine kıyasla daha belirgin seviyededir. Bu durum, düşük debide akışkanın yüzeyle daha uzun süre temas etmesi sayesinde, nano katkılı yüzeyin ısı transfer kapasitesinin daha etkili biçimde ortaya çıktığını göstermektedir.

Benzer bir eğilim, plakasız düzlemsel güneş kolektörü deneylerinde de gözlenmiş olup, bu bulgular Çizelge 7.1'de ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Buna göre, her iki kolektör tipinde de nano partikül katkısı, sistemin genel termal verimini artırmış; özellikle düşük debideki performans artışı anlamlı bulunmuştur. Bununla birlikte, en yüksek ortalama termal verim değeri, 0,5 L/dk debi değerinde ve nano partikül katkılı termal boya ile kaplanmış düzlemsel güneş kolektöründe elde edilmiştir. Bu sonuç, yüksek debi koşullarında sistemin kararlılığını sürdürerek ısıyı etkin şekilde transfer edebildiğini ve nano katkının bu koşullarda dahi performans kaybına neden olmadığını göstermektedir.

Çizelge 7.3. Termal boya ile kaplanan güneş kolektörlerinin verim karşılaştırması

Debi	Plakasız Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörü Ortalama Verim Değerleri	Plakalı Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörü Ortalama Verim Değerleri	Performans Artışı (%)
0,3 L/dk	0,52	0,57	%11,11
0,4 L/dk	0,63	0,70	%10,05
0,5 L/dk	0,58	0,70	%21,05

Çalışmanın ilk aşamasında gerçekleştirilen deneylerde, düzlemsel güneş kolektörleri yalnızca termal boya kaplamalı olarak hazırlanmış ve sistem 0,3 L/dk, 0,4 L/dk ve 0,5 L/dk sabit debi değerlerinde test edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler doğrultusunda, emici plaka kullanımının, kolektör performansı üzerinde belirgin bir iyileştirici etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 0,5 L/dk debi koşulunda, plaka eklenen kolektörde %21,05 oranında bir termal verim artışı hesaplanmıştır. Bu durum, daha yüksek debilerde emici plakanın yüzey alanı artırarak ısı transferini iyileştirdiğini ve termal boya kaplamanın bu yapıyla birlikte daha etkin çalıştığını göstermektedir.

Bulgular ayrıca, yalnızca termal boya kullanılan kolektörlerde debideki artışa paralel olarak sistem veriminin yükseldiğini ortaya koymuştur. Buna ek olarak, plakalı düzlemsel güneş kolektörlerinin, aynı koşullarda test edilen plakasız sistemlere kıyasla genel olarak daha yüksek termal performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, emici plakanın güneş ışınımının daha etkin soğurulmasına ve ısının akışkana daha verimli aktarılmasına katkı sağladığını doğrulamaktadır.

Çizelge 7.4. Nano partikül ve termal boya ile kaplanan güneş kolektörlerinin verim karşılaştırması

Debi	Plakasız Nano Partikül ve Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörü Ortalama Verim Değerleri	Plakalı Nano Partikül ve Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörü Ortalama Verim Değerleri	Performans Artışı (%)
0,3 L/dk	0,70	0,77	%10,27
0,4 L/dk	0,58	0,77	%33,58
0,5 L/dk	0,66	0,81	%22,76

Çalışmanın ikinci aşamasında, düzlemsel güneş kolektörleri $ZnFe_2O_4$ nano partikülü katkılı termal boya ile kaplanarak yeniden test edilmiş ve sistem, önceki deneylerle aynı şekilde 0,3 L/dk, 0,4 L/dk ve 0,5 L/dk sabit debi değerlerinde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, plakalı düzlemsel güneş kolektörlerinin, plaka içermeyen (plakasız) sistemlere kıyasla her üç debi değerinde de daha yüksek termal verim sağladığını ortaya koymuştur. Bu durum, emici plakanın yüzey alanını artırarak nano partikül katkılı kaplamanın etkisini optimize ettiğini göstermektedir.

Özellikle 0,4 L/dk debi değerinde elde edilen %33,58 oranındaki performans artışı, hem nano partikül katkısının hem de plaka kullanımının birlikte sistem verimliliğine olan katkısını açıkça ortaya koymuştur. Bu bulgu, orta debi aralığında nano partikül içeren kaplamaların ısı transfer mekanizmasına daha etkin şekilde entegre olduğunu ve bu sayede sistemin hem kararlı hem de yüksek verimle çalıştığını göstermektedir. Sonuç olarak, nano partikül destekli termal boya uygulamasının, özellikle emici plaka ile birlikte kullanıldığında düzlemsel güneş kolektörlerinin termal performansını önemli ölçüde artırdığı söylenebilir.

Deneysel bulgular, düzlemsel güneş kolektörlerinde kullanılan kaplama türünden bağımsız olarak, emici plaka ilavesinin sistemin termal verim değerlerini anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koymuştur. Bu artışın temelinde, plaka kullanımıyla güneş ışınımının emildiği yüzey alanının genişletilmesi ve böylece kolektörün daha fazla ısıl enerji absorbe edebilmesi yatmaktadır. Artan temas yüzeyi, kolektör yüzeyine düşen güneş ışınımının daha etkin şekilde yakalanmasını ve akışkana iletilen ısıl enerjinin yükselmesini sağlamıştır.

Plaka uygulaması, düzlemsel güneş kolektörlerinde ortalama termal verim değerlerinin artmasına doğrudan katkıda bulunmuştur. Benzer geometrik ve yapısal özelliklere sahip iki düzlemsel kolektörden yalnızca birine plaka eklenmesiyle elde edilen pozitif performans farkı, bu yapısal iyileştirmenin sistem verimliliği üzerindeki etkisini açıkça gözler önüne sermektedir. Bu sonuçlar, kolektör tasarımında plaka entegrasyonunun, termal performansı artırmak amacıyla dikkate alınması gereken önemli bir tasarım kriteri olduğunu göstermektedir.

7.3. Termal Boyalı Düzlemsel Güneş Kolektörleri

Plakalı ve plakasız düzlemsel güneş kolektörleri, yalnızca termal boya ile kaplanarak vakum ortamında test edilmiş ve elde edilen veriler, kaplama malzemesinin sistem performansına etkisini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir. Termal boya uygulaması, güneş ışınımının yüzey tarafından absorbe edilmesini sağlayarak kolektörlerin temel ısıl verimliliği hakkında bilgi sunmuştur.

Yalnızca termal boya kullanılarak gerçekleştirilen bu testler, deneysel analiz sürecinde bir referans noktası oluşturması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sayede, nano partikül katkısı gibi diğer parametrelerin etkisinin objektif biçimde karşılaştırılabilmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu yaklaşım, deneysel sonuçların yorumlanmasında temel alınacak bir kıyaslama zemini oluşturarak, sistematik ve sağlıklı performans analizlerinin yapılabilmesine olanak sağlamıştır.

7.4. Nano Partikül ve Termal Boya Kaplamalı Düzlemsel Güneş Kolektörleri

Çalışmanın devamında hem plakalı hem de plakasız düzlemsel güneş kolektörleri, $ZnFe_2O_4$ (çinko ferrit) nano partikül katkılı termal boya ile kaplanarak, daha önceki test koşullarıyla aynı şekilde vakum ortamında deneysel olarak test edilmiştir. Bu uygulama ile nano partikül katkısının, düzlemsel güneş kolektörlerinin termal performansı üzerindeki etkisi sistematik olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen veriler, nano partikül destekli kaplamaların, kolektörlerin güneş ışınımını absorbe etme kapasitesini artırarak ısı transfer verimliliğini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Bu bulgular, nano malzemelerin yüzey özellikleri üzerindeki iyileştirici etkisini doğrulamakta ve özellikle plaka kullanılan sistemlerde performans artışının daha belirgin hale geldiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 7.5. Düzlemsel güneş kolektörlerinin performans karşılaştırması

Kolektör Çeşitleri	Ortalama Verim Değerleri	Performans Artışı (%)
Termal Boya Kaplamalı Plakasız Düzlemsel Güneş Kolektörü	0,57	%13,21
Nano Partikül ve Termal Boya Kaplamalı Plakasız Düzlemsel Güneş Kolektörü	0,64	
Termal Boya Kaplamalı Plakalı Düzlemsel Güneş Kolektörü	0,66	%19,58
Nano Partikül ve Termal Boya Kaplamalı Plakalı Düzlemsel Güneş Kolektörü	0,78	

Düzlemsel güneş kolektörlerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, nano partikül katkılı termal boya kaplamalarının, yalnızca termal boya kaplamalarına kıyasla daha yüksek termal verim sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle plakasız düzlemsel güneş kolektörlerinde, $ZnFe_2O_4$ nano partikülü içeren kaplama uygulaması ile ortalama %13,21 oranında bir performans artışı elde edilmiştir. Bu artış, nano partiküllerin yüzey alanını artırıcı etkisinin ve yüksek ısı iletkenliğinin sistem verimliliğini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Benzer şekilde, plakalı düzlemsel güneş kolektörlerinde de nano partikül katkılı kaplama uygulaması ile anlamlı bir verim artışı sağlanmış; tüm debi aralıkları dikkate alındığında ortalama %19,58 oranında bir performans iyileşmesi hesaplanmıştır. Her iki kolektör tipine ait bu oranlar, 0,3 L/dk, 0,4 L/dk ve 0,5 L/dk debi değerleri için ayrı ayrı hesaplanmış ve ardından genel ortalama verim artışları olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar, nano partikül katkılı kaplama uygulamasının hem plakalı hem de plakasız sistemlerde ısıl performansı artıran etkin bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Düzlemsel güneş kolektörlerinde, emici plaka kullanımının performans üzerinde olumlu bir etkisi olduğu gibi, kullanılan kaplama materyalinin de termal verim üzerinde belirgin bir pozitif katkısı gözlemlenmiştir. Özellikle bu deney düzeneğinde tercih edilen çinko ferrit

($ZnFe_2O_4$) nano partikülleri, bakır borular ile güneş ışınları arasındaki ısı transfer yüzey alanını artırarak kolektörün ısıl performansını iyileştirmiştir. Bu nedenle, deney süresi boyunca nano partikül ve termal boya kaplamasına sahip kolektörlerde, akışkanın çıkış sıcaklık değerleri, yalnızca termal boya kaplamalı kolektörlere kıyasla daha yüksek seviyelerde ölçülmüştür. Bu durum, nano partiküllerin kaplama yüzeyinde sağladığı termal iletkenlik ve genişletilmiş yüzey alanı sayesinde ısı transferinin optimize edildiğini göstermektedir.

Kullandığımız deney düzeneğinde dikkat edilmesi gereken önemli değerlerden birisi de akışkanların çıkış sıcaklıklarıdır. Bu değeri önemli yapan en kritik nokta deney düzeneğinin kapalı bir sistem olmasıdır. Akışkanın düzlemsel güneş kolektörlerine giriş sıcaklıkları aynıdır. Termokupllarda çok küçük sapmalar olabileceği göz ardı edilmemelidir. Aynı debi değerlerinde akışkanların düzlemsel güneş kolektörlerinden hangi miktarda ısı enerjisi çektiklerini gözlemek adına dikkat edilmesi gerekir. Giriş çıkış sıcaklık farkı arttıkça termal verim matematiksel olarak artmaktadır.

Plakalı düzlemsel güneş kolektörleri, akışkan ile güneş enerjisi arasındaki ısı transfer hızını artırması nedeniyle, kullanılan kaplama materyalinden bağımsız olarak, plakasız düzlemsel güneş kolektörüne kıyasla daha yüksek performans sergilemektedir.

Literatürde yer alan çalışmalarda da belirtildiği üzere, nano partiküllerin kullanımı ısı transfer mekanizmalarında belirgin bir performans artışına yol açmaktadır. Mevcut deneysel çalışmada da benzer şekilde, nano partikül katkılı kaplamaların düzlemsel güneş kolektörlerinin termal verimliliğini olumlu yönde etkilediği ve ısı transfer sürecini iyileştirdiği açıkça gözlemlenmiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde güneş kolektörleri, ısıl enerji depolama alanında avantajlı ve ekonomik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, deney düzeneğinde bulunan plakasız ve plakalı düzlemsel güneş kolektörlerinin karşılaştırılması, kolektör tasarım parametrelerinin termal verim performansı üzerindeki etkilerine dair önemli bulgular sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, düzlemsel güneş kolektörlerinde temas yüzey alanının artırılmasının termal verim üzerinde pozitif bir katkı sağladığını göstermiştir.

Ayrıca, kaplama materyali olarak yalnızca termal boya ile $ZnFe_2O_4$ (Çinko Ferrit) nano partikül katkılı termal boya kullanımı karşılaştırılmış ve bu kapsamda kaplama malzemesinin kolektörlerin termal verimliliği üzerindeki etkisi detaylı şekilde incelenmiştir. Elde edilen veriler, kaplama materyalinin düzlemsel güneş kolektörlerinin termal performansını anlamlı biçimde değiştirdiğine işaret etmektedir.

Deneyler, 0,3 L/dk, 0,4 L/dk ve 0,5 L/dk olmak üzere üç farklı debi değerinde gerçekleştirilmiş ve toplanan veriler, termodinamik ve akışkanlar mekaniği prensipleri doğrultusunda analiz edilmiştir. Termal verim değerleri, karşılaştırma ve yorumlama kolaylığı sağlamak amacıyla ortalamalar şeklinde hesaplanarak çizelgelerde sunulmuştur.

Mevcut deneysel çalışmanın ortaya koyduğu temel bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Deney düzeneğinde, termal boya ile kaplanmış plakalı düzlemsel güneş kolektörü, tüm incelenen debi değerlerinde (0,3 L/dk, 0,4 L/dk, 0,5 L/dk) plakasız düzlemsel güneş kolektörüne kıyasla daha yüksek termal verim sağlamıştır.
- Termal boya kaplamalı düzlemsel güneş kolektörlerinde en belirgin performans artışı, 0,5 L/dk debi seviyesinde gözlemlenmiş olup, plakalı kolektör bu debide plakasız kolektöre göre %21,05 oranında termal verim artışı göstermiştir.
- Bu sonuç, debi arttıkça termal boya ile kaplanmış plakalı kolektörlerin verim artışının daha da belirginleşeceğine işaret etmektedir.
- Nano partikül katkılı termal boya ile kaplanan plakalı ve plakasız düzlemsel güneş kolektörleri karşılaştırıldığında, plakalı kolektörlerin tüm debi aralıklarında daha yüksek termal verim değerleri sergilediği tespit edilmiştir.

- Plakalı düzlemsel güneş kolektöründe en yüksek termal verim artışı 0,4 L/dk debi seviyesinde gözlemlenmiş ve bu değer yaklaşık %33,58 olarak hesaplanmıştır.
- Termal boya kaplama ile nano partikül destekli termal boya kaplama karşılaştırıldığında, plakasız düzlemsel güneş kolektörlerinde nano partikül katkılı kaplamanın termal boya kaplamaya kıyasla %13,21 oranında daha yüksek verim sağladığı belirlenmiştir.
- Benzer şekilde, plakalı düzlemsel güneş kolektörlerinde nano partikül katkılı termal boya kaplaması, yalnızca termal boya kaplamaya göre yaklaşık %19,58 oranında performans artışı sağlamıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında, düzlemsel güneş kolektörlerinde nano partikül katkılı termal boya kaplamalarının uygulanabilirliği başarıyla test edilmiştir. Elde edilen bulgular, nano partikül içeren kaplama materyallerinin, kolektörlerin termal verimliliğini anlamlı ölçüde artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Mevcut deney düzeneği ve parametreleri üzerinde yapılabilecek değişikliklerle deneysel çalışmaların kapsamı genişletilerek farklı etkiler incelenebilir. Bu bağlamda aşağıdaki öneriler doğrultusunda yeni deneyler gerçekleştirilebilir:

- Debi değerleri farklı seviyelerde değiştirilerek, akışkan debisinin termal verim üzerindeki etkileri daha ayrıntılı şekilde gözlemlenebilir ve performans optimizasyonu sağlanabilir.
- Güneşlenme süresinin daha uzun olduğu farklı coğrafi konumlarda deneyler tekrarlanarak, kolektörlerin değişen çevresel koşullardaki termal verimlilikleri karşılaştırılabilir.
- Deney düzeneğinde kullanılan düzlemsel güneş kolektörlerinin boyutları değiştirilerek, kolektör büyüklüğünün ısıl performans üzerindeki etkisi analiz edilebilir.
- Kaplama materyalleri çeşitlendirilerek, farklı nano partikül türleri ve kompozit kaplamaların termal verim performansına katkıları değerlendirilebilir.
- Güneş kolektörlerinin tipi değiştirilerek (örneğin, vakumlu tüplü, CPC tipi gibi), farklı kolektör tasarımlarının termal verimlilikleri karşılaştırmalı olarak incelenebilir.

Nano partikül kaplaması uygulanmış güneş kolektörlerinin uzun süreli performans testleri gerçekleştirilerek, sistemin çevresel koşullara karşı dayanıklılığı ve tepkileri kapsamlı

şekilde incelenebilir. Bu tür dayanıklılık analizleri, kaplama materyallerinin zamanla değişim göstermesi, aşınma ve çevresel etkilere karşı direnç gibi önemli parametrelerin değerlendirilmesini sağlar. Ayrıca, elde edilen veriler ışığında maliyet analizleri yapılarak, nano partikül kaplama süreçlerinin ekonomik verimliliği ve uygulanabilirliği daha iyi ortaya konabilir. Bu sayede, güneş kolektörlerinde nano partikül kaplama teknikleri çeşitlendirilip optimize edilerek hem performans hem de maliyet açısından daha etkin çözümler geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Güneş Enerjisi URL: https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes, Son Erişim Tarihi: 07.07.2025.

2. Kahramanca, A. (2024). *Türkiye'de elektrik talebinin karşılanmasında güneş enerjisinin rolü ve güneş enerjisinin kullanımındaki yapısal sorunların incelenmesi*, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

3. İnternet: Güneş Kolektörleri URL: https://www.piagrid.com/rehber/gunes-kollektorleri, Son Erişim Tarihi: 07.07.2025.

4. Duffie, J. A., ve Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering Of Thermal Processes* (Dördüncü Baskı). New Jersey: Wiley , 236-319.

5. İnternet: Düzlemsel Güneş Kolektörleri URL: https://www.tesisat.org/duz-yuzeyli-gunes-enerjisi-kollektorleri.html, son erişim tarihi: 07.07.2025

6. Kim, Y., ve Seo, T. (2007). Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube. *Renewable Energy*, 32(5), 772-795.

7. İnternet: Vakum Tüplü Güneş Kolektörleri URL: https://www.guneysangunesenerjisi.com.tr/?pnum=15&pt=Vakum+T%C3%BCpl%C3%BC+G%C3%BCne%C5%9F+Enerji+Sistemleri, Son Erişim Tarihi: 07.07.2025.

8. Winston, R., Miñano, J. C., ve Benitez, P. G. (2005). *Nonimaging optics* (Birinci Baskı). California: Elsevier Academic Press, 50-55.

9. Tian, Z., Zhang, S., Deng, J., Fan, J., Huang, J., Kong, W., ... ve Furbo, S. (2019). Large-scale solar district heating plants in Danish smart thermal grid: Developments and recent trends. *Energy Conversion And Management*, 189, 67-80.

10. Price, H., Lu¨ pfert, E., Kearney, D., Zarza, E., Cohen, G., Gee, R., ve Mahoney, R. (2002). Advances in parabolic trough solar power technology. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(2), 109-125.

11. İnternet: CSP Güneş Kolektörleri URL: https://ideal-makina.com/konsantre-gunes-enerji-sistemleri/, Son Erişim Tarihi: 07.07.2025.

12. Kincaid, N., Mungas, G., Kramer, N., Wagner, M., ve Zhu, G. (2018). An optical performance comparison of three concentrating solar power collector designs in linear Fresnel, parabolic trough, and central receiver. *Applied Energy*, 231, 1109-1121.

13. İnternet: Lineer Fresnel Güneş Kolektörleri URL: https://resn.nit.ac.ir/en/page/986/linear-fresnel-reflector-lfr-, Son Erişim Tarihi: 07.07.2025.

14. Mancini, T., Heller, P., Butler, B., Osborn, B., Schiel, W., Goldberg, V., ... ve Moreno, J. (2003). Dish-Stirling systems: An overview of development and status. *J. Sol. Energy Eng.*, 125(2), 135-151.

15. İnternet: Güneş Enerji Teknolojileri URL: https://enginmuh.com/gunes%20enerji.html, Son Erişim Tarihi: 07.07.2025.

16. Chow, T. T., Fong, K. F., Pei, G., Ji, J., ve He, M. (2010). Potential use of photovoltaic-integrated solar heat pump system in Hong Kong. *Applied Thermal Engineering*, 30(8-9), 1066-1072.

17. İnternet: Hibrit PV-T Güneş Kolektörler URL: https://deepresource.wordpress.com/2015/07/25/hybrid-solar/, Son Erişim Tarihi: 07.07.2025.

18. İnternet: Nano partikül Özellikleri URL: https://shop.nanografi.com.tr/blografi/nanopartikuller-ozellikleri-ve-uygulama-alanlari/, Son Erişim Tarihi: 07.07.2025.

19. Singh, A. P., Tiwari, S., Sinhmar, H., Sahdev, R. K., ve Tripathi, S. (2025). Enhancing solar drying performance with heat storage technologies and nanoparticles integration: A clean energy production. *Journal of Energy Storage*, 105, 114669.

20. Gürmen, S., Ebin, B. (2008). Nanopartiküller ve üretim yöntemleri-1. *Metalurji Dergisi*, 150, 31-38.

21. Salih, S. J., ve Mahmood, W. M. (2023). Review on magnetic spinel ferrite (MFe2O4) nanoparticles: From synthesis to application. *Heliyon*, 9(6), e16601.

22. İnternet: Çinko Ferrit Özellikleri URL: https://shop.nanografi.com.tr/cinko-demir-oksit-znfe2o4-nano-tozu-safl-k-98-7-boyut-8-28-nm/, son erişim tarihi: 07.07.2025.

23. İnternet: Çinko Ferrit URL: https://www.nanoshel.com/product/zinc-ferrite-nanoparticles, Son Erişim Tarihi: 07.07.2025.

24. Bharathiraja, R., Ramkumar, T., Karthick, L., ve Mohanraj, M. (2024). Performance investigation on flat plate solar water collector using a hybrid nano-enhanced phase change material (PCM). *Journal of Energy Storage*, 86, 111163.

25. Gürbüz, E. Y., Şahinkesen, İ., Kusun, B., Tuncer, A. D., ve Keçebaş, A. (2023). Enhancing the performance of an unglazed solar air collector using mesh tubes and Fe3O4 nano-enhanced absorber coating. *Energy*, 277, 127704.

26. Öztürk, M., Yüksel, C., ve Çiftçi, E. (2024). Energy, exergy and sustainability analysis of a photovoltaic-thermal solar system with nano-enhancement and thermal energy storage integration. *Process Safety and Environmental Protection*, 187, 593-604.

27. Pustovalov, V. K. (2025). Solid nanostructured materials and solar collectors for efficient absorption of intense solar radiation and theır application. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 65, 101404.

28. Nawsud, Z. A., Altouni, A., Akhijahani, H. S., ve Kargarsharifabad, H. (2022). A comprehensive review on the use of nano-fluids and nano-PCM in parabolic trough solar collectors (PTC). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101889.

29. Kulkarni, S., Tiwari, J., Varma, B. S., ve Panthangi, R. K. (2023). Study of various base materials with zinc and nano particle coatings. *Materials Today: Proceedings*.

30. Sathish, T. (2025). Thermal performance assessment by cerium oxide nano-enhanced coating on evacuated tube solar collector absorber tubes. *Results in Engineering*, 25, 104396.

31. Rahman, S., Issa, S., Said, Z., ve Hachicha, A. A. (2025). Techno-economic and life cycle analysis of a nano-enhanced flat plate solar collector for improved thermal performance. *Energy Nexus*, 18, 100433.

32. Thakur, V. K., ve Gaur, M. K. (2021). Heat and mass transfer analysis of passive solar still with nanoparticles, operating at different water depth and various slope of glass cover. *Desalination and Water Treatment*, 235, 1-25.

33. Karimzadehkhouei, M., Shojaeian, M., Şendur, K., Mengüç, M. P., ve Koşar, A. (2017). The effect of nanoparticle type and nanoparticle mass fraction on heat transfer enhancement in pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *109*, 157-166.

34. Zaraki, A., Ghalambaz, M., Chamkha, A. J. ve De Rossi, D. (2015). Theoretical analysis of natural convection boundary layer heat and mass transfer of nanofluids: Effects of size, shape and type of nanoparticles, type of base fluid and working temperature. *Advanced Powder Technology*, 26(3), 935–946.

35. Arshad, A., Jabbal, M. ve Yan, Y. (2025). Enhanced heat transfer of PCM-based heat sink augmented with plate-fins and hybrid nanoparticles for electronics cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 218, 110107.

36. Mousazadeh, M., Emami, M. R. S. ve Afsari, K. (2025). Experimental assessment of $MnCoFeO_4@H_2O$ nanofluid stability and its impact on heat transfer enhancement in a double pipe heat exchanger. *Results in Engineering,* 27, 106022.

37. Jayanthi, N., Venkatesh, M., Suresh Kumar, R., ve Ramesh Babu, S. (2025). Experimental evaluation of CuO and Al2O3 nanofluids for enhanced heat transfer in evacuated tube heat pipe solar collectors. *Results in Engineering*, 106299.

38. Zhang, L., Qu, P., Jing, Y., Yao, X., Wang, W. ve Shi, C. (2022) Mechanism analysis of the influence of nanoparticles on the convective heat transfer coefficient of traditional fluids. *Materials Today Communications*, 32, 104091.

39. Liu, Y., Sun, L., Zheng, J. N., Yang, L., Jiang, L. ve Song, Y. (2023). Numerical simulation study of the phase transition heat transfer of nanoparticle-enhanced heat storage tubes. *Applied Thermal Engineering*, 231, 121010.



Gazili olmak ayrıcalıktır