

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

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

**U-TÜP GÜNEŞ KOLLEKTÖRÜNÜN ÇEŞİTLİ NANOAKIŞKANLAR  
KULLANILMASI DURUMUNDA ISIL PERFORMANSININ TEORİK  
OLARAK İNCELENMESİ**

**Erdal YILDIRIM**

**Danışman  
Doç. Dr. Ali YURDDAŞ**



**MANİSA-2021**

## **TAAHHÜTNAME**

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

**Erdal YILDIRIM**



# İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	III
TABLO DİZİNİ .....	IV
TEŞEKKÜR .....	V
ÖZET.....	VI
ABSTRACT .....	VIII
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	8
2.1. Güneş Kollektörleri .....	8
2.1.1. Vakum Tüplü Güneş Kollektörleri.....	8
2.1.1.1. Isı Borulu Vakum Tüplü Güneş Kolektörleri.....	9
2.1.1.2. Bir Ucu Açık Vakum Tüplü Güneş Kollektörleri .....	10
2.1.1.3. U-Tüp Güneş Kollektörleri .....	11
2.1.2. Düzlemsel Güneş Kollektörleri .....	12
2.1.3. Bileşik Depolamalı Kollektörler .....	13
2.1.4. Yoğunlaştırıcı Tip Güneş Kollektörleri.....	14
2.2. Nanoakışkanlar .....	14
2.3. Sonlu Hacimler Metodu .....	16
2.4. Çalışmanın Amacı .....	17
3. ISIL MODELLEME .....	19
3.1. Model Açıklaması .....	19
3.2. Ağ Analizi ve Yapısı .....	22
3.3. Başlangıç ve Sınır Şartları.....	23
3.4. Korunum Denklemleri.....	25
3.5. Nanoakışkan Modellemesi .....	26
4. MODEL DOĞRULAMA.....	29
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	33
6. SONUÇLAR .....	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ .....	61

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

HAD Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	$\beta$	Isıl Genleşme Katsayısı (1/K)	
SHM Sonlu Hacimler Metodu	$\rho_0$	Akışkanın Yoğunluğu	
$c$	Özgül Isı (J/kg°C)	$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$g$	Yerçekimi İvmesi (m/s <sup>2</sup> )	$\varphi$	Nanopartikül Hacimsel Oran
$k$	Isı İletim Katsayısı (W/m°C)	$\nu$	Kinematik Viskozite (m <sup>2</sup> /s)
$P$	Basınç (Pa)	$\mu$	Dinamik Viskozite (Pa.s)
$T$	Sıcaklık (°C)	$A_c$	Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> )
$T_{in}$	Tank Giriş Sıcaklığı (°C)	$u_x, u_y, u_z$	Hız Bileşenleri, m/s
$T_{out}$	Tank Çıkış Sıcaklığı (°C)	<b>Alt İndisler</b>	
$T_0$	Akışkan İlk Sıcaklığı (°C)	$f$	Akışkan
$T_{env}$	Çevre Sıcaklığı (°C)	$nf$	Nanoakışkan
$q$	Sabit Isı Akısı (W/m <sup>2</sup> )	$s$	Nanopartikül
$D^*$	Boyutsuzlaştırılmış Tüp Çapı	$BA$	Boussinesq Yaklaşımı
$L^*$	Boyutsuz Manifold Uzunluğu	$VPT$	Sıcaklıkla Özelliklerin Değişimi
$\alpha$	Kollektörün Eğim Açısı	$exp.$	Deneysel
$G$	Toplam Güneş Işınımı (W/m <sup>2</sup> )		

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Vakum Tüplü Güneş Kollektörünün Görünüş ve Kısımları .....	8
Şekil 2.2: Vakum Tüplü Güneş Kollektörün Çalışma Prensibi.....	9
Şekil 2.3: Isı Borulu Vakum Tüplü Güneş Kollektörün Kesiti .....	10
Şekil 2.4: Bir Ucu Açık Vakum Tüplü Güneş Kollektörü.....	10
Şekil 2.5: U-Tüp Güneş Kollektörü Şeması .....	11
Şekil 2.6. U-Tüp Vakum Tüplü Güneş Kollektörü.....	12
Şekil 2.7. Düzlemsel Plakalı Güneş Kolektörü.....	13
Şekil 2.8. Tank Tipi Bileşik Depolamalı Kollektör .....	14
Şekil 3.1: Sistemin Geometrik Ölçülendirilmesi.....	19
Şekil 3.2: U-Tüp Güneş Kollektörü Modeli .....	21
Şekil 3.3: Ağ Yapısı.....	23
Şekil 3.4: U-Tüp Güneş Kollektörünün Isı ve Kütle Akışı .....	24
Şekil 3.5: Sınır Şartları .....	25
Şekil 4.1: ETSC Verimliliği .....	31
Şekil 4.2: Deneysel Sonuçlar ile Doğrulama.....	31
Şekil 4.3: Deneysel ve Nümerik Sonuçlar ile Karşılaştırma .....	32
Şekil 5.1: Nanoakışkan Tiplerinin Isıl Performansa Etkisi. ....	35
Şekil 5.2: Farklı Isı Akılarına Göre Nanoakışkan Türlerinin Sıcaklık Artışına Etkileri .....	36
Şekil 5.3: Farklı Isı Akılarına ve Akış Debilerine Göre Çıkış Sıcaklıkları. ....	36
Şekil 5.4: Manifold çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı ( $3330\text{W}/\text{m}^2$ , $0.025\text{kg}/\text{s}$ ) .....	38
Şekil 5.5: Manifold çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı ( $0.03\text{SiO}_2+0.02\text{Cu}$ , $0.025\text{kg}/\text{s}$ ) ..	38
Şekil 5.6: Manifold çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı ( $0.02\text{SiO}_2+0.03\text{Cu}$ , $3700\text{W}/\text{m}^2$ ). 38	
Şekil 5.7: Manifold çıkış yüzeyi streamline ( $3330\text{W}/\text{m}^2$ , $0.025\text{kg}/\text{s}$ ).....	39
Şekil 5.8: Manifold çıkış yüzeyi streamline ( $0.03\text{SiO}_2+0.02\text{Cu}$ , $0.025\text{kg}/\text{s}$ ) .....	39
Şekil 5.9: Manifold çıkış yüzeyi streamline ( $0.02\text{SiO}_2+0.03\text{Cu}$ , $3700\text{W}/\text{m}^2$ ).....	40
Şekil 5.10: U-Tüp Kollektör Sıcaklık Dağılımı.....	41
Şekil 5.11: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Akışkana Göre Sıcaklık Profili .....	43
Şekil 5.12: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Akışkana Göre Hız Profili 43	
Şekil 5.13: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Tüplere Göre Sıcaklık Profili .....	44
Şekil 5.14: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Tüplere Göre Hız Profili ..	44
Şekil 5.15: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Debiye Göre Sıcaklık Profili .....	45
Şekil 5.16: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Debiye Göre Hız Profili ...	45
Şekil 5.17: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Isı Akısına Göre Sıcaklık Profili .....	46
Şekil 5.18: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Isı Akısına Göre Hız Profili .....	46
Şekil 5.19: Çıkış Manifoldu Boyunca Akışkana Göre Sıcaklık Profili.....	48
Şekil 5.20: Çıkış Manifoldu Boyunca Akışkana Göre Hız Profili .....	48
Şekil 5.21: Çıkış Manifoldu Boyunca Kütleli Debiye Göre Sıcaklık Profili .....	49
Şekil 5.22: Çıkış Manifoldu Boyunca Kütleli Debiye Göre Hız Profili.....	49
Şekil 5.23: Çıkış Manifoldu Boyunca Isı Akısına Göre Sıcaklık Profili.....	50
Şekil 5.24: Çıkış Manifoldu Boyunca Isı Akısına Göre Hız Profili .....	50

## TABLO DİZİNİ

<b>Tablo 3.1:</b> U-Tüp Güneş Kollektörünün Özellikleri .....	20
<b>Tablo 3.2:</b> Ağ Analizi.....	22
<b>Tablo 3.3:</b> Nanoakışkan Termofiziksel Özellik Denklemleri .....	27
<b>Tablo 3.4:</b> Temel Akışkan ve Nanopartiküllerin Termofiziksel Özellikleri .....	28
<b>Tablo 3.5:</b> Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri.....	28
<b>Tablo 4.1:</b> Çevresel ve Başlangıç Koşulları .....	30
<b>Tablo 4.2:</b> Çalışmanın Doğrulanması.....	30
<b>Tablo 5.1:</b> Manifold Çıkış Sıcaklıkları (Debi: 0.025kg/s) .....	33



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam öncelikle şanlı tarihe sahip olan yüce Türk milletine, vatan savunmasında bir an bile tereddüt etmeden aileden, yardan, serdengeen şehitlerimiz ve gazilerimize ithaf olunur...

Yüksek lisans yapmam konusunda beni cesaretlendiren ve tez çalışmalarımın yürütülmesinde desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Ali YURDDAŞ hocama, yoğun iŐ temposu ve çalışmalarımı hoşgörüyle karşılayan sevgili aileme, yüksek lisans sürecinde maddi ve manevi destek veren büyüğüm, abim Alięa Belediye Başkanı Serkan ACAR'a, iŐ arkadaşlarım ve dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Erdal YILDIRIM

Manisa, 2021

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### U-TÜP GÜNEŞ KOLLEKTÖRÜNÜN ÇEŞİTLİ NANOAKIŞKANLAR KULLANILMASI DURUMUNDA ISIL PERFORMANSININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Erdal YILDIRIM

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali YURDDAŞ

Güneş enerji sistemleri dünyamızda enerjinin büyük kısmını harcadığımız su ısıtmada büyük bir öneme sahiptir. U-tüplü güneş kolektörlerinin su ısıtmada güneş enerjili sistemler arasında oldukça önemli bir yeri vardır. Su ısıtmada kullanılan yoğun enerjinin çevre dostu bu tip güneş enerjili sistemler ile karşılanması daha temiz bir doğa için CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltacaktır. Bu sebeple; vakum tüplü güneş kolektör sistemlerinden U-tüplü bütün bir sistemin ısı performansını değerlendirilmiştir. İçerisinde 10 adet U-tüp barındıran sistemin, farklı iş akışkanları bulundurması ve farklı ısı akıları ile debiler dikkate alınarak ısı transfer kabiliyeti incelenmiştir. Bu inceleme için sonlu hacimler metodu kullanılmıştır. Model, deneysel ve nümerik birçok çalışma ile doğrulanmıştır. Ele alınan sistem, 30° eğimli 10 adet vakum U-tüp ve bu tüplere bağlı bulunan manifoldların içerisinde iş akışkanı olarak su ve nanoakışkanlar (SiO<sub>2</sub> - Cu) kullanılmıştır. İş akışkanında modellenen nanopartiküller farklı hacimsel oranlarda hibrit ve mono olarak ele alınmıştır. Sistemin ısı ve hidrodinamik davranışları Boussinesq Yaklaşımı dikkate alınarak incelenmiş ve sistem çıkış sıcaklıkları hesaplanmıştır. Yapılan analizler ve karşılaştırmalar neticesinde nanoakışkan kullanımının ısı kabiliyeti ele alınan sistemde iyileştirdiği görülmüştür. Bu iyileşmenin suya göre yaklaşık %15'lere kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Hibrit nanoakışkan kullanımı ile birçok sistemde karşılaşılan çökeltme sorununun da önüne geçilebilmesi açısından Cu nanopartikülüne göre daha hafif olan SiO<sub>2</sub> nanopartikülü kullanımının ısı etkileri



görülmüştür. Böylece hacimsel olarak daha fazla Cu nanopartikülü kullanmak yerine hibrit olarak SiO<sub>2</sub> nanopartikülü ile birlikte daha düşük miktarlarda kullanılması hem çökelme sorununu ortadan kaldırır hem de iş akışkanının ısıl kabiliyetini iyileştirir.

**Anahtar Kelimeler:** U-Tüplü Güneş Kollektörü, Nanoakışkan, Hibrit, Boussinesq Yaklaşımı

**2021, 61 sayfa**



## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **THE THEORETICAL INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF THE U-TUBE SOLAR COLLECTOR USING VARIOUS NANOFLUIDS**

**Erdal YILDIRIM**

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

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali YURDDAŞ**

Solar energy systems are of great importance for water heating, where we spend most of the energy in our world. U-tube solar collectors have a very important place in water heating among solar energy systems. Compensation of the intense energy used for water heating by this type of environmentally friendly solar energy system, will reduce CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> emissions for a cleaner nature. Therefore; The thermal performance of a U-tube complete system from evacuated tube solar collector (ETSC) systems was assessed. The heat transfer capability of the system, which contains 10 U-tubes, has been examined by considering the fact that it has different work fluids and different heat fluxes and flow rates. The finite volume method is used for this analysis. The model has been verified by many experimental and numerical studies. In the system under consideration has been used 10 vacuum U-tubes inclined at 30°, and water and nanofluidic (SiO<sub>2</sub> - Cu) which were used as working fluid in the manifolds connected to these tubes. Nanoparticles modeled in the work fluid are considered as hybrid and mono at different volume fractions. The thermal and hydrodynamic behaviors of the system have been examined by taking into account the Boussinesq Approach, and the system outlet temperatures have been calculated. As a result of analyzes and comparisons made, it has been seen that the use of nanofluid improves the thermal capability of the system under consideration. It has been determined that this improvement reaches up to 15% compared to water. The thermal effects of using SiO<sub>2</sub> nanoparticles, which are lighter than Cu nanoparticles, were observed in terms of the precipitation problem encountered in many systems when using hybrid nanofluids. Thus, instead of using more Cu

nanoparticles in volume, using smaller amounts together with SiO<sub>2</sub> nanoparticles as a hybrid both eliminates the problem of precipitation and improves the heat capability of the work fluid.

**Keywords:** U-Tube Solar Collectors, Nanofluid, Hybrid, Boussinesq Approximation

**2021, 61 pages**



## 1. GİRİŞ

Kullanım suyunu ısıtmak için yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi sistemleri ekonomik olmaları sebebiyle yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan kolektörlerden vakum tüplü güneş kolektörleri; (a) U-tüplü vakum güneş kolektörü (b) Bir ucu açık vakum tüplü güneş kolektörü ve (c) Isı borulu vakum tüplü güneş kolektörü olarak sınıflandırılmaktadır.

Vakum tüplü güneş kolektör sistemlerinden su ısıtma ihtiyacı için genellikle konutlarda kullanılan U-tüplü vakum güneş kolektörü sistemlerinin ısıl kabiliyetini arttırmak amacıyla deneysel ve nümerik olarak birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır.

Başta konutlar olmak üzere birçok alanda kullanılan güneş enerji su ısıtma sistemleri faydalı olduklarından ve kirletici herhangi bir etkileri olmadığından dolayı araştırmacıların oldukça ilgisini çekmiştir. Genellikle ısıtma amaçlı kullanılan bir güneş enerji sistemi olan vakum tüplü kolektör üzerine yapılan çalışmalar 1970'li yıllara kadar dayanmaktadır. Ancak vakum tüplü güneş kolektörleri çeşitlerinden önemli bir yere sahip olan U-tüp güneş kolektörleri üzerine çalışmalar son yılların konularındandır. Sistemin performansını incelemek amacıyla genellikle deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu sistemlerde iş akışkanı olarak genellikle su kullanılmaktadır, soğuk mevsimlerde suya ilave olarak antifrizde kullanılabilir. Bu alanda nümerik çalışmalar henüz oldukça azdır. Bu nümerik çalışmalarda modeller basitleştirilerek yani tek bir U-boru üzerinden yapılmıştır.

Morrison et al. [1,2] ve Sakhrieh ve Al-Ghandoor [3] vakum tüplü ve düzlemsel olmak üzere beş farklı güneş kolektörler türünü karşılaştırmışlardır. Ele aldıkları güneş kolektörlerinin ısıl performanslarını birbirleri ile kıyaslamışlardır. Neeraj ve Avadesh [4], radyasyon miktarı, akış hızı ve çevre ortam sıcaklığının U-tüplü güneş kolektörünün performansına etkilerini deneysel olarak incelemiştir.

Naik ve arkadaşları [5], U-tüplü güneş kolektörünün termal performansını belirleyebilmek için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Badar ve arkadaşları [6], U-tüplü güneş kolektörü üzerinde ısı transfer katsayısının iş akışkanının sıcaklığı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla deneysel çalışmalar başlatmışlardır. Gao ve arkadaşları [7], iş akışkanı olarak su kullanan cam ve U-tüplü vakum güneş kolektörlerinin termal performansını karşılaştırmışlardır. Zorlanmış taşınımli güneş enerjili sıcak su sistemi üzerindeki akış hızının etkisini araştırmıştır. Rodriguez ve arkadaşları [8], U-tüplü bir güneş kolektörünün iş akışkanının çıkış sıcaklığını tespit edebilmek amacıyla yeni bir metodoloji geliştirmişlerdir. Farjallah ve arkadaşları [9], dolgu malzemeli ve dolgu malzemesi olarak bir U-tüplü güneş kolektör sisteminin termal performansını nümerik olarak incelemişlerdir. Dolgu malzemesi kullanılması durumunda daha iyi bir performans tespit etmişlerdir. Gao ve arkadaşları [10], U-tüplü güneş kolektör sisteminin sıcaklık dağılımını araştırmışlar ve termal verimliliğin ortam sıcaklığına ve U-tüplerin geometrik parametreleri ile ilişkisini incelemek için deneysel çalışma yapmışlardır. Vishal ve Avadesh [11], vakum tüplü güneş kolektöründe iş akışkanı olarak hava kullanılması durumunda sistem performansı üzerindeki etkileri gözlenmiş ve iş akışkanının basınç kaybı ve kütle debisinin etkilerini teorik olarak incelemişlerdir. Ayala ve arkadaşları [12], vakum tüplü güneş kolektörünü deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada elde ettikleri deneysel ve nümerik sonuçlar ile sistemin hidrodinamik durumunu ve termal performansı karşılaştırmışlardır. Liangdong ve arkadaşları [13], termal bir model geliştirerek, soğurucu kaplamanın boşaltılmış U-tüpün termal performansı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Gao ve arkadaşları [14] U-tüplü güneş enerjisi kolektörünün termal performansını tespit edebilmek için matematiksel bir model önermişler ve modellerini deneysel verilerle doğrulamışlardır. Kolektör parametrelerinin ısı performansına etkilerini de incelemişlerdir. Nie ve arkadaşları [15] U-tüplü cam borulu bir güneş kolektörünün termal incelemesi için deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. İş akışkanının ortam sıcaklığından daha düşük değerlerde olması koşulu altında çalışmalarını yaptıklarını belirtmişlerdir. Güneş destekli ısı pompası sistemlerinde U-tüp güneş kolektörünün uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Pawar ve Sobhansarbandi [16] ısı enerji depolama sistemlerinde ısı borulu vakum tüplü güneş kolektörünün CFD modellemesini yapmışlardır. Literatürdeki deneysel verilerle doğrulama yapmışlardır. Kabeel ve arkadaşları [17] hibrit depolama malzemeleri ve düşük

maliyetli silindirik parabolik yoğunlaştırıcılara sahip U-tüplü bir güneş kolektörünün deneysel çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Oluşturdukları sistemin farklı kaplama durumları için ısı değerlendirmelerini yapmışlardır. Korres ve arkadaşları [18] U-tüplü vakum güneş kolektörünün deneysel, analitik ve nümerik olarak incelemesini yapmışlardır. Nümerik çalışma doğrulamasını gerçekleştirmişler ve deneysel olarak gerçekleştiremedikleri ölçüm değerlerini nümerik olarak tespit etmişlerdir. Bu değerler içinde nümerik sonuçları analitik hesaplamalar ile doğrulamışlardır. Liang ve arkadaşları [19] vakum borular ile bakır U-tüpler arasındaki ısı direnç etkisini kaldırmak amacıyla içi dolu bir U-tüp kolektör tasarlamışlar ve sabit sınır koşulu altında ısı etkinliğini araştırmışlardır. Teorik olarak elde ettikleri sonuçlar deneysel elde ettikleri sonuçlardan daha yüksek bulunmuşlardır.

Mevcut ısı sistemlerinin etkinliğini arttırabilmek için kullanılan uygulamalardan biriside sistem içinde kullanılan iş akışkanı üzerindeki çalışmalardır. Özellikle son yıllarda birçok ısı sistemin etkinliğini arttırmak için bu çalışmalardan iş akışkanı tipinin nanoakışkan olarak kullanımı yaygınlaşmıştır. Nanoakışkan olarak adlandırılan ve ısı sistemlerinin genellikle performansını arttıran bu akışkan; nano boyutlardaki katı nanoparçacıkların temel akışkana dahil edilmesiyle oluşturulmuştur. Nano boyutlarda nanoparçacıkların temel akışkana ilave edilmesiyle birçok ısı sisteminin ısı performansında önemli miktarlarda artış elde edilmiştir. Bu ısı sistemleri arasında güneş kolektör sistemlerinden vakum tüplü güneş kolektörleri de yer almaktadır. Birçok araştırmacı vakum tüplü kolektörler üzerinde nanoakışkan etkisini deneysel ve nümerik olarak ele almıştır. Vakum tüplü kolektörler arasında özellikle U-tüplü kolektör için nanoakışkan kullanımı üzerine yapılmış çalışma çok daha az düzeyde ve ancak son yıllarda yeni yeni dikkate alınmaya başlanmıştır.

Ghaderian et al. [20] bir vakum tüplü güneş kolektör sistemini, doğal taşınım ile çalışması durumu ve iş akışkanı olarak CuO-H<sub>2</sub>O nanoakışkanı barındırması durumu için incelemiştir. Seçtikleri nanoakışkanın suya göre kolektör verimini arttırdığını ifade etmişlerdir. Dehaj and Mohiabadi [21], ısı borulu bir vakum tüplü güneş kolektörü içinde iş akışkanı olarak MgO-H<sub>2</sub>O nanoakışkanı olması durumunu suya göre deneysel olarak karşılaştırmışlardır. İş akışkanının

sistem içerisinde debisinin etkisini de incelemişlerdir. Bu incelemeleri sonucunda debi arttıkça ısı veriminin arttığını ve aynı zamanda MgO-H<sub>2</sub>O nanoakışkan kullanımının temel akışkan suya göre ısı performansı arttırdığını ifade etmişlerdir. Choi et al. [22] MWCNT-H<sub>2</sub>O nanoakışkanlı bir güneş kolektöründe iş akışkanı olarak kullanılmasının etkilerini deneysel olarak ele almışlardır. MWCNT-H<sub>2</sub>O nanoakışkanının kolektöre gelen güneş enerjisini yutma oranını arttırdığının sonucuna varmışlardır. Ghaderian ve Sidik [23] yatay bir tank içerisindeki bobinin ısı performansına etkisini vakum tüplü bir güneş kolektöründe Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanoakışkanının kullanılması durumu için deneysel olarak ele almışlardır. Nanoakışkan içerisinde barındırılan nanopartikül miktarındaki hacimsel artışın ısı performansı arttırdığı sonucuna varmışlardır. Yurddaş [24] bir ucu açık ve diğer ucu kapalı-yalıtımlı bir vakum tüplü güneş kolektör sistemini bütün olarak ele almış ve tank içerisinde bir ısı değiştiricisi tasarlamıştır. Bu ısı değiştiricisinin, tankın ve vakum tüplerin optimum geometrik değerlerini tespit edip, iş akışkanı olarak MWCNT, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> ve Cu nanopartiküllerini farklı hacimsel oranlarda barındıran nanoakışkanı ele almış ve CFD analizlerini gerçekleştirmiştir. Mahbubul et al. [25] SWCNT-H<sub>2</sub>O nanoakışkanı barındıran bir vakum tüplü güneş kolektöründe ısı veriminin etkisini araştırmışlardır ve sistemin veriminde ciddi oranda bir artış meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Natividade et al. [26] çok katmanlı grafen bazlı nanoakışkanın vakum tüplü güneş kolektör sisteminde değerlendirilmesi durumunda meydana gelecek etkileri deneysel bir çalışma ile sunmuşlardır. Ele aldıkları iş akışkanının ile sistemin ısı veriminde artış meydana gelmesini beklemişler ve nitekim sistemin ısı veriminde gayet iyi bir artış gözlemlemişlerdir. Sharafeldin ve Grof [27,28] ele aldıkları vakum tüplü güneş kolektörün sistemi nanoakışkan kullanılması durumunda performansın ne şekilde etkilendiğini deneysel çalışmışlardır. Çalışmalarının neticesinde nanoakışkan kullanılmasının ele aldıkları sistemde ısı performansı arttırdığını belirtmişlerdir. Mercan ve Yurddaş [29] Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O ve CuO-H<sub>2</sub>O nanoakışkanlarını iş akışkanı olarak vakum tüplü güneş kolektör için modellemişlerdir. 12, 24 ve 36 adet boru olması durumları için farklı debilere göre nümerik analiz yapmışlardır. Tong et al. [30] MWCNT nanopartiküllü su bazlı nanoakışkanlı U-tüp vakum tüplü güneş kolektör sistemini ele almışlardır. U tüplerde sabit bir ısı akısını ele almışlar ve bakır bir fin kullanmışlardır. Bunun yanı sıra U borulardaki hava boşluğunu bir sıvı ile doldurmak için yeni bir yol belirlemişlerdir. Bu yolla hava boşluğunun MWCNT nanopartiküllü su bazlı

nanoakışkan ile doldurulması sonucunda verimin %4 kadar arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca bu şekilde 50 güneş kolektörü kullanılması durumunda CO<sub>2</sub> ve SO<sub>2</sub> emisyonlarının sırasıyla 1600 kg ve 5,3 kg azalacağını belirtmişlerdir. Kaya ve arkadaşları [31], U-tüplü güneş kolektöründe iş akışkanı olarak nanoakışkan kullanılması durumunda ısı performans etkilerini incelemişlerdir. Nanoakışkan olarak ZnO/etilen glikol-H<sub>2</sub>O kullanılması durumunda iş akışkanı olarak hava yada su kullanımına göre daha iyi etki oluşturduğunu belirtmişlerdir. Kim ve arkadaşları [32] U-tüp güneş kolektöründe çeşitli nanoakışkan kullanımının etkilerini teorik olarak incelemişlerdir. Nanopartikül yoğunluğu arttıkça veriminde arttığını belirtmişlerdir. Tong ve Cho [33], farklı koşullar dikkate alınarak, nanoakışkanlı U-tüp ve ısı borulu güneş kolektörlerini ele almışlar ve teorik olarak incelemişlerdir. İş akışkanı olarak, içerisinde %0.24 hacimsel oranında MWCNT nanopartikülü barındıran MWCNT-H<sub>2</sub>O nanoakışkanını U-tüplü ve ısı borulu bir güneş kolektöründe kullanmışlardır. Ele aldıkları sistemde kullandıkları nanoakışkanın suya göre ısı performansı %8 arttırdığını ifade etmişlerdir. Kim ve arkadaşları [34] farklı boyutlarda ve hacimsel oranlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü barındıran nanoakışkanlı U-tüplü vakum güneş kolektörünün deneysel olarak incelemesini yapmışlardır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanoakışkanının U-tüplü güneş kolektörlerinin verimliliğini arttırdığını ifade etmişlerdir. Kaya ve arkadaşları [35], içerisinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülü barındıran nanoakışkan bulunduran U-tüplü güneş kolektör sisteminde nanopartikül yapısının kolektör verimine etkisini incelemişlerdir. Hosseini ve Dehaj [36], U-tüplü vakum güneş kolektöründe iki farklı nano yapıya sahip TiO<sub>2</sub> barındıran su bazlı nanoakışkan için ısı performans değerlendirmesi yapmışlardır.

Isıl sistemlerin performansını arttırabilmek için çeşitli alanlarda kullanılarak önemli bir yer teşkil etmeye başlayan nanoakışkanların daha da etkin ve sistemin koşullarına uygun bir şekilde kullanılabilmesi için araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda temel akışkan içerisinde tek tip nanopartikül kullanımı dışında ayrıca hibrit yani temel akışkan içinde iki yada daha fazla çeşitte nanopartikül kullanılarak elde edilen nanoakışkanlar kullanılmaya başlanmıştır. Böylece hibrit nanoakışkanlar aracılığıyla sistemde meydana gelen ısı performans incelenmeye başlanmıştır. Hibrit nanoakışkan kullanımı ile hem sistemde çökelmeyi önlemek hem de daha iyi bir ısı performans elde etmek amaçlanmaktadır.



Son zamanlarda nanoakışkanın ele alınan sistem için uygun yapıya ulaşması ve sistem için istenilen ısı performansı oluşturabilmesi için temel akışkan içine iki veya daha çok çeşitte nanopartikül kullanımı bazı araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Güneş enerjisi sistemleri üzerine hibrit nanoakışkan kullanımı üzerine çalışmalar çok azdır [37-39]. Bazı araştırmacılar tarafından düzlemsel güneş kolektörleri [40-43] veya parabolik güneş kolektörleri [44-46] üzerine hibrit nanoakışkan etkileri incelenmiştir. Sadeghi and Nazari [47] hibrit bir nanoakışkanın antibakteriyel özelliğini vakum tüplü bir kolektörde dezenfeksiyon için uygulamışlar ve iş akışkanının manyetik özelliğini de ısı transfer hızını artırmak için amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılmış olan bu hibrit nanoakışkan çalışmalarında ısı performansın arttığı ve sistemin hidrodinamik davranışına da olumlu etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde matematiksel olarak modellenmiş çalışmalarda kolektörler genellikle basitleştirilmiştir, yani tüm borular ve manifold ele alınarak, analizleri yapılmamıştır yada yalnızca deneysel olarak incelenmiştir. U-tüplü güneş kolektörlerinde U-tüpler ile manifoldun beraber modellenmesi ile yapılmış nümerik çalışmalara rastlanmamıştır, modeller genellikle bir adet U-tüp için oluşturulmuştur. Ayrıca ısı transfer kabiliyetini arttırmak amacıyla kullanılan nanoakışkan modellemesi üzerine de U-tüp güneş kolektörleri üzerine yapılmış nümerik çalışmalar çok yetersizdir. Özellikle nanoakışkanın hibrit modellemesi üzerine U-tüp güneş kolektörleri için herhangi bir çalışmaya literatürde denk gelinmemiştir.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada U-tüplü güneş kolektör sistemini oluşturan 10 adet vakum tüp ve bu tüplerin bağlı oldukları giriş-çıkış manifoldları birlikte modellenmiş ve gerçek sistemin oluşturacağı etkiler nümerik olarak sunulmuştur. Çünkü çalışmamızda kullanılan matematiksel modelimiz, deneysel ve nümerik çalışmalar ile doğrulanmıştır. Analizler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metodlarından sonlu hacimler metodu (SHM) kullanılarak yapılmıştır. 30° eğimli olarak bulunan sistemin ısı transfer kabiliyeti, iş akışkanı olarak su ve su bazlı nanoakışkanların kullanılması durumları için incelenmiştir. Nanoakışkanlar, iki farklı

tip nanopartikülden oluşan hibrit ve tek tip nanopartikülden oluşan mono olarak modellenmiştir. Sistemlerin nanoakışkan kullanarak arttırılan ısı transfer kabiliyetinin yanısıra daha hafif ikinci tip nanopartikülün temel akışkana dahil edilmesiyle sistemde oluşabilecek çökelme ve tıkanma sorunlarının da önüne geçilebilecektir. Farklı ısı akıları, farklı akış debileri ve farklı hacimsel oranlarda nanopartiküller kullanarak sistem hidrodinamik ve ısıl açıdan değerlendirilmiş, tüm parametreler karşılaştırılmıştır.



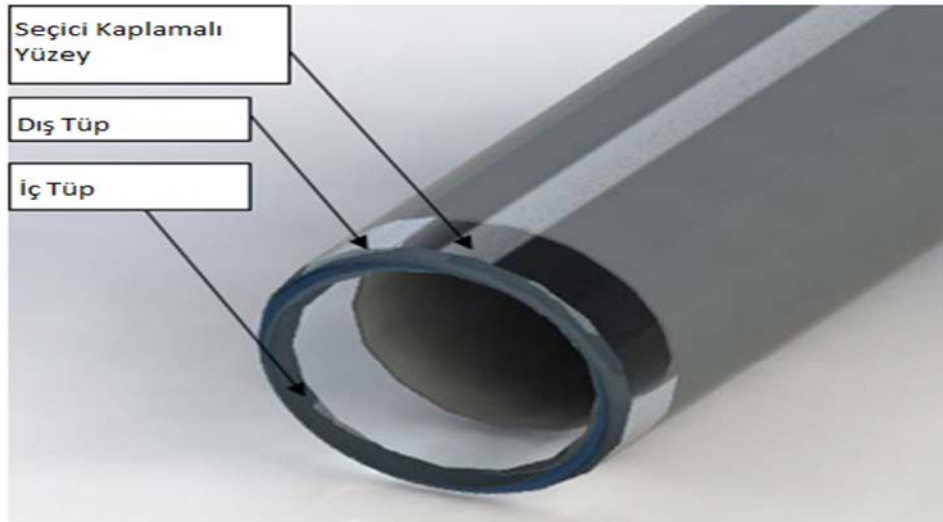
## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Güneş Kollektörleri

Güneş ışınımını kullanılabilir enerjiye çevirebilen, her geçen gün artan enerji ihtiyacını karşılayabilmeyi amaçlayan sistemler güneş kolektörleri olarak adlandırılmaktadır. Evsel ve endüstriyel olarak kullanılabilen güneş kolektörleri, suyun ısıtılması ve ısıtma soğutma sistemleri için elektrik üretilmesi gibi kullanım alanları bulunmaktadır.

#### 2.1.1. Vakum Tüplü Güneş Kollektörleri

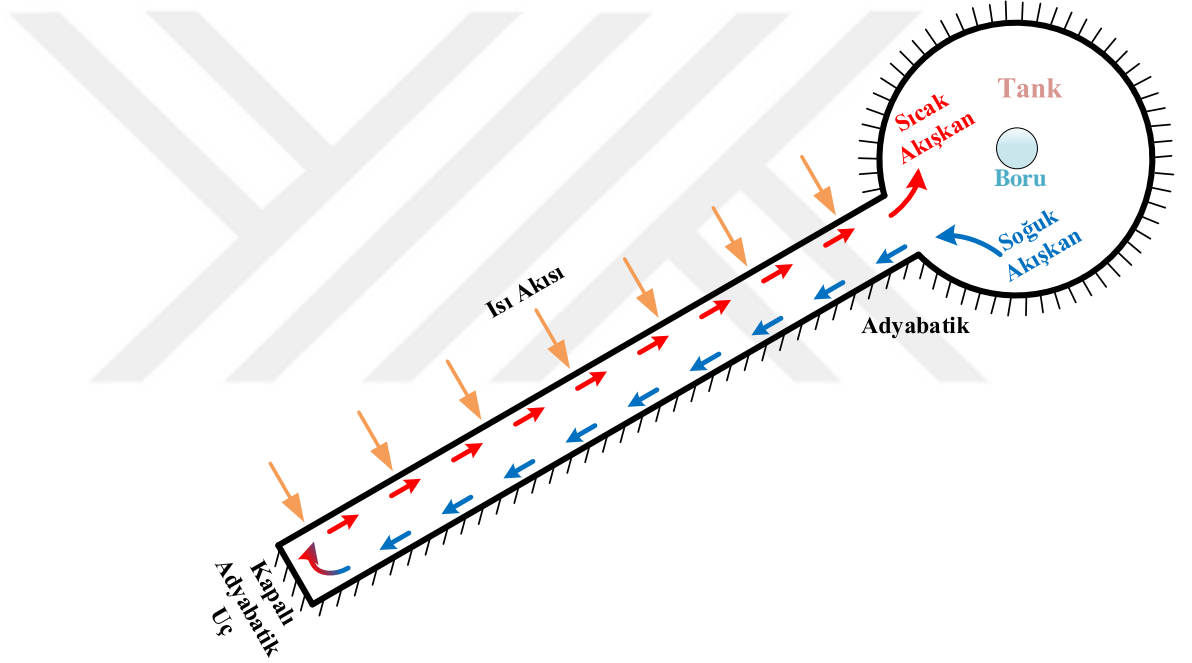
Vakum tüplü güneş kolektörleri, birbirine paralel ve vakumlanarak havası alınmış cam borulardan meydana gelmektedir. Her boru iki tüpten oluşmaktadır. Dıştaki cam tüp saydamken içteki tüp seçkili kaplamalıdır (Şekil 2.1). Güneş ışınları dıştaki saydam cam tüpten geçerek içteki seçkili kaplamalı cam tüpte absorbe edilmektedir. Her iki cam tüp düşük yansıtıcı özellikte olmalıdır. Güneş ışınları saydam dış cam tüpten geçer ve içteki kaplamalı tüp tarafından absorbe edilir. Absorbe edilen güneş ışınları ısı enerjisine dönüştürülür. Vakumlanarak havası boşaltılan borulardan güneş ışığı geçebilirken tüpler arasında hava olmaması nedeniyle ısı kaybı minimuma iner [57].



Şekil 2.1: Vakum Tüplü Güneş Kollektörünün Görünüş ve Kısımları [58]

Yüksek sıcaklık aralıklarında ve her türlü iklim koşulunda da çalışabilen vakum tüplü güneş kolektörleri endüstriyel ısıtma sistemleri, binaların ısıtılması, yüzme havuzlarının ısıtılması ve evsel su ısıtma sistemlerinde kullanılabilir [59].

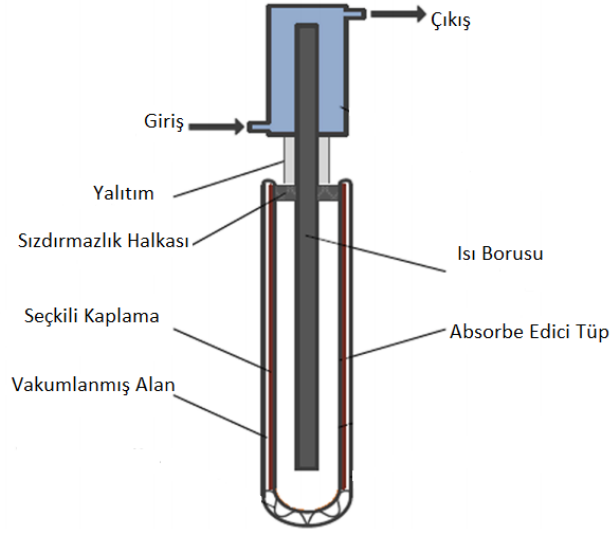
Saydam dış cam tüpten geçen ve içteki kaplamalı tüp tarafından absorbe edilen güneş ışınları ısı enerjisine dönüşür ve borunun içindeki akışkanın ısınmasını sağlar. Isınan akışkan hacim kazanmasıyla yoğunluğu düşer ve yükselerek tanka dolar (Şekil 2.2).



**Şekil 2.2:** Vakum Tüplü Güneş Kolektörün Çalışma Prensibi [60]

#### 2.1.1.1. Isı Borulu Vakum Tüplü Güneş Kolektörleri

Isı borulu vakum tüplü güneş kolektörü, birbirine paralel ve vakumlanarak havası alınmış cam borunun merkezinden geçecek şekilde ısı borusu yerleştirilmesiyle meydana gelir (Şekil 2.3).



**Şekil 2.3:** Isı Borulu Vakum Tüplü Güneş Kollektörün Kesiti [61]

#### 2.1.1.2. Bir Ucu Açık Vakum Tüplü Güneş Kollektörleri

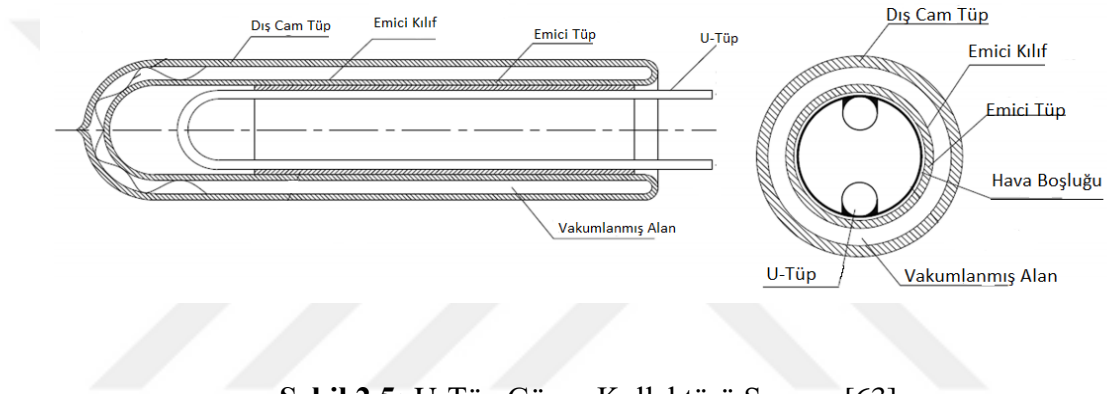
Bir ucu açık vakum tüplü güneş kollektörü, eş merkezli, aralarında ki hava vakumlanmış, içteki cam tüpün seçici kaplamayla kaplandığı, dışta ki cam tüpün saydam olduğu ve tek tarafı kapalı olucak şekilde dizayn edilmiştir. Yaklaşık 15'le-40 adet vakumlu tüp yatay bir tanka direkt olarak bağlanarak kollektörü oluşturur (Şekil 2.4). Çalışma mekanizması ise ısınan akışkanın yoğunluğu azaldığı için üsteki tanka doğru hareket etmesi ve soğuyan akışkanınsa yerçekimi etkisiyle aşağı hareket etmesinden oluşur.



**Şekil 2.4:** Bir Ucu Açık Vakum Tüplü Güneş Kollektörü [62]

### 2.1.1.3. U-Tüp Güneş Kollektörleri

U-tüp güneş kolektörleri, basit geometrisi ve yüksek ısıl verimlilikleri sebebiyle fiyat-performans açısından bir numara olmaya adaydırlar. Şekilde çalışma prensibi verilmiştir. Vakumlanarak havası boşaltılmış ve iç içe geçmiş cam tüplerin içerisine u şekli verilmiş boru yerleştirilerek meydana gelmektedir. Dışta ki tüp saydam malzemeden yapılmış olup, güneş ışığını geçirebilmesi sağlanmıştır. İçteki cam tüp seçkili kaplama ile kaplandığı için güneş ışığını ısı enerjisine çevirmektedir ve ışıma ile oluşacak ısı kaybını önlemektedir (Şekil 2.5). Cam tüpler arasında ki vakumlanmış alan sayesinde taşınma ve iletilerek ısı aktarımını önleyerek ısı kaybını en düşük seviyeye indirmiştir.



Şekil 2.5: U-Tüp Güneş Kollektörü Şeması [63]

U-Tüp vakumlu güneş kolektörleri, düzlemsel güneş kolektörlerine kıyasla daha yüksek sıcaklıkta, her türlü iklim koşullarında çalışabilmesi ve silindirik yapısı sayesinde günün her saati güneş ışığını absorbe edebilmesi sebebiyle daha yüksek kolektör verimi sağlamaktadır [64].

U-tüp vakumlu güneş kolektörleri, 50-200 °C sıcaklık aralığında çalışabilen sistemler olması nedeniyle binaların ısıtılması, evlerde sıcak su temin edilmesi vb. amaçlar için kullanılabilir (Şekil 2.6). Diğer alışılmış sistemlere göre daha ekonomiktirler. Düzlemsel güneş kolektörlerine kıyasla u-tüp vakumlu güneş kolektörleri soğuk hava koşullarında da kullanılabilir [65].



**Şekil 2.6.** U-Tüp Vakum Tüplü Güneş Kolektörü

Son yıllarda gelişen nanoteknoloji nanoakışkanların elde edilmesine öncülük etmiştir. Nano boyuttaki partiküllerin geleneksel akışkanlara karıştırılmasıyla elde edilen akışkanlara nanoakışkan denmektedir. Nanoakışkanlar sayesinde geleneksel akışkanlara kıyasla daha yüksek ısı transferi elde edilmesi beklenmektedir. Kolektörlerde nanoakışkan kullanarak ısı transferi artırılması nedeniyle daha yüksek verim elde edilmektedir.

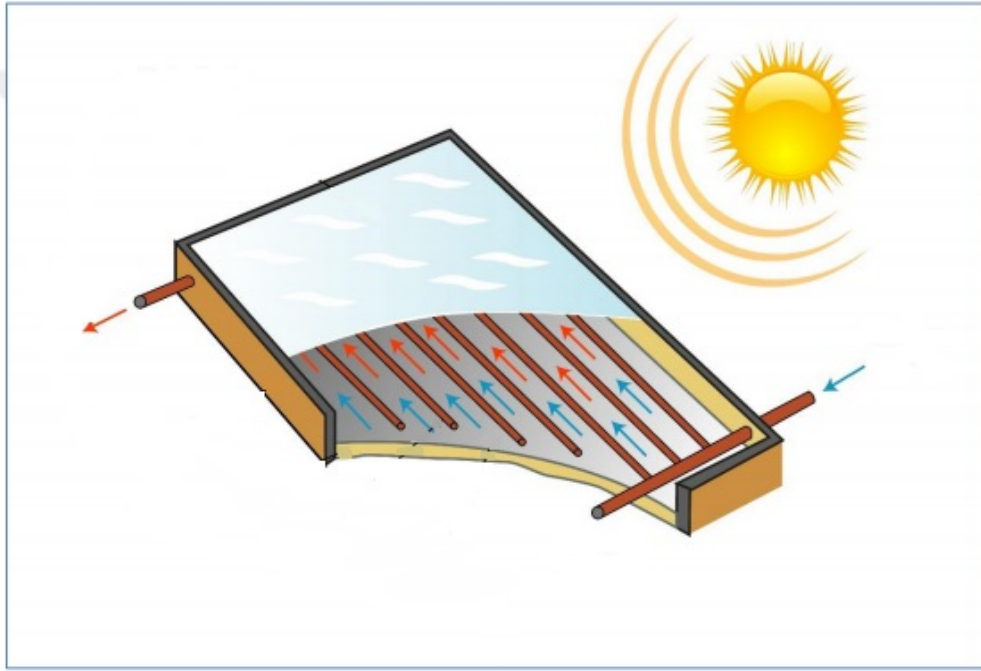
### **2.1.2. Düzlemsel Güneş Kolektörleri**

Düzlemsel güneş kolektörleri, hava ve suyu ısıtmak amacıyla güneş ışınlarını, akışkan aracılığıyla ısıya çevirebilen en temel ve en çok tercih edilen sistemdir. En yüksek verime düşük sıcaklık aralığında sahiptir.

Güneş ışınları saydam bir tabakadan geçerek emici yüzey tarafından absorbe edilir. Absorbe edilen güneş ışınları yüzey sıcaklığını artırır ve bu sıcaklık gaz veya sıvı bir akışkan aracılığıyla ısıya dönüşür. Sıvı akışkanlar ısı aktarımı konusunda gaza göre daha yüksek verime sahiptir. Bu sebeple enerji ihtiyacının daha yüksek olduğu endüstri gibi alanlarda akışkan olarak sıvı tercih edilirken, öte yandan daha düşük enerji ihtiyacı olan evsel alanlarda ise akışkan olarak gaz tercih edilmektedir.

Düzlemsel plakalı güneş kolektörlerinin kurulumu, soğurulan güneş enerjisini maksimize etmek amacıyla yüzeye düşen güneş ışınlarının geliş açısına bağlı olarak yapılır.

Şekil 2.7.'de düzlemsel plakalı güneş kolektörünün yapısı gösterilmiştir. Üst kısımda dış etmenlerden koruması ve gelen ışınları engellemesi için saydam cam veya plastik bir örtü bulunmaktadır. Dış kısmında ısı yalıtımı sağlamak ve akışkanın dolaştığı borularla, emici plakayı kapsayan kasa bulunmaktadır.



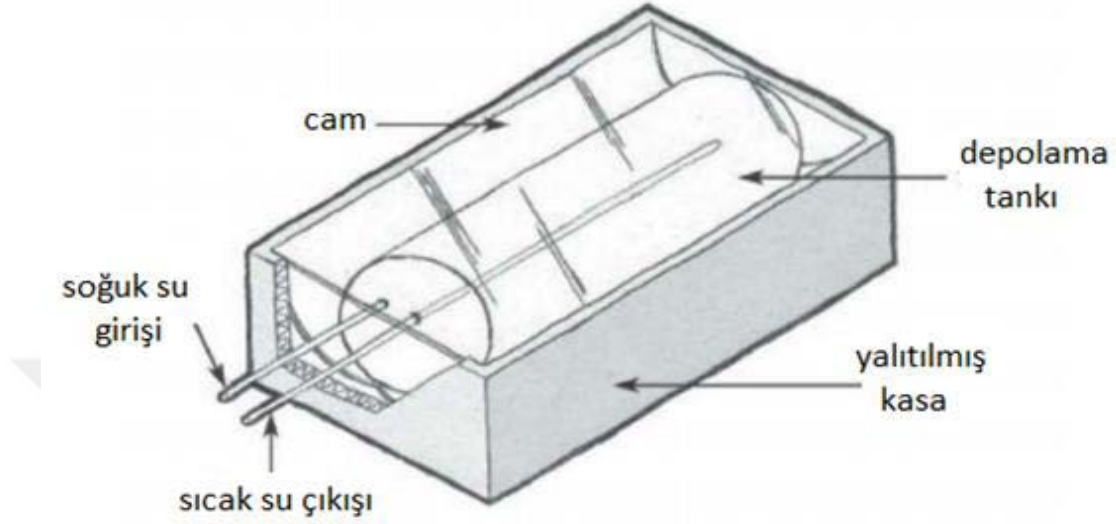
**Şekil 2.7.** Düzlemsel Plakalı Güneş Kolektörü

### **2.1.3. Bileşik Depolamalı Kolektörler**

Bileşik depolamalı kolektörler, düşük sıcaklık aralıklarında çalışan ve düşük bütçeli su ısıtma sistemleridir. Genellikle evsel su ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Bu sistem genellikle bir veya iki adet depolama tankından oluşmaktadır. Su depolama tanklarının basınca dayanımı artması amacıyla silindirik olanları tercih edilmektedir. Diğer sistemlere kıyasla en büyük dezavantajı geceleri ısı kaybının yüksek oluşu ve her türlü hava şartına uyum sağlayamamasıdır. [66]



Şekil 2.8.'de bileşik depolamalı kollektörü meydana getiren parçalar gösterilmiştir. Üst tabakada güneş ışınlarının geçirebilen saydam malzeme olan cam kullanılmıştır. Su depolama tankının etrafında dışarda ki olumsuz koşullardan korumak amacıyla yalıtımlı ve koruyucu bir kasa bulunmaktadır.



Şekil 2.8. Tank Tipi Bileşik Depolamalı Kollektör [67]

#### 2.1.4. Yoğunlaştırıcı Tip Güneş Kollektörleri

Yoğunlaştırıcı tip güneş kollektörü, kollektörün yüksek sıcaklık aralıklarında çalışmasını sağlamak için güneş ışınlarını yoğunlaştırmaktadır. Güneş ışınlarını yoğunlaştırmak için emici yüzeylere kavis vererek parabolik şekiller elde edilmesiyle daha az alanda daha fazla yüzey kazanılmış olmaktadır. Bir diğer yöntemse emici yüzeyle güneş ışını arasına güneş ışınını toplayıp yoğunlaştırmayı sağlayan optik mercekler kullanılmasıdır [68].

#### 2.2. Nanoakışkanlar

Isı aktarımında ki yetersizlik endüstride karşılaşılan en kritik ve dikkat edilmesi gereken sorunlardan birisidir. Isı aktarımında ki en temel sınırlama ise ısıl iletkenliğin düşük olması ve geleneksel akışkanlarla bu sınırlamanın aşılabilmesidir. Bu sınırlamanın aşılabilmesi için akışkanların içerisine çeşitli parçacıklar katılarak ısı taşıma miktarının artırılması açısından gelecek vaat etmektedir. Bu fikir 19.

yüzyılda İskoç bilim insanı James Clerk Maxwell'den (1873) günümüze kadar gelmiştir ve çalışmalar halen devam etmektedir.

Mili- ve mikro- boyutunda metal partiküller akışkana eklenerek elde edilen ilkel karışımlarda dahi ısı iletkenliğinde artış gözlemlenmiştir. Ancak parçacıkların yeterli derece küçük olmaması sebebiyle heterojen karışımlar olmuşlardır. Bu nedenle akışkanda çökme, kanallarda tıkanma, aşınma ve basınç kaybı gibi olumsuz sonuçlar meydana gelmiştir. Bu olumsuzluklardan dolayı tercih edilmemişlerdir.

Ancak teknolojinin gelişmesi ve malzeme biliminin ilerlemesi ile birlikte gelişmiş üretim yöntemleri bize nano- boyutta parçacıkların üretilebilmesi imkânı sağlamıştır. Lee ve ark. [69] nano- boyuttaki parçacıkların, mekanik aşındırma, gaz ve kimyasal buhar yoğunlaştırma teknikleriyle üretilebileceğini göstermişlerdir. Üretilen bu nanoparçacıkların akışkana karıştırılmasıyla oluşan akışkanlara nanoakışkan denmektedir. Bu parçacıkları boyutlarının çok küçük olması nedeniyle çökme, aşınma ve basınç kaybı gibi olumsuzlukları bulunmamaktadır.

Wang, Mujumdar ve Xuan, Li tarafından yapılan araştırmalarda nano-parçacıklar ile elde edilen nanoakışkanların geleneksel akışkanlara kıyasla ısı transferinde artış olduğunu göstermişlerdir. [70,71]

Nanoakışkanların ısı transferinde sağladığı iyileştirmelerden dolayı güneş enerjisiyle çalışan sistemlere adapte edilmiştir. Javad ve Nor Azwadi tarafından nanoakışkan olarak  $Al_2O_3$ -su kullanılarak vakum tüplü güneş kollektörü üzerinde ki ısı verimliliği deneysel olarak incelenmiştir. Nanoakışkanın vakum tüplü güneş kollektörünün verimini arttırdığı gözlemlenmiş ve bu sebeple nanoakışkanların vakum tüplü güneş kollektörleri için uygun olduğu anlaşılmıştır [72].

### 2.3. Sonlu Hacimler Metodu

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte işlem kapasitesi yüksek bilgisayarlar icat edilmiştir. Geliştirilen bu bilgisayarlar kompleks problemlerin çözümünde ve sonuçların hızlı bir şekilde elde edilmesinde büyük fayda sağlamıştır. Gelişen teknolojiyle akışkanların davranışlarını incelemek için çeşitli metotlar ortaya çıkmıştır. Bu metotların tamamı hesaplamalı akışkanlar dinamiğidir (HAD). Bu metodun deneysel yöntemlere kıyasla düşük maliyet, kompleks problemlere daha hızlı cevap bulabilmesi gibi avantajları bulunmaktadır.

Genel “ $\phi$ ” ifadesinin zamana bağlı değişken sonlu hacim yöntemi (Versteeg ve Malalasekera, 1995) ile incelenmesi için taşınım denklemi;

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\phi U) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (2.1)$$

Akışkan elemanın $\phi$ özelliğindeki artış	+	Akışkan elemanından çıkan net $\phi$ miktarı	=	$\phi$ özelliğinin difüzyona bağlı artış oranı	+	$\phi$ 'nin kütsel kuvvetlere bağlı artışı
---	---	--	---	--	---	--

Denklem 2.1'i zamansız sürekli akım için tekrar düzenlemek gerekirse;

$$\nabla(\Gamma\nabla\phi) + S_\phi = 0 \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'yi elde ederiz ve kontrol hacmi olarak integralini alırsak;

$$\iiint_{\Delta V} \nabla(\Gamma\nabla\phi)dV + \iiint_{\Delta V} S_\phi dV = 0 \quad (2.3)$$

Denklem 2.3 için gauss diverjans teoreminden faydalanırsak;

$$\iint_A (\Gamma \nabla \phi) \vec{a} dA + \iiint_{\Delta V} S_\phi dV = 0 \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'ü elde etmiş oluruz.

Elde edilen denklemlerde sonlu hacimler metodu basitçe gösterilmiştir. Denklemler “  $\phi$  ” ‘nin difüzyon akışı ve kontrol hacmindeki değişkenliği göstermektedir. Basınç-hız ikilisinin çözümü için momentum denklemlerinde, tahmini bir basınç alanı belirlenir ve ayrıştırılmış momentum denklemlerinde kullanılarak hızlar bulunur. Gerçek basınç alanı ile tahmini basınç alanı arasında düzeltme basınç alanı seçilerek çözüm devam ettirilir. Bu şekilde gerçek sonuca ulaşana kadar yakınsama yöntemiyle döngü uygulanır. Bu döngüye SIMPLE (Patankar, 1980) iteratif çözüm algoritması denmektedir [60].

#### **2.4. Çalışmanın Amacı**

Enerji, kalkınmanın en önemli etkenlerinden birisidir. Bu sebeple enerjinin verimli ve temiz kullanımı büyük önem taşımaktadır. Dünyada enerjinin en yoğun kullanıldığı alanlardan biriside kullanım suyudur. Kullanım suyunu ısıtmak için yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi sistemleri ekonomik olmaları sebebiyle yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu güneş enerjisi sistemlerinden de vakum tüplü güneş kolektör tiplerinden U-tüplü güneş kolektör sistemi su ısıtmada geniş kullanım alanına sahiptir. Daha temiz enerji elde edebilmek ve bu enerjiyi daha etkin kullanabilmek amacıyla çalışmamızda U-tüplü güneş kolektör sistemini U-tüpler ve giriş-çıkış manifoldların ile birlikte bütün olarak ele aldık. Herbir U-tüpüm sistem üzerindeki etkisi farklı olacağından dolayı sistemdeki bütün tüpleri ele alarak, sistem etkilerini daha doğru elde etmeyi amaçladık. Sistemin etkinliğini arttıracaklarını düşündüğümüz için akışkan olarak su haricinde  $\text{SiO}_2$  ve Cu nanopartiküllerini barındıran nanoakışkan kullanımının etkilerini de araştırdık. Ayrıca bu iki farklı tip nanopartikülün temel akışkan su içerisinde birlikte (hibrit) kullanımında baktık. Bunun sebebi, hafif nanopartikül ile çökme sorununun önüne geçmek, ısı iletkenliği çok daha iyi ancak ağır olmasından kaynaklı hacimsel oranı artınca tıkanma ve çökelmelere sebep olabilecek nanopartikül ile de ısı performansı

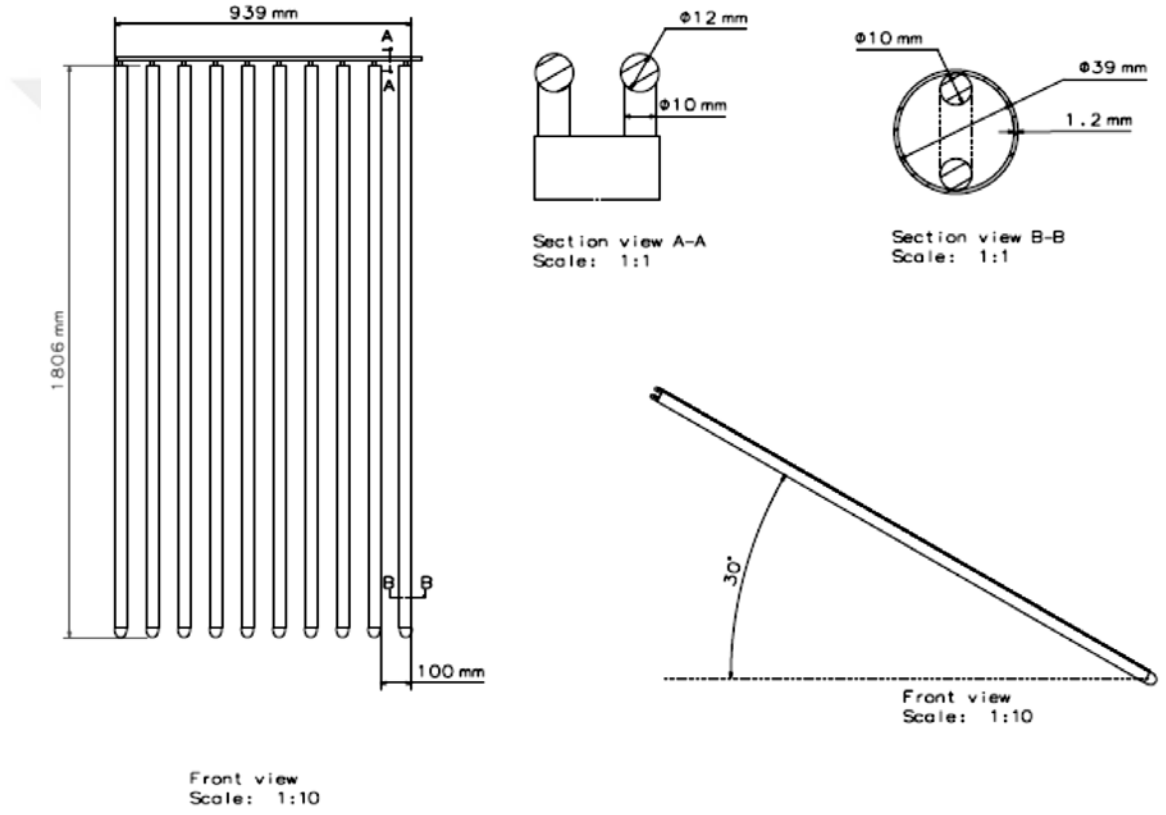
artırmaktır. Sonlu hacimler metodunu kullanarak yapmış olduğumuz hesaplarımızda deneysel ve nümerik çalışmalarda doğrulanmış matematiksel model kullandık. Böylece mono ve hibrit tip nanoakışkan kullanımının U-tüplü güneş kolektör sisteminde nasıl bir ısı ve hidrodinamik etkilere sebep olduğunu incelemeyi amaçladık. Bu amaçla yapmış olduğumuz çalışmamızda 30° eğitilmiş kolletör sistemimizde; farklı ısı akıları, farklı akış debileri ve farklı hacimsel oranlarda nanopartiküller kullanarak sistem hidrodinamik ve ısı açıdan değerlendirilmiş, tüm parametreler karşılaştırılmıştır.



### 3. ISIL MODELLEME

#### 3.1. Model Açıklaması

Ele alınan U-tüplü vakum güneş kolektörünün geometrik ve teknik değerleri Şekil 3.1’de gösterilmiş olup, diğer tüm gerekli geometrik değerlerde Tablo 3.1’de verilmiştir. Tablo 3.1’de belirtilen geometrik değerlere sahip modelimizin analizleri yapılarak, kolektörün ısı performansını incelenmiştir.



Şekil 3.1: Sistemin Geometrik Ölçülendirilmesi.

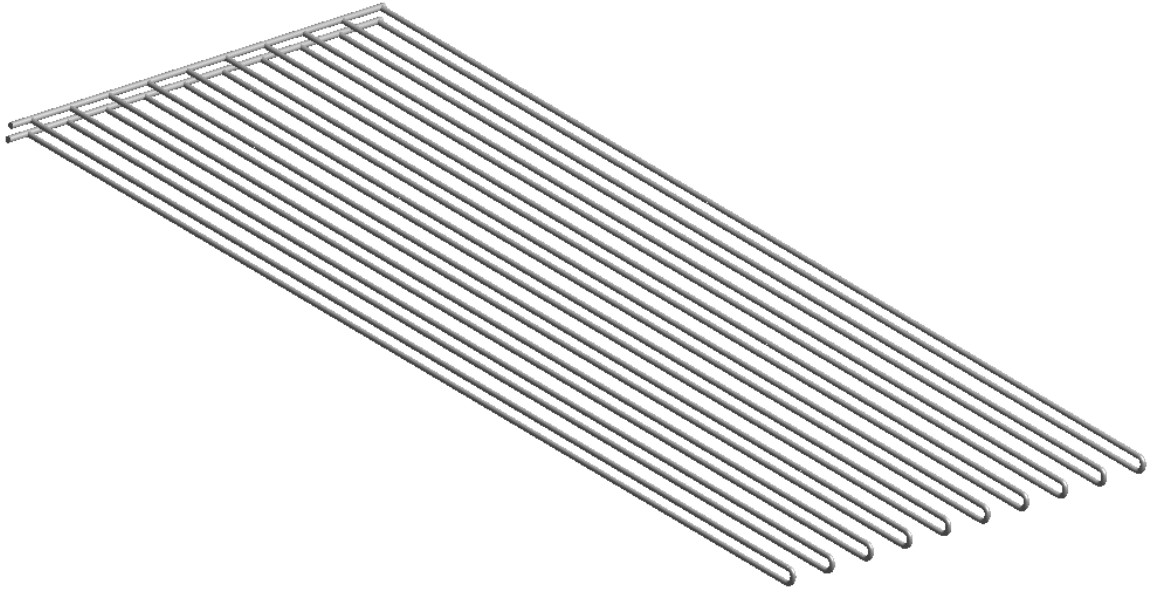
**Tablo 3.1:** U-Tüp Güneş Kollektörünün Özellikleri

<b>U-Tüp Uzunluğu</b>	1806 mm
<b>U-Tüp Çapı</b>	10 mm
<b>U-Tüp Sayısı</b>	10 adet
<b>Manifold Uzunluğu</b>	939 mm
<b>Manifold Çapı</b>	12 mm
<b>Manifold Giriş Sıcaklığı</b>	15 °C
<b>Kollektör Eğim Açısı</b>	30°
<b>Isı Akısı</b>	2960 W/m <sup>2</sup> / 3330 W/m <sup>2</sup> / 3700 W/m <sup>2</sup>
<b>Akış Debisi</b>	0.025 kg/s / 0.050 kg/s / 0.075 kg/s

U-tip vakum tüplü kollektörlerde U-tüplerin üzerine vakumlanarak geçirilmiş cam tüpler vardır. Bu cam tüpler çoğu uygulamada 37mm çapındadır ve daha fazla güneş ışınımını emmek amacıyla kullanılmakta olup, içi vakumlu olmasıyla da bu ısıyı U boruya yüksek bir ısı dirence maruz kalmadan aktarmaktadır. Analizlerimizde karmaşıklığı önlemek ve daha seri bir şekilde doğru sonuca ulaşabilmek amacıyla modelimizde bu cam tüpler geometriye dahil edilmemiş ancak yüzeyine gelen ısı miktarı modelimize dahil edilmiştir. Güneş ışınımaları için kollektörler üzerine düşen sabit ısı akısı miktarları genellikle 800 W/m<sup>2</sup>, 900 W/m<sup>2</sup> ve 1000W/m<sup>2</sup> civarındadır. Uygulamada bu cam tüpler ile birim alana düşecek ısı akısı miktarı 10mm çapındaki U-tüplere düşecek miktarda ısı akısı aşağıdaki hesaplamalar ile düzenlenmiştir. Cam boru olması durumunda güneş ışınımına maruz kalacak olan üst yüzey alanı çap 37mm için ( $A_{üst}=2\pi rL=\pi*0.037*1.8=0.20923007m^2$ ) olarak hesaplanır. Böylece cam tüp olması durumunda belirtilen ısı akılarına karşılık yüzeye emilecek ısı enerji miktarları; 800 W/m<sup>2</sup> için 167,38406W, 900 W/m<sup>2</sup> için 188,30706W, 1000 W/m<sup>2</sup> için 209,23007W olarak hesaplanır. Bu durumda U-tüplere aktarılan ısının da bu miktarlarda olabilmesi için ele alınacak ısı akıları şu şekilde hesaplanmıştır. 10 mm çapındaki U-tüp için ( $A_{u-boru_üst}=2\pi rL=\pi*0.010*1.8=0.05654866776m^2$ ) alan hesaplanır. Bu durumda  $A_{üst} / A_{u-boru_üst} = 0.20923007m^2 / 0,05654866776m^2 = 3.7$  olarak bulunur. Bu durumda u borulara verilecek ısı akılarını 3.7 kat daha fazla alınmasıyla emilen ısı miktarı yaklaşık olarak dengelenmiş ve gerçeğe uygun olarak simüle edilmiş olur. Yani; 800 W/m<sup>2</sup>, 900 W/m<sup>2</sup> ve 1000W/m<sup>2</sup> yerine sırasıyla 2960 W/m<sup>2</sup>, 3330 W/m<sup>2</sup>

ve  $3700\text{W/m}^2$  alınarak analizler yapılmıştır. Böylece deneysel ve saha sonuçlarına uygun ısı performans değerlerini nümerik olarak doğru ve hızlı bir şekilde hesaplanmıştır. Matematiksel modelin doğrulaması 4. Bölümde verilmiştir.

Şekil 3.2’de gösterilen vakum tüplü güneş kolektöründeki düşük sıcaklıkta suyun analizleri için HAD metodlarından SHM’yi kullanarak çözüm yapan ANSYS-Fluent programı kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalardaki çözücümüz *Pressure-Based* olarak seçilmiştir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin (3.1-3.4) çözümü için *SIMPLE* algoritması [48] kullanılarak, basınç-hız çiftinin beraber çözülmesi sağlanmıştır. Momentum-enerji denklemleri *Second Order Upwind* ve basınç da *Body Force Weighted* kullanılmıştır. *Gradient* değerleri de *Green-Gauss Node Based* seçilerek belirlenmiştir. Ele almış olduğumuz matematiksel model de Boussinesq Yaklaşımı kullanılmış olup; sürekli, sıkıştırılmaz, Newtonian ve laminar akış olarak çalışılmıştır.



**Şekil 3.2:** U-Tüp Güneş Kolektörü Modeli

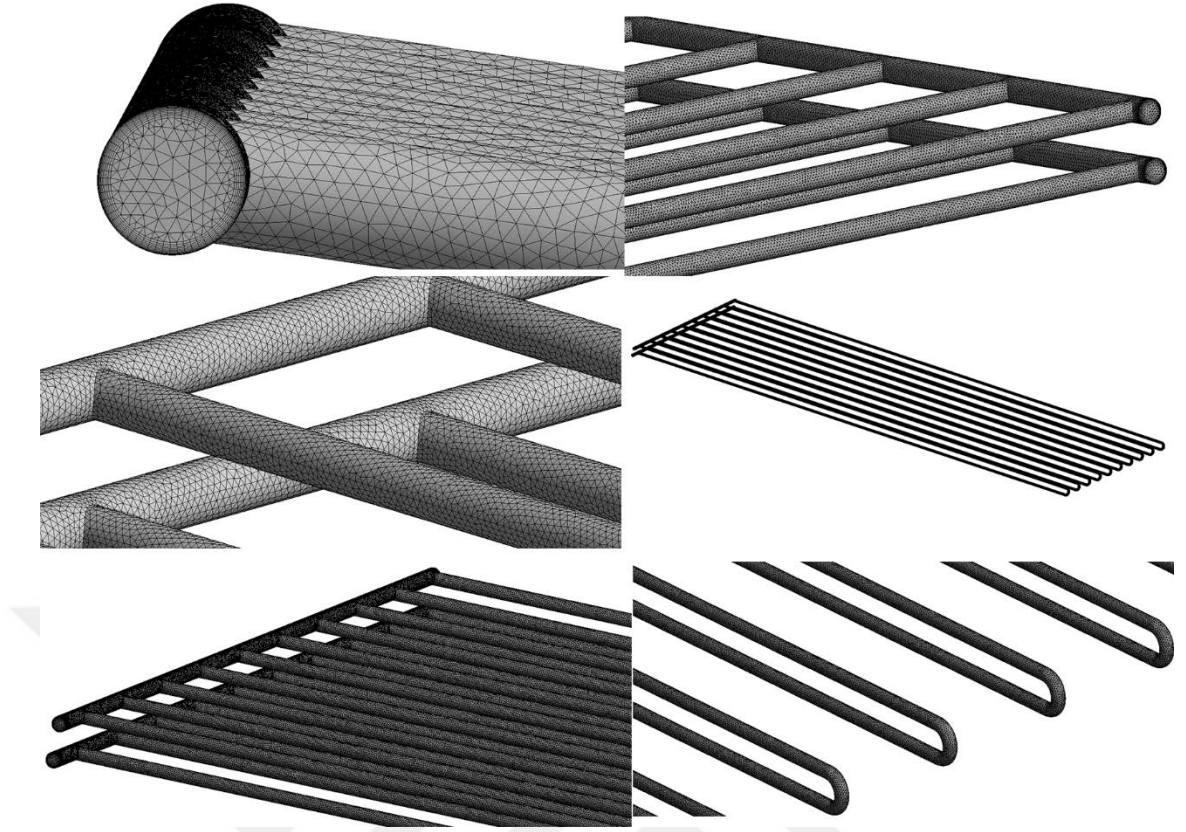


### 3.2. Ağ Analizi ve Yapısı

Nümerik hesaplamalarda çalışmanın doğrulanması gibi ağ analiz sayısı ve yapısının doğru belirlenmesi de çok büyük önem taşımaktadır. Yanlı belirlenmiş ağ yapısı yada sayısı doğru sonuçtan uzaklaşmamıza yada doğru sonuca yakınlaşsak dahi çok gereksiz zaman ve iş kaybına neden olabilir. Tablo 3.2’de ilgili modelimiz için yaptığımız ağ analiz tablosu verilmiş olup, en optimum ağ sayısı, ayarları ve yapısı belirlenmiştir. Ele aldığımız model için mesh modeli olarak *Tetrahedrons*, element order olarak *Quadratic* yapıyı kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan bu ağ yapımızda; eleman sayısı *5969871*, nodes sayısı da *1460115* değerlerinde belirlenmiştir. Şekil 3.3’de modelimize uyguladığımız ağ yapısının farklı açılardan görselleri sunulmuştur. Belirlenen ağ yapısı üzerinden *4000* iterasyon yaptırılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 3.2:** Ağ Analizi

Elements	Nodes	T <sub>out</sub>	ΔT
4069346	919053	20.433801	5.433801
5572133	1239104	20.593805	5.593805
5711031	1334729	20.640955	5.640955
5818334	1389364	20.799188	5.799188
5942768	1448372	20.988306	5.988306
5955228	1453970	20.956689	5.956689
5969871	<b>1460115</b>	<b>20.957513</b>	<b>5.957513</b>
9406349	3898830	20.459192	5.459192
9502940	3933401	20.203912	5.203912
9861900	4056525	20.318231	5.318231
10445590	4251775	20.697162	5.697162
13554939	5824468	20.865419	5.865419
15701430	7053144	20.941338	5.941338



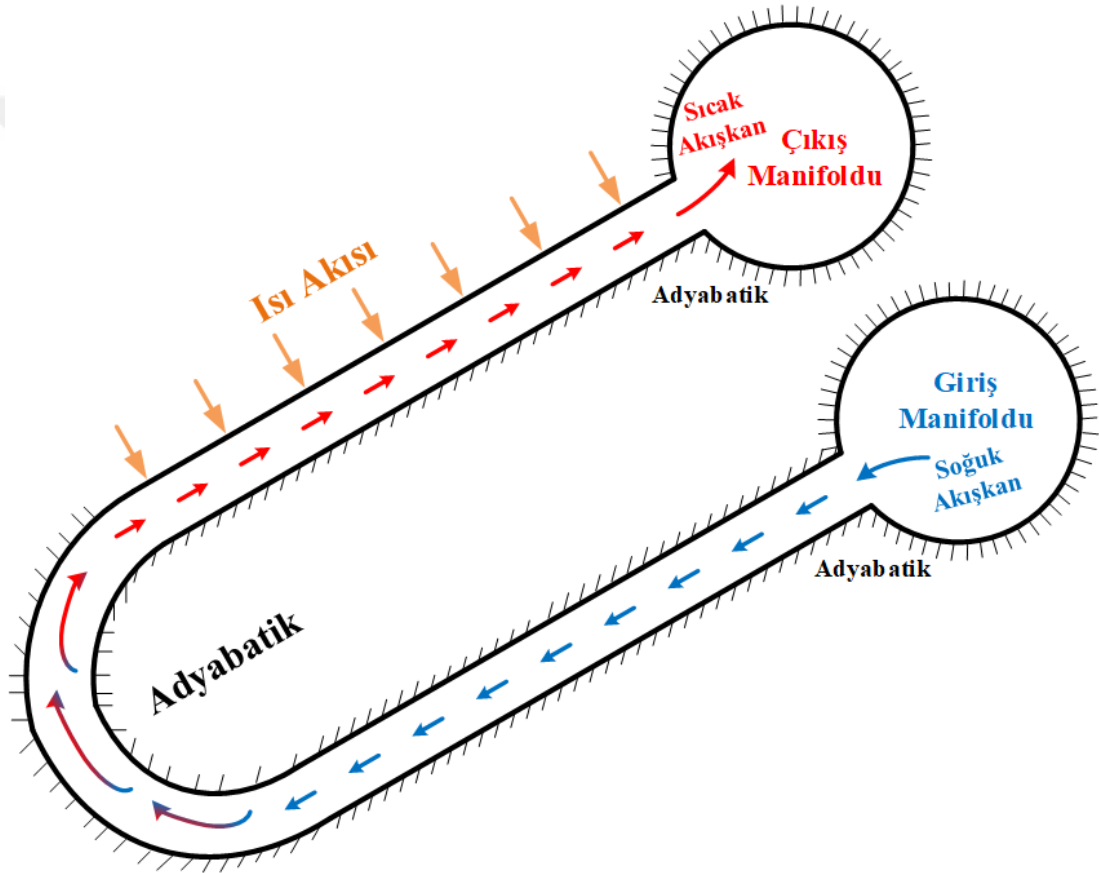
Şekil 3.3: Ağ Yapısı

### 3.3. Başlangıç ve Sınır Şartları

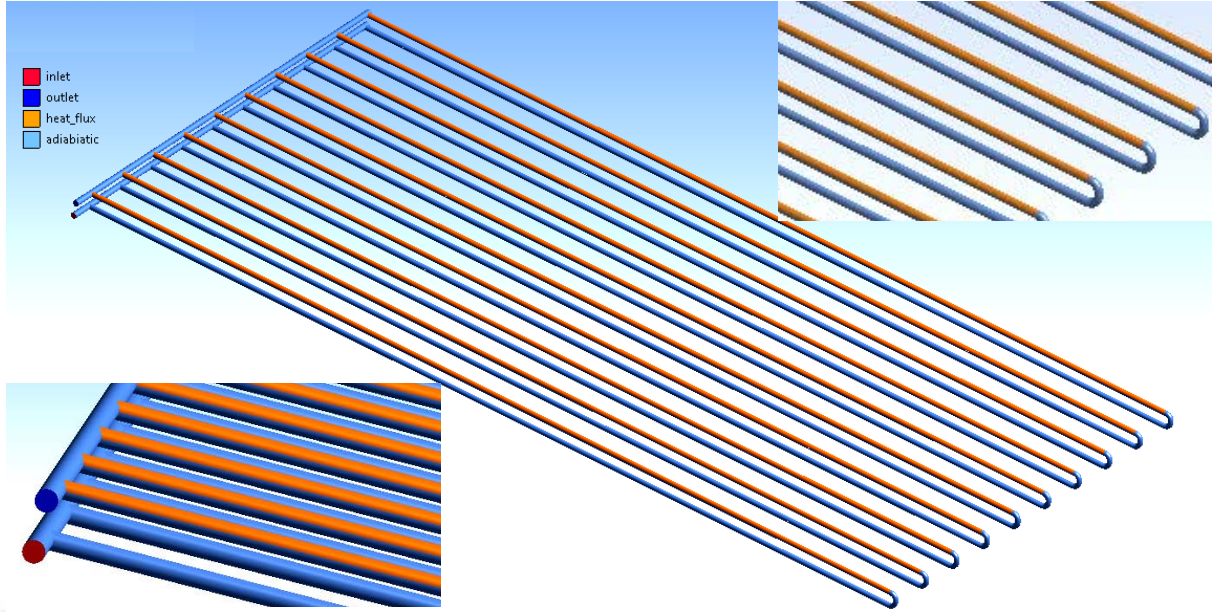
Modellenen U-tüplü güneş kolektörünün ısı ve kütle akışı ile sınır şartları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Güneş ışınımlarından U-tüplere ve U-tüplerden de içerisinde bulunan taşıyıcı akışkana ısı enerji aktarılır. Bu ısı aktarımıyla sıcaklığında artış meydana gelen akışkan, yoğunluğu azalacağı için U-tüpün çıkış manifolduna bağlı kolundan yukarıya manifolda doğru hareket eder. Giriş manifoldundan  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığında giren akışkanın yoğunluğu sıcaklığı yüksek olan akışkandan daha yüksek olduğundan dolayı U-tüplerin alt kolundan aşağı yönde akmaktadır. Analizleri yapılan bu sistemdeki akışın kaldırma etkileri (Buoyancy effect) *Boussinesq Yaklaşımı* kullanılarak dikkate alınmıştır.

Ele alınan U-tüplü güneş kolektörü  $30^{\circ}$  eğime sahiptir. Giriş manifoldunun girişinde *sabit kütleli debi* ( $\dot{m}$ ) ve çıkış manifoldunun da çıkışında *serbest çıkış* (*pressure outlet*) şartları analizlerde kullanılmıştır. Dikkate alınan kütleli debi

değerleri  $0.025 \text{ kg/s}$ ,  $0.050 \text{ kg/s}$ ,  $0.075 \text{ kg/s}$  olarak dahil edilmiştir. U-tüpler ve manifoldların dış yüzeyleri *duvar* olarak kabul edilmiştir. U-tüplerin alt ve üst borularının duvarları iki eşit parça olarak ele alınmıştır. Çıkış manifolduna bağlı olan kolun üst yarısı güneş ışınımına maruz kalan yani *sabit ısı akısı* koşulunun uygulandığı yüzey, alt yarısı ile çıkış manifolduna bağlı olan borunun da yüzeyleri *adyabatik* olarak tanımlanmıştır. Isı akısı olarak  $2960 \text{ W/m}^2$ ,  $3330 \text{ W/m}^2$  ve  $3700 \text{ W/m}^2$  alınmıştır. Giriş ve çıkış manifoldlarının da duvarları *adyabatik* olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.4: U-Tüp Güneş Kollektörünün Isı ve Kütle Akışı



Şekil 3.5: Sınır Şartları

### 3.4. Korunum Denklemleri

Kaldırma etkisini hesaplamımıza dahil etmek için Boussinesq Yaklaşımının kullanıldığı modelimizin analizleri, nümerik olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile yapılmıştır. Boussinesq Yaklaşımında, yoğunluk dışındaki tüm fiziksel ve taşınım özellikleri sabit olarak kabul edilir. Çözümlerimizde Sonlu Hacimler Metodunun kullanılacağı Süreklilik, Momentum ve Enerji Denklemleri aşağıda ifade edilmiştir.

Süreklilik Denklemi:

$$\rho_{nf} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.1)$$

Momentum Denklemleri:

x-Bileşeni

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

y-Bileşeni

$$u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = g_y \beta_{nf} (T - T_\infty) + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

z-Bileşeni

$$u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

Enerji Denklemi:

$$\rho_{nf} c_{nf} \left( u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $g$  yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Kaldırma etkisi (Buoyancy effect) Boussinesq Yaklaşımı kullanılarak ifade edilmiştir. Bu yaklaşım;

$$\rho_{nf} = \rho_{nf_0} [1 - \beta_{nf} (T - T_0)] \quad (3.6)$$

şeklinindedir. Denklem (3.6)'da  $\rho_0$  akışkanın sisteme girişindeki yoğunluğunu,  $\beta$  ısı genleşme katsayısını ve  $T_0$  ise akışkanın sisteme giriş sıcaklığını ifade etmektedir.

### 3.5. Nanoakışkan Modellemesi

U-tüplü güneş kolektöründe iş akışkanı olarak ele aldığımız su bazlı nanoakışkanların içerisinde bulunan nanopartiküllerin homojen dağılımı kabul edilmiş olup, nanoakışkanlar homojen model olarak kullanılmıştır. Temel akışkan suyun içerisinde farklı hacimsel oranlarda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Cu}$  nanopartikülleri mono veya hibrit olarak ele alınmıştır. Ele alınan nanoakışkanların termofiziksel özellikleri Tablo 3.3'de verilen denklemler (3.7-3.16) yardımıyla hesaplanmıştır.

**Tablo 3.3:** Nanoakışkan Termofiziksel Özellik Denklemleri

	Mono	Hibrit
Yoğunluk	$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s$ (3.7)	$\rho_{nf} = (1 - \varphi_1 - \varphi_2)\rho_f + \varphi_1\rho_{s_1} + \varphi_2\rho_{s_2}$ (3.12)
Isıl Kapasite	$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_s$ (3.8)	$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi_1 - \varphi_2)(\rho c_p)_f + \varphi_1(\rho c_p)_{s_1} + \varphi_2(\rho c_p)_{s_2}$ (3.13)
Viskozite [54]	$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}}$ (3.9)	$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi_1 - \varphi_2)^{2.5}}$ (3.14)
Isıl İletkenlik [55]	$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)}$ (3.10)	$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{(k_{s_1} + k_{s_2}) + 2k_f - 2\varphi_1(k_f - k_{s_1}) - 2\varphi_2(k_f - k_{s_2})}{(k_{s_1} + k_{s_2}) + 2k_f + \varphi_1(k_f - k_{s_1}) + \varphi_2(k_f - k_{s_2})}$ (3.15)
Isıl Genleşme Katsayısı [56]	$\beta_{nf} = \left[ \frac{1}{1 + \frac{(1 - \varphi)\rho_f}{\varphi\rho_s}} \frac{\beta_s}{\beta_f} + \frac{1}{1 + \frac{\varphi\rho_s}{(1 - \varphi)\rho_f}} \right] \beta_f$ (3.11)	$\beta_{nf} = \left[ \frac{1}{1 + \frac{(1 - \varphi_1 - \varphi_2)\rho_f}{(\varphi_1 + \varphi_2)(\rho_{s_1} + \rho_{s_2})}} \frac{\beta_{s_1} + \beta_{s_2}}{\beta_f} + \frac{1}{1 + \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)(\rho_{s_1} + \rho_{s_2})}{(1 - \varphi_1 - \varphi_2)\rho_f}} \right] \beta_f$ (3.16)

Ele alınan bu denklemler (3.7-3.16) ile mono ve hibrit nanoakışkanların termofiziksel özellikleri hesaplanmıştır. Yukarıdaki ifadelerden ‘ $\varphi$ ’ nanopartikül hacimsel oranını, ‘ $nf$ ’ alt indisi nanoakışkanı, ‘ $f$ ’ alt indisi temel akışkanı ve ‘ $s$ ’ alt indisi ise nanopartikülü belirtmektedir.

Tablo 3.4’de; Bakır (Cu), Silisyum-Oksit (SiO<sub>2</sub>) ve temel akışkan suyun hesaplamalarda kullandığımız termofiziksel özellik değerleri verilmiştir. Denklemler (3.7-3.16) ve Tablo 3.4’de verilmiş olan su ve nanopartiküllerin değerleri kullanılarak, Tablo 3.5’de verilmiş olan mono ve hibrit nanoakışkanlara ait termofiziksel özellikler hesaplanmıştır. Tablo 3.5 incelendiğinde; temel akışkana dahil edilen nanopartikül miktarının artması ile yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve viskozite değerleri artmaktayken, özgül ısı ve ısıl genleşme katsayısı değerleri ise azalmaktadır. Tablo 3.5’de gösterilen termofiziksel özelliklerden nanopartiküllerin suya ve birbirlerine göre yüksek olan özelliklerinin değerleri, temel akışkana dahil edilen nanopartikül miktarı arttıkça mono yada hibrit nanoakışkanda da beklenildiği gibi ilgili değerler yükselmektedir. Buna karşın; nanopartiküllerin suya ve birbirlerine göre düşük olan değerleri, nanopartikül miktarı arttıkça yine beklenildiği gibi nanoakışkanın bu değerleri düşmektedir.

**Tablo 3.4:** Temel Akışkan ve Nanopartiküllerin Termofiziksel Özellikleri

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kgK)	$k$ (W/mK)	$\mu$ (kg/ms)	$\beta$ (1/K)
<b>Su</b>	998.78	4081.9	0.59678	0.001108	0.00347040
<b>Cu</b>	8933	385	401	-	0.00001670
<b>SiO<sub>2</sub></b>	2220	745	1.4	-	0.00000065

**Tablo 3.5:** Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

$\phi$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kgK)	$k$ (W/mK)	$\mu$ (kg/ms)	$\beta$ (1/K)
<b>0.01SiO<sub>2</sub>+0.02Cu</b>	1169.6766	3453.8911	0.6331	0.001196	0.002876
<b>0.02SiO<sub>2</sub>+0.01Cu</b>	1102.5466	3647.9932	0.6148	0.001196	0.003050
<b>0.02SiO<sub>2</sub>+0.03Cu</b>	1261.2310	3178.9008	0.6518	0.001260	0.002613
<b>0.03SiO<sub>2</sub>+0.02Cu</b>	1194.1010	3342.6613	0.6331	0.001260	0.002759
<b>0.03Cu</b>	1236.8066	3280.8595	0.6519	0.001196	0.002718
<b>0.03SiO<sub>2</sub></b>	1035.4166	3867.2641	0.6136	0.001196	0.003247
<b>0.05Cu</b>	1395.4910	2898.6459	0.6906	0.001260	0.002360
<b>0.05SiO<sub>2</sub></b>	1059.8410	3732.4175	0.6249	0.001260	0.003107

#### 4. MODEL DOĞRULAMA

Nümerik çalışma ile deneysel çalışmanın maliyeti düşürülür ve istenilen bir noktada istenilen bir parametrenin değeri hesaplanabilir ve karşılaştırmalar rahatlıkla yapılabilir. Bu durum nümerik çalışmanın bizlere sağlamış olduğu çok büyük bir avantaj ve kolaylıktır. Ele alınmış modelleme çalışmalarının nümerik çözümlerinde bir sonuç mutlaka elde edilir. Fakat elde edilen bu sonucun mühendislik açısından değerlendirilebilmesi için mümkünse deneysel yada doğruluğu kanıtlanmış başka bir nümerik çalışma ile doğrulaması mutlaka yapılmalıdır.

Biz de ele aldığımız modelin değerlendirmesini yapmadan önce doğrulamalarını hem deneysel hem de kabul edilmiş nümerik çalışmalar üzerinden yaparak, sonuçlarımızın güvenilirliğini ortaya koyduk. Doğrulama için bazı kullandığımız değerleri Tablo 4.1’de gösterdik [12,24]. Doğrulamada ele alınan durumlardan birisi Ayala ve arkadaşlarının [12] yaptıkları deneysel çalışma ve bu deneysel çalışma ile karşılaştırdıkları iki çeşit nümerik hesaplamaların sonuçlarını karşılaştırmak oldu. Tablo 4.2 [24,29] incelendiğinde çalışmamızda kullandığımız matematiksel modelleme ile elde ettiğimiz sonuçların deneysel verilere diğer nümerik modellemedeki sonuçlara göre çok daha iyi bir yaklaşım gösterdiğini görebiliriz. Ayrıca Denklem 4.1’de gösterilen ısı verim denkleminde yararlanarak; Şekil 4.1’de [24] Ayala ve arkadaşlarının [12] yapmış olduğu deneysel ve nümerik sonuçların verim değerleri ile bizim ele aldığımız modelin sonuçları ile elde ettiğimiz verim değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.3’den de açıkça görüleceği üzere deneysel sonuçlardan elde edilmiş ısı verim değerlerine bizim modelimizin yakınsaması çok daha iyi olmuştur.

Ayrıca ele alınan modelin doğrulanması için başka deneysel ve nümerik çalışmalar ile de karşılaştırmalar yaptık. Bu çalışmalardan Barozzi ve arkadaşları [49] tarafından yapılan deneysel çalışma, birçok nümerik çalışmanın doğrulanması için referans olmuştur. Şekil 4.2’den de [52] görüleceği üzere kullanılan nümerik modelin doğrulaması kolektörün belirli bir bölümünü alan deneysel bir çalışma ile yapılmıştır. Doğrulama için  $726 \text{ W/m}^2$  ile  $2629 \text{ W/m}^2$  değerleri için karşılaştırma yapılmıştır. Nusselt sayısının boru boyunca değişimine göre yapılan karşılaştırmada



ele aldığımız modelin iyi bir yakınsama gösterdiğini görmekteyiz. Kullandığımız modelin bir diğer doğrulaması Petukhov B.S. [50]'nin deneysel bir çalışması ile yapılmıştır. Ayrıca Ouzzane M. ve Galanis N. [51]'nin sayısal çalışmalarında elde ettikleri sonuçlarda modelimizi doğrulamada karşılaştırma amaçlı ele alınmıştır. Bu iki çalışmada da yatay bir borudaki sabit ısı akısı altındaki ısı performans etkileri incelenmiştir. Bu deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile bizim ele aldığımız modelden hesaplanan sonuçlar Şekil 4.3'de [52] karşılaştırılmış ve özellikle tam gelişmiş bölgede hesaplanan değerlerin iyi bir yakınsama gösterdiğini söyleyebiliriz.

**Tablo 4.1:** Çevresel ve Başlangıç Koşulları

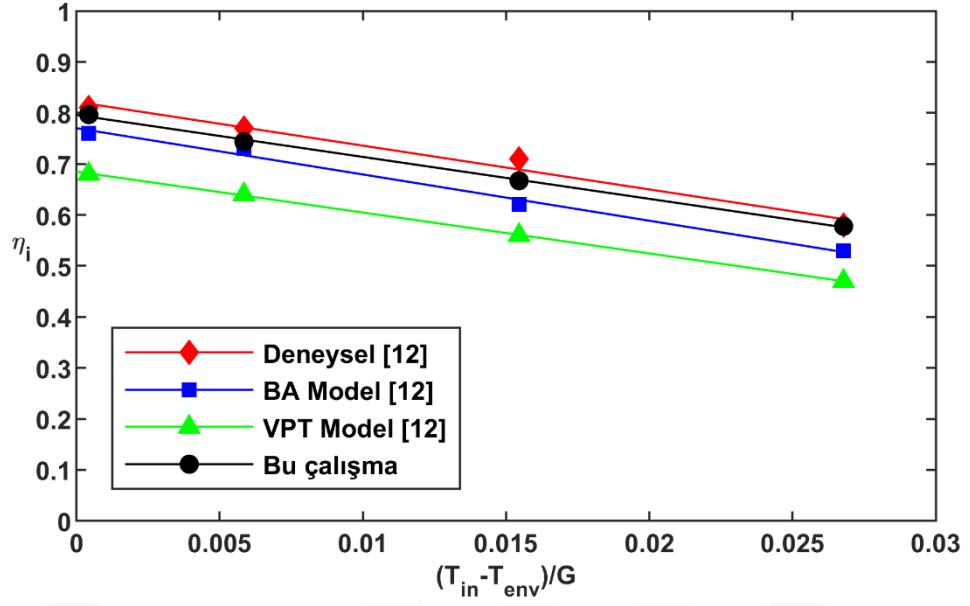
Test	G (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>env</sub> (°C)	T <sub>in</sub> (°C)
1	935.0	27.5	27.9
2	1060.8	26.7	32.9
3	1009.5	24.8	40.4
4	899.9	22.6	46.7

Termal güneş kolektörü verimliliği, Denklem 4.1'deki  $\eta_i$  ile hesaplanabilir [53].

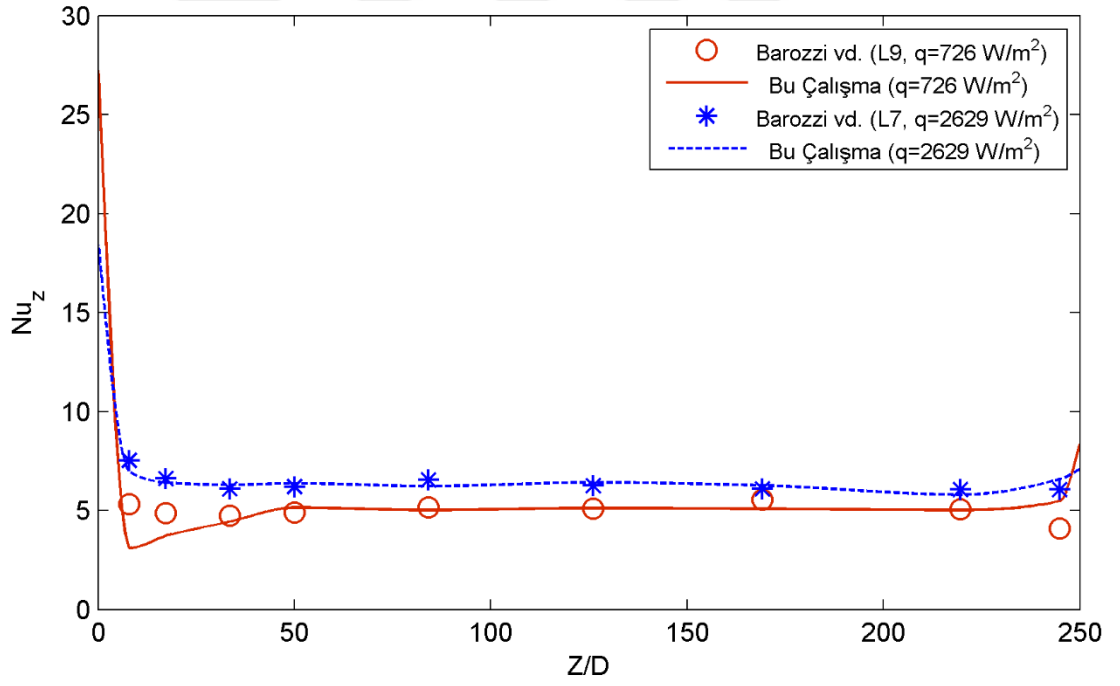
$$\eta_i = \frac{\dot{m}c(T_{out}-T_{in})}{A_c G} \quad (4.1)$$

**Tablo 4.2:** Çalışmanın Doğrulanması

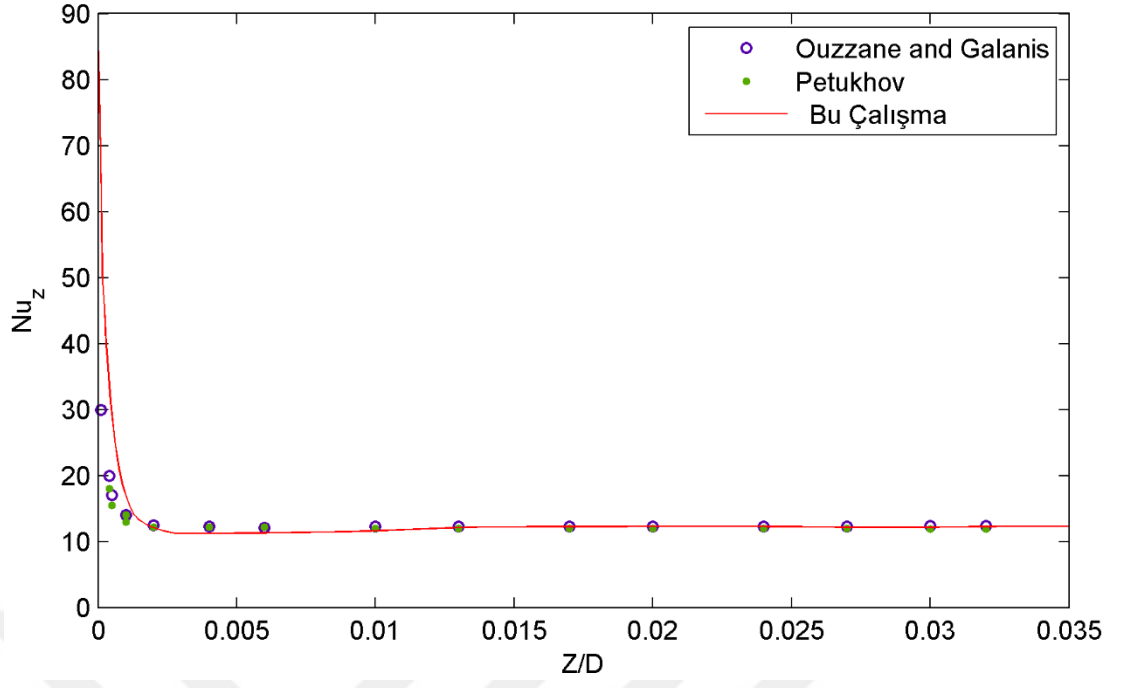
Test	T <sub>in</sub>	T <sub>out, exp.</sub> (°C)	T <sub>out, BA</sub> (°C)	T <sub>out, VPT</sub> (°C)	T <sub>out, bu</sub> (Bu Çalışma) (°C)	% Fark (BA-Model)	% Fark (VPT-Model)	% Fark (Bu Çalışma)
1	27.9	36.70	35.37	33.75	<b>35.91</b>	3.62	8.04	<b>2.15</b>
2	32.9	41.80	41.03	39.20	<b>41.38</b>	1.84	6.22	<b>1.00</b>
3	40.4	48.50	47.01	45.80	<b>47.64</b>	3.07	5.57	<b>1.77</b>
4	46.7	52.50	51.80	50.82	<b>52.29</b>	1.33	3.20	<b>0.40</b>



Şekil 4.1: ETSC Verimliliği



Şekil 4.2: Deneysel Sonuçlar ile Doğrulama



Şekil 4.3: Deneysel ve Nümerik Sonuçlar ile Karşılaştırma

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

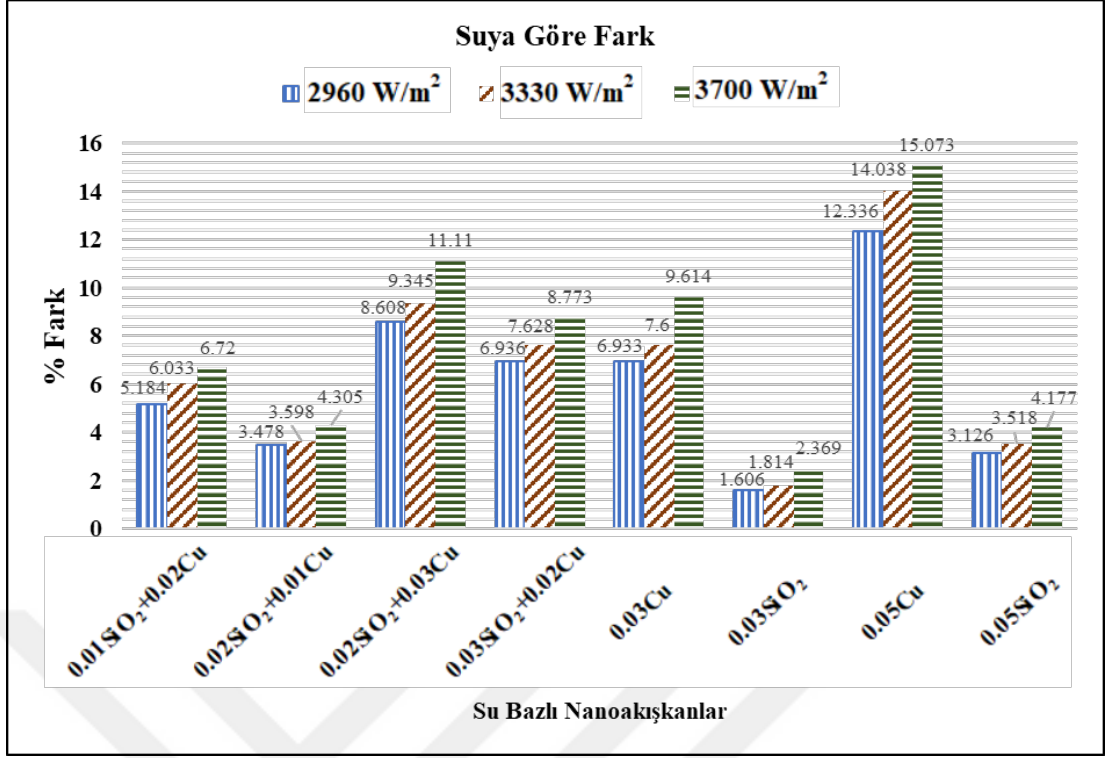
Tablo 5.1’de farklı hacimsel oranlarda mono ve hibrit olarak SiO<sub>2</sub> ve Cu nanopartiküllerini içeren nanoakışkanların kollektör açısının 30° ve akış debisinin 0.025kg/s olması durumu için manifold çıkış sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. Ayrıca karşılaştırmalarda 2960 W/m<sup>2</sup>, 3330 W/m<sup>2</sup> ve 3700 W/m<sup>2</sup> ısı akılarının da etkileri incelenmiştir. Tablo 5.1’den görüleceği üzere nanopartikül oranı arttıkça ısı transferi artmakta ve nanopartiküllerden de Cu nanopartikül etkisinin daha yüksek olduğunu manifold çıkış sıcaklıklarından net olarak görebilmekteyiz. Cu nanopartikülüne göre daha hafif olan SiO<sub>2</sub> nanopartikülü ile belli miktarlarda Cu nanopartikülü ile birlikte karıştırılarak oluşturulmuş hibrit nanoakışkanında ısı transfer kabiliyetini arttırdığını görmekteyiz.

**Tablo 5.1:** Manifold Çıkış Sıcaklıkları (Debi: 0.025kg/s)

Akışkan	Isı Akısı (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>out</sub> (°C)
<b>H<sub>2</sub>O</b>	2960	25.005457
	3330	26.107935
	3700	27.075781
<b>(0.01SiO<sub>2</sub>+0.02Cu)-H<sub>2</sub>O</b>	2960	26.301721
	3330	27.683130
	3700	28.895227
<b>(0.02SiO<sub>2</sub>+0.01Cu)-H<sub>2</sub>O</b>	2960	25.875055
	3330	27.047296
	3700	28.241388
<b>(0.02SiO<sub>2</sub>+0.03Cu)-H<sub>2</sub>O</b>	2960	27.157953
	3330	28.547632
	3700	30.083765
<b>(0.03SiO<sub>2</sub>+0.02Cu)-H<sub>2</sub>O</b>	2960	26.739771
	3330	28.099146
	3700	29.451166
<b>0.03Cu-H<sub>2</sub>O</b>	2960	26.739008
	3330	28.092218
	3700	29.678827
<b>0.03SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O</b>	2960	25.407159

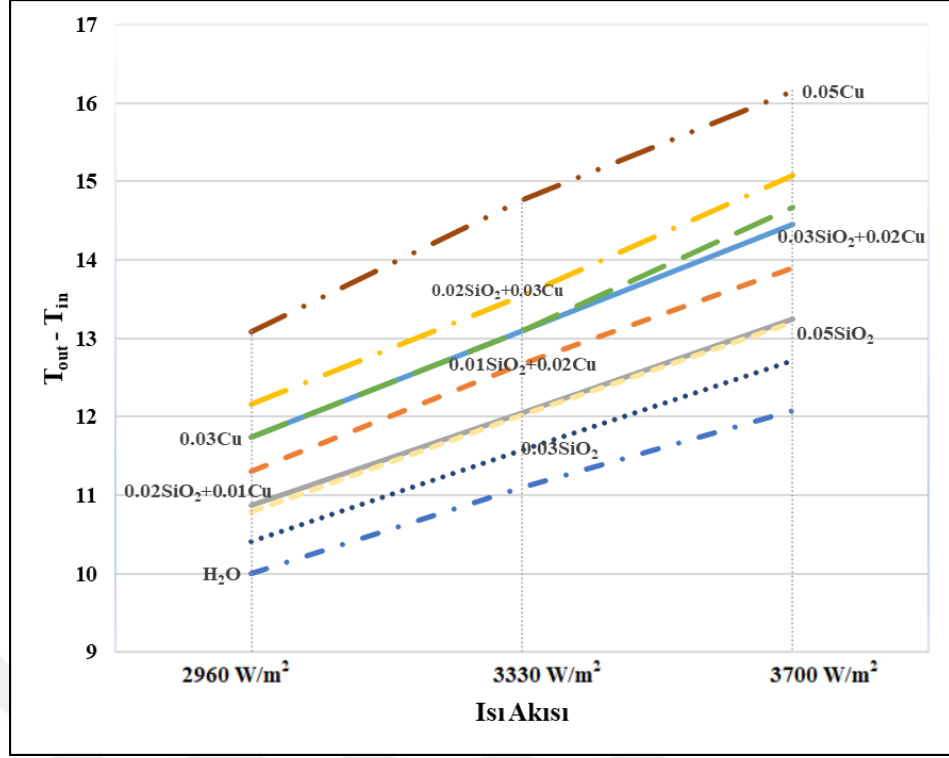
	3330	26.581537
	3700	27.717310
<b>0.05Cu-H<sub>2</sub>O</b>	2960	28.090143
	3330	29.772974
	3700	31.156789
<b>0.05SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O</b>	2960	25.787012
	3330	27.026514
	3700	28.206689

Şekil 5.1’de mono ve hibrit tip nanoakışkanların ısı performans etkileri gösterilmiştir. Isıl kabiliyeti daha yüksek olan Cu nanopartikülü ile hafif olan SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün birlikte ve tek tek temel akışkan su içerisinde kullanılmaları durumunda suya göre ısı performans etkileri karşılaştırılmıştır. Nanopartiküllerin mono kullanımlarındaki oranları da karşılaştırmayı daha doğru yapabilmek için hibrit kullanımdaki hacimsel oranlara uygun olarak alınmıştır. Bu durumda hacimsel oranlar %3 ve %5 olarak ele alınmış durumdadır. Şekil 5.1’den de görüleceği üzere ısı akısı arttıkça Cu nanopartikülünün etkisi çok daha fazla artmaktadır, çünkü ısı kabiliyeti yüksek olması sebebiyle ısı emilimi artmaktadır. SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün mono ve Cu nanopartikülü ile hibrit kullanımı gösterilerek, hafifliğinden kaynaklı olarak çökelme problemlerinin önüne geçmek amacıyla kullanıldığından ısı performans etkisi gösterilmiştir. Suyu göre ısı performans oldukça önemli katkısı olduğunu da görmekteyiz. Nanopartikül kullanımı ile ısı performansın yaklaşık olarak %1.6 ile %15 arasında arttığı tespit edilmiştir.

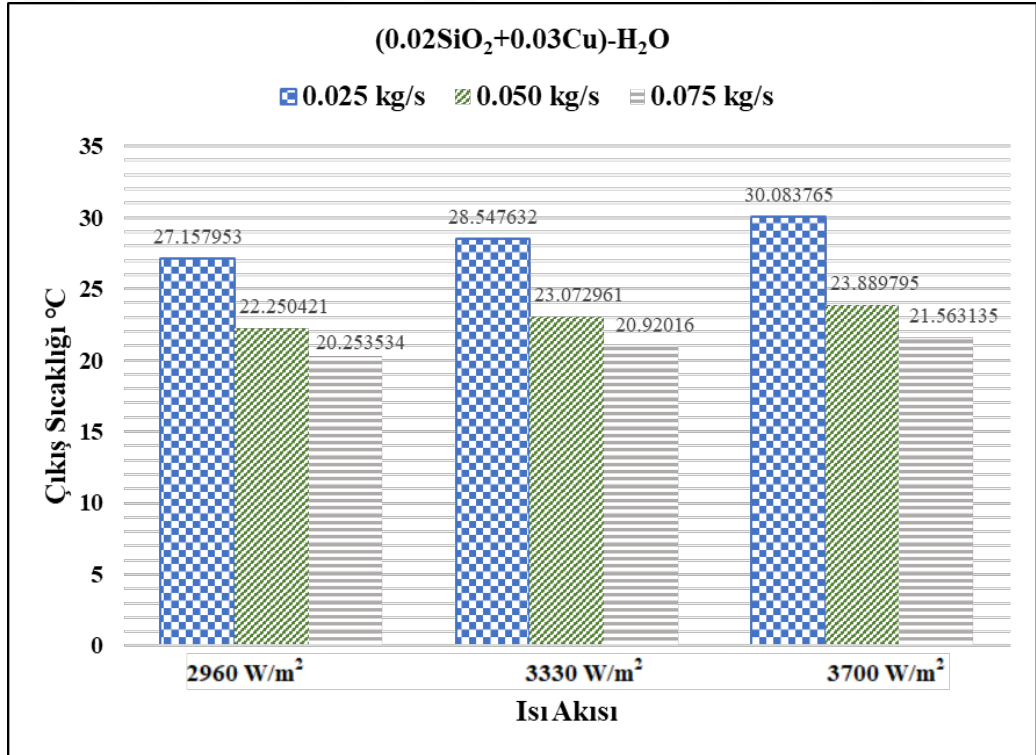


**Şekil 5.1:** Nanoakışkan Tiplerinin Isıl Performansa Etkisi.

Şekil 5.2’de çıkış ve giriş sıcaklık farklarına ısı akısının etkisi farklı hacimsel oranlarda nanopartikül barındıran mono ve hibrit nanoakışkanları için incelenmiştir. Manifold çıkış-giriş sıcaklık farkları ısıl performansı öngörmek ve karşılaştırabilmek için en doğru parametrelerden birisidir. Buradan da görüleceği gibi ısı akısı arttıkça sıcaklık farkı da artmaktadır. Ayrıca temel akışkan su, nanoakışkanlara göre daha düşük sıcaklık farkına sahiptir. Nanoakışkanlardan %3 hacimsel oranında SiO<sub>2</sub> nanopartikülü barındıran SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O nanoakışkanı sudan sonra en düşük ısıl performansa sahiptir. Ardından düşüğe göre sırasıyla (0.05SiO<sub>2</sub>)-H<sub>2</sub>O, (0.05SiO<sub>2</sub>)-H<sub>2</sub>O, (0.02SiO<sub>2</sub>-0.01Cu)-H<sub>2</sub>O, (0.01SiO<sub>2</sub>-0.02Cu)-H<sub>2</sub>O, (0.03SiO<sub>2</sub>-0.02Cu)-H<sub>2</sub>O, (0.03Cu)-H<sub>2</sub>O, (0.02SiO<sub>2</sub>-0.03Cu)-H<sub>2</sub>O ve (0.05Cu)-H<sub>2</sub>O nanoakışkanları gelmektedir. Şekil 5.3’de (0.02SiO<sub>2</sub>-0.03Cu)-H<sub>2</sub>O nanoakışkanı ele alınarak kütleli debi ve ısı akısının manifold çıkış sıcaklığına etkileri incelenmiştir. Isı akısının artmasıyla manifold çıkış sıcaklığının arttığını ve akış debisinin de arttıkça çıkış sıcaklığının azaldığını görmekteyiz. Burada çıkış sıcaklığı karşılaştırmasıyla elde edilen sonuçlar diğer nanoakışkanlar içinde benzer davranışı göstermektedir.

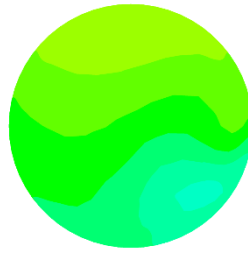


Şekil 5.2: Farklı Isı Akılarına Göre Nanoakışkan Türlerinin Sıcaklık Artışına Etkileri

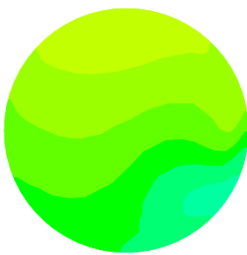


Şekil 5.3: Farklı Isı Akılarına ve Akış Debilerine Göre Çıkış Sıcaklıkları.

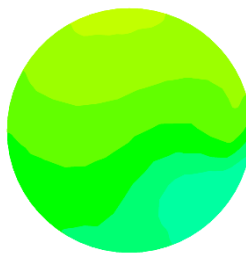
Şekil (5.4-5.6)'da sıcaklık dağılımları ve Şekil (5.7-5.9)'da da streamline yapıları çıkış manifoldunun çıkış yüzeyinden alınmış bir kesit üzerinde gösterilmiştir. Isı akısı ile sıcaklığı yükselen akışkanın yoğunluğu azalmakta ve bundan dolayı kaldırma kuvvetinin etkisiyle sıcaklığı yükselen akışkan manifoldun üst yüzeyine yakındır. Daha düşük sıcaklıktaki akışkan ise kademe kademe alt yüzeye doğru dağılmaktadır. Sıcaklığı en düşük, yoğunluğu yüksek olan akışkan manifoldun alt yüzeyinden çıktığını alınan kesitteki dağılımdan açık bir şekilde görmekteyiz. Streamlinelardan da görüleceği üzere U-tüplerin manifolda giriş bölgelerinde hız profilinin daha düşük ancak manifoldun diğer bölgelerinde daha düzenli bir akış gerçekleşerek manifoldtan çıktığını görmekteyiz. Isı akısı arttıkça sıcaklık değerlerinin yükseldiğini ve diğer taraftan debinin de arttıkça sıcaklık değerlerinin azaldığını kesit alınan çıkış yüzeyindeki sıcaklık dağılım profilinden gözlemlemekteyiz. Temel akışkan içerisindeki nanopartikül durumlarına baktığımızda da hibrit nanoakışkanda ki Cu nanopartikül oranı arttıkça sıcaklık dağılımının daha yüksek olduğunu ancak buna karşın SiO<sub>2</sub> nanopartikül oranı arttıkça da streamline profilinden görüleceği üzere daha rahat bir akış gerçekleşmektedir. Bu durum Cu nanopartikülü ile sıcaklığın daha yükseltileceğini, SiO<sub>2</sub> nanopartikülü ile de daha rahat bir akış gerçekleşerek çökelme sorunlarının azalacağını bize göstermektedir.



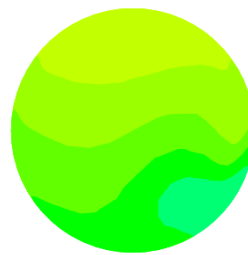
(a) Su



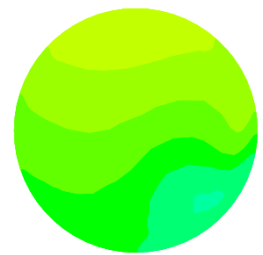
(b) 0.01SiO<sub>2</sub>+0.02Cu



(c) 0.02SiO<sub>2</sub>+0.01Cu

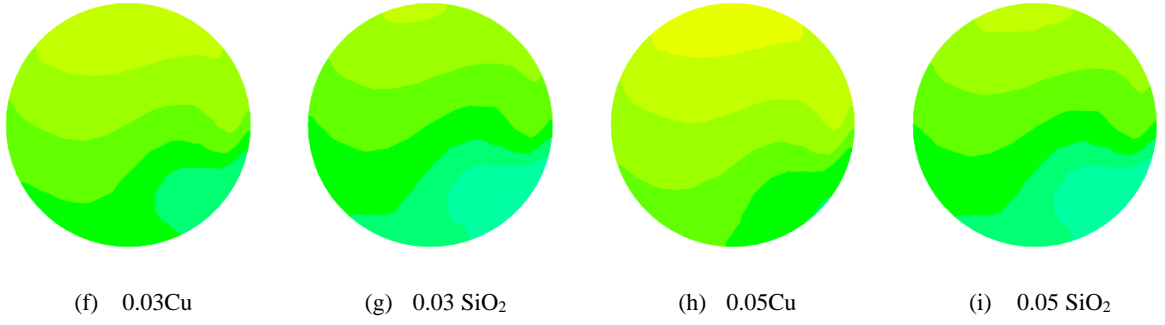


(d) 0.02SiO<sub>2</sub>+0.03Cu

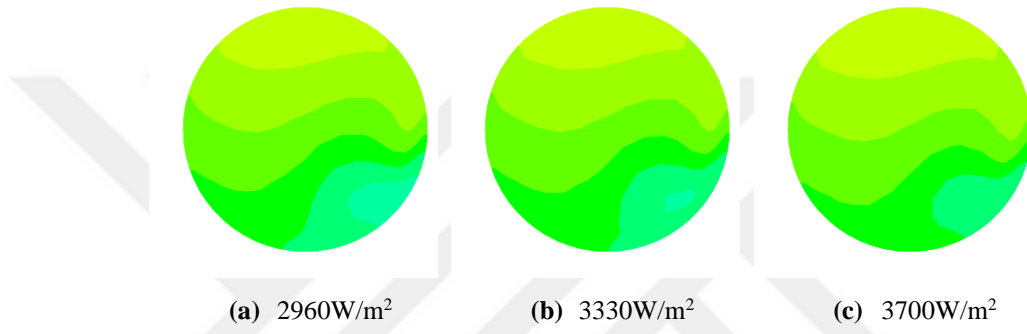


(e) 0.03SiO<sub>2</sub>+0.02Cu

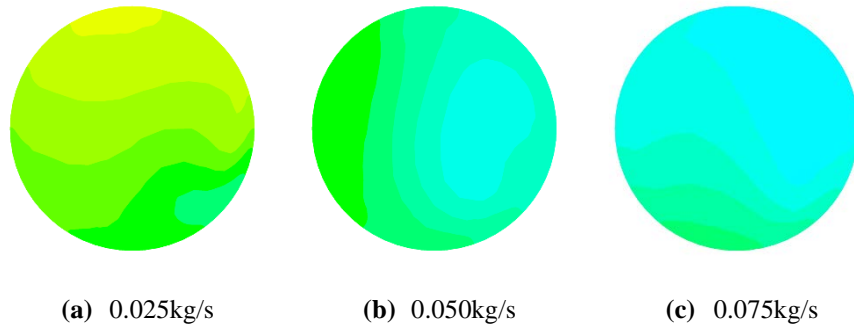




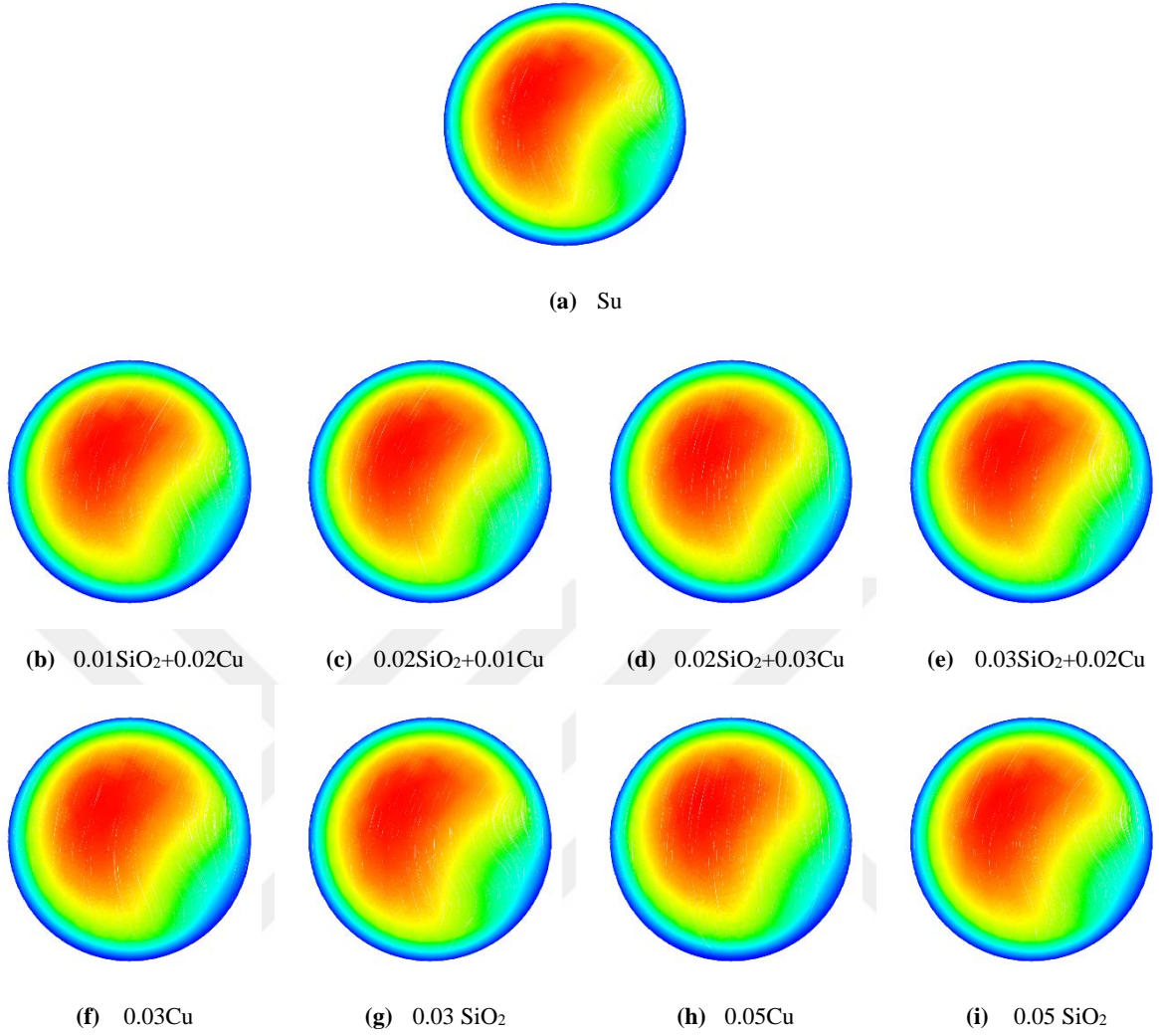
**Şekil 5.4:** Manifold çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı ( $3330\text{W/m}^2$ ,  $0.025\text{kg/s}$ )



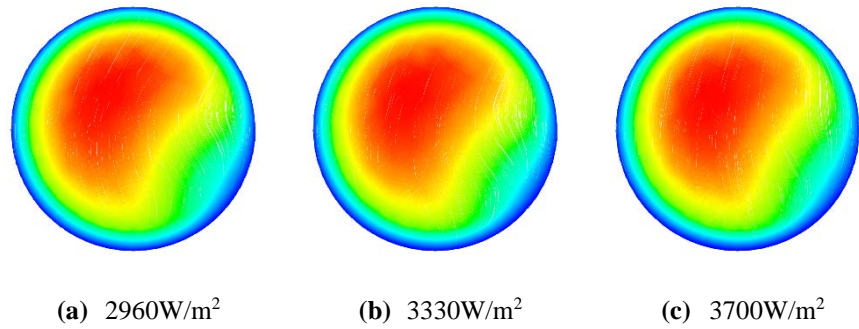
**Şekil 5.5:** Manifold çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı ( $0.03\text{SiO}_2+0.02\text{Cu}$ ,  $0.025\text{kg/s}$ )



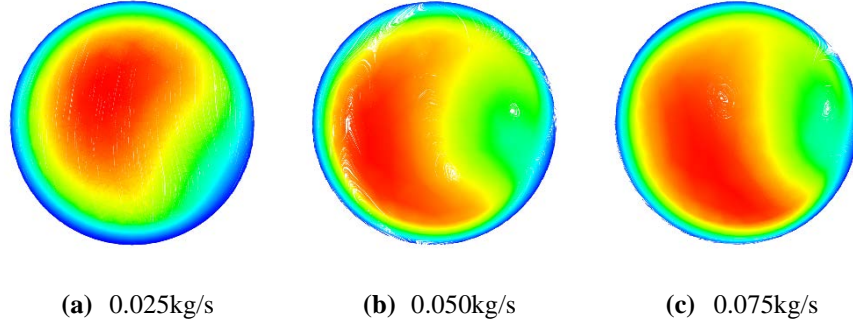
**Şekil 5.6:** Manifold çıkış yüzeyi sıcaklık dağılımı ( $0.02\text{SiO}_2+0.03\text{Cu}$ ,  $3700\text{W/m}^2$ )



**Şekil 5.7:** Manifold çıkış yüzeyi streamline ( $3330\text{W/m}^2$ ,  $0.025\text{kg/s}$ )



**Şekil 5.8:** Manifold çıkış yüzeyi streamline ( $0.03\text{SiO}_2+0.02\text{Cu}$ ,  $0.025\text{kg/s}$ )

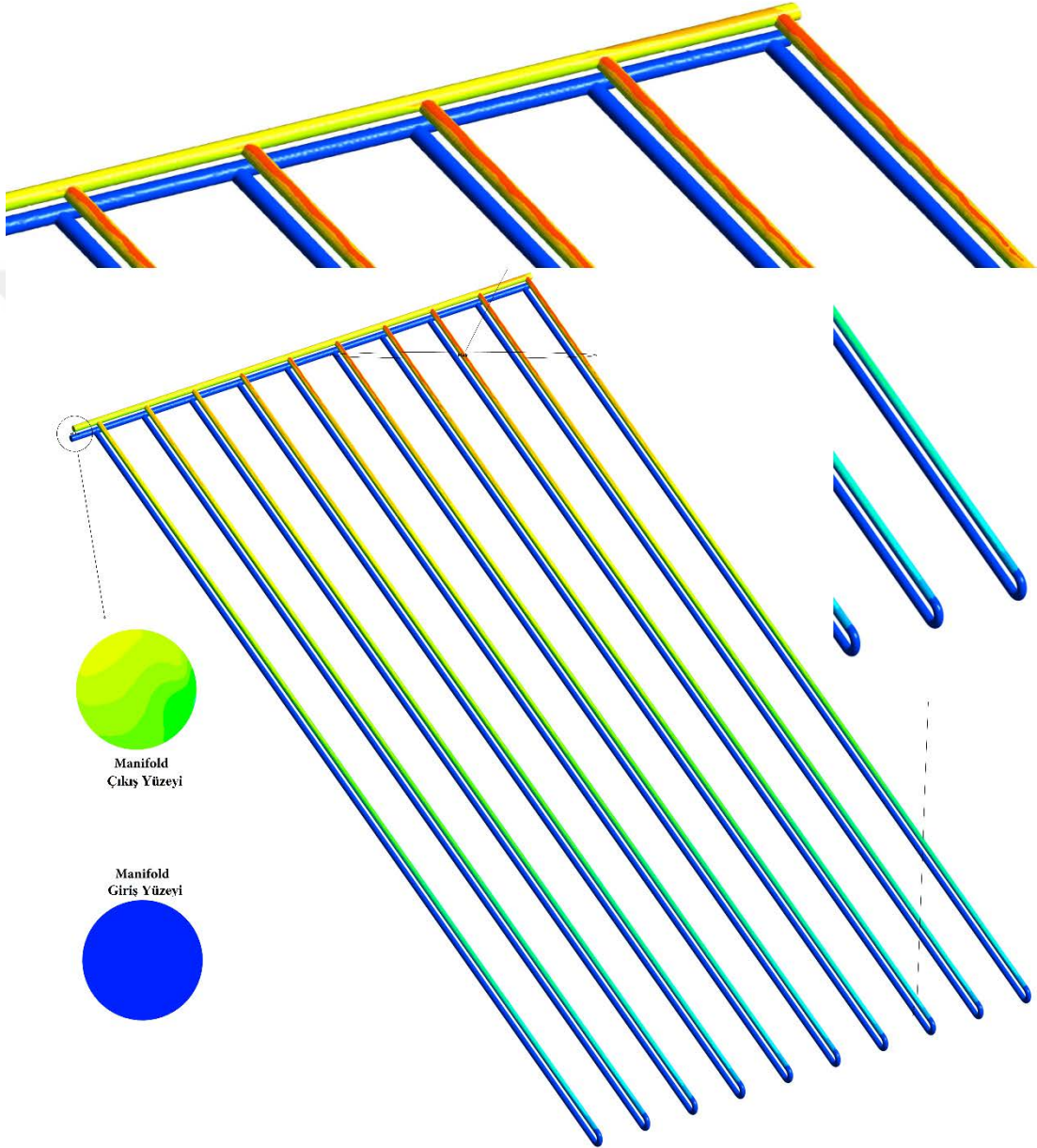


**Şekil 5.9:** Manifold çıkış yüzeyi streamline (0.02SiO<sub>2</sub>+0.03Cu, 3700W/m<sup>2</sup>)

Şekil 5.10'da %5 Cu nanopartikülü barındıran 0.025kg/s debisinde ve 3700 W/m<sup>2</sup> ısı akısı için tüm U-tüp kollektör sisteminin sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Diğer nanoakışkanlar da yada su içinde tüm sistemdeki sıcaklık dağılımı benzerdir. Burada U-tüpler ve çıkış manifoldu üzerindeki sıcaklık dağılımını göstermek amaçlanmıştır. Diğer parametrelere göre karşılaştırmalar üstte verilen diğer şekiller ile çok daha net olarak ifade edilmiştir. Giriş ve çıkış yüzeyleri tarafındaki 1. U-tüp ve diğer tarafa doğru 10 adet U-tüp mevcuttur. Görüldüğü gibi giriş yüzeyinden sonra akışkan U-tüplere dağılmaya başladığından dolayı 1.U-tüpten 10. U-tüpe doğru ilerlerken hızı azalacağından dolayı 10. U-tüpe doğru ısı akısı akışkan tarafından daha iyi soğurulmaktadır. Bundan dolayı da 10. U-tüpe doğru gittikçe tüpler üzerindeki sıcaklık dağılımının daha yüksek olduğunu görmekteyiz. Burada da kaldırma etkilerinden kaynaklı olarak sıcaklığı yüksek yani yoğunluğu azalan akışkanın tüplerde yukarı yani manifolda doğru, sıcaklığı düşük olanın yoğunluğu yüksek olduğundan dolayı tüplerde aşağı kısımlarda olduğunu görürüz. Yani kaldırma etkisiyle U-tüpe gelen düşük sıcaklıktaki akışkan gelen ısı akısını soğurarak sıcaklığı yükselmekte ve yoğunluğu azalmaktadır ve böylece u-tüplerden üst kola doğru yani çıkış manifolduna doğru yönelmektedir. Bu prensiple akış gerçekleşerek sistem çalışmaktadır. Bu durum hem sistemin çalışma prensibi hem de Boussinesq Yaklaşımının etkisini görmemizi sağlar.

U-tüplerdeki dağılımı gözlemlediğimizde her bir tüpün sıcaklık dağılımının ve dolayısıyla hız dağılımının farklı olduğunu görmekteyiz. Fakat buradaki dağılıma bakarak U-tüpleri ayrı ayrı değerlendirmek hatalı bir yaklaşım olur. Ele alınan

sistemdeki tüm U-tüplerin ayrı ayrı akışkanın sıcaklık durumuna ve sistemin hidrodinamik yapısına katkısı vardır. Bu durumdan dolayı ele alınan sistemi değerlendirmek için çıkış manifoldunun çıkış yüzeyinde duruma göre değerlendirmek çok daha uygun bir yaklaşım olacaktır. Çünkü çıkış yüzeyinde tüm sistemin yani tüm U-tüplerin ve manifoldların etkisinin sonucunu alırız.

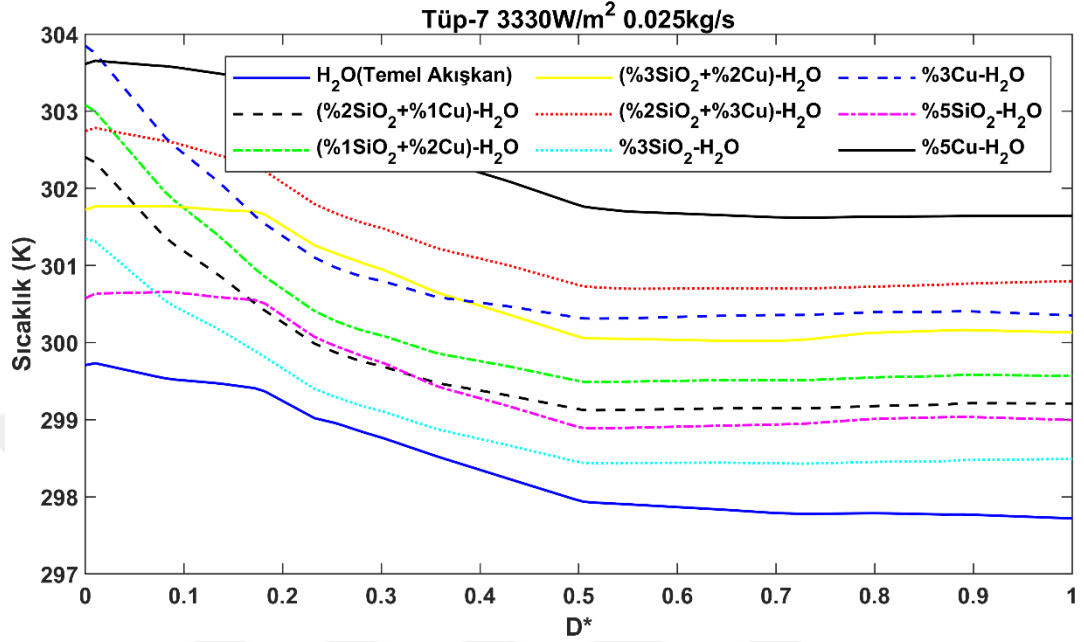


**Şekil 5.10:** U-Tüp Kollektör Sıcaklık Dağılımı

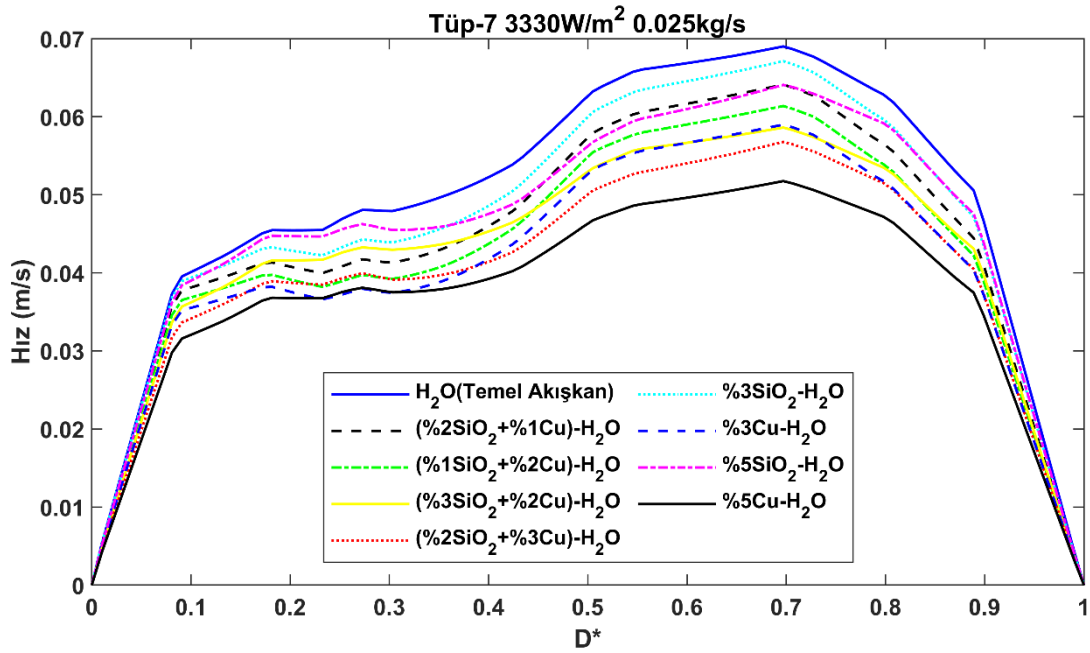
10 adet U-tüp yer alan sistemimizdeki belirli tüpler dikkate alınmış ve boyutsuzlaştırılmış normalize tüp çapı ( $D^*$ ) ile normalize manifold uzunluğuna ( $L^*$ ) göre hız ve sıcaklık profilleri Şekil (5.11-5.24)'de gösterilmiştir. Bu şekiller ile sistemin ısıl ve hidrodinamik durumu net bir şekilde incelenmiş, önceki belirtilen kanılar, sıcaklık ve hız profilleri ile desteklenmiştir. Aynı zamanda sıcaklık ve hız profillerinin birbirlerine göre durumlarını da incelediğimizde varılan kanıları destekleyici niteliktedir. Burada sistemdeki 10 adet U-tüpten dördü ele alınmıştır. Karşılaştırmalar bu U-tüplerden 1., 4., 7. ve 10. tüp ele alınarak yapılmıştır. Tank girişi tarafındaki ilk tüpe tüp-1 ve sonra sırasıyla tüp-10'a kadar adlandırma yapılmıştır. Aynı zaman da bu grafikler ile U-tüplerin yanısıra farklı nanopartiküllerin ve farklı akışkanların hız ve sıcaklık profilleri de incelenmiştir. Bu incelemelerde ısı akısı ve kütsel debi etkileri de gözlemlenmiştir.

Şekil 5.11'de nanoakışkan tipine ve nanopartikül hacimsel oranına göre 7. tüpten çıkış manifolduna geçişin olduğu bölgedeki sıcaklık dağılımından da görüleceği üzere nanopartikül hacimsel oranı arttıkça ve Cu nanopartikülü miktarı arttıkça ısıl kabiliyetin arttığını görmekteyiz. Şekil 5.12'den de görüleceği üzere hız profili de sıcaklık durumunun tam tersi şekilde nanopartikül oranı arttıkça azalmaktadır. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de U-tüplere göre sıcaklık ve hız profilleri, (%2SiO<sub>2</sub>+%3Cu)-H<sub>2</sub>O nanoakışkanı ve 3330W/m<sup>2</sup> ile 0.025kg/s değerleri için gösterilmiştir. Tüm nanoakışkanlar için göstermek çalışmada gereksiz kalabalık yapacağından dolayı yalnızca bir akışkana göre gösterilmiştir. Çünkü burada tüplerin birbirlerine göre ısıl ve hidrodinamik durumları kıyaslanmaktadır. Tüplerin birbirlerine göre sergileyecekleri profiller tüm akışkanlar için aynıdır. Şekillerden de görüleceği üzere girişten uzaklaştıkça yani 1. tüpten 10. tüpe doğru sıcaklıkta artış ve hızda da azalma olmaktadır. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da da debiye göre 7. ve 10. U-tüplerin sıcaklık ve hız profilleri incelenmiştir. 10. Tüpten çıkış manifolduna geçişte sıcaklık 7. tüpe göre daha yüksek ve hız da daha düşüktür. Debi arttıkça da sıcaklığın azaldığını sıcaklık profilinden, hızın da arttığını hız profilinden açıkça görmekteyiz. Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de de ısı akısına göre (2960W/m<sup>2</sup>, 3330W/m<sup>2</sup> ve 3700W/m<sup>2</sup>) sıcaklık ve hız profilleri karşılaştırılmıştır. Isı akısı arttıkça beklenildiği gibi sıcaklığın artış gösterdiğini görmekteyiz. Hızın 10. tüpte 7. tüpe göre daha düşük

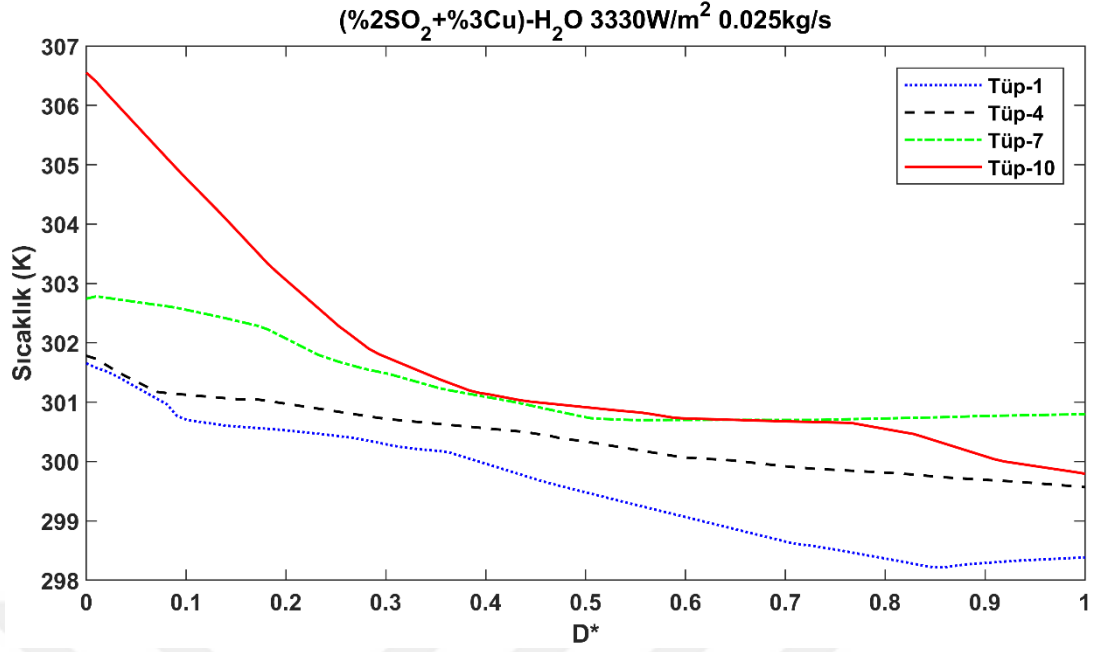
olduğunu da görmekteyiz. Sistemin girişinden uzaklaştıkça hızında düşüş olduğu burada da gözlenmiştir.



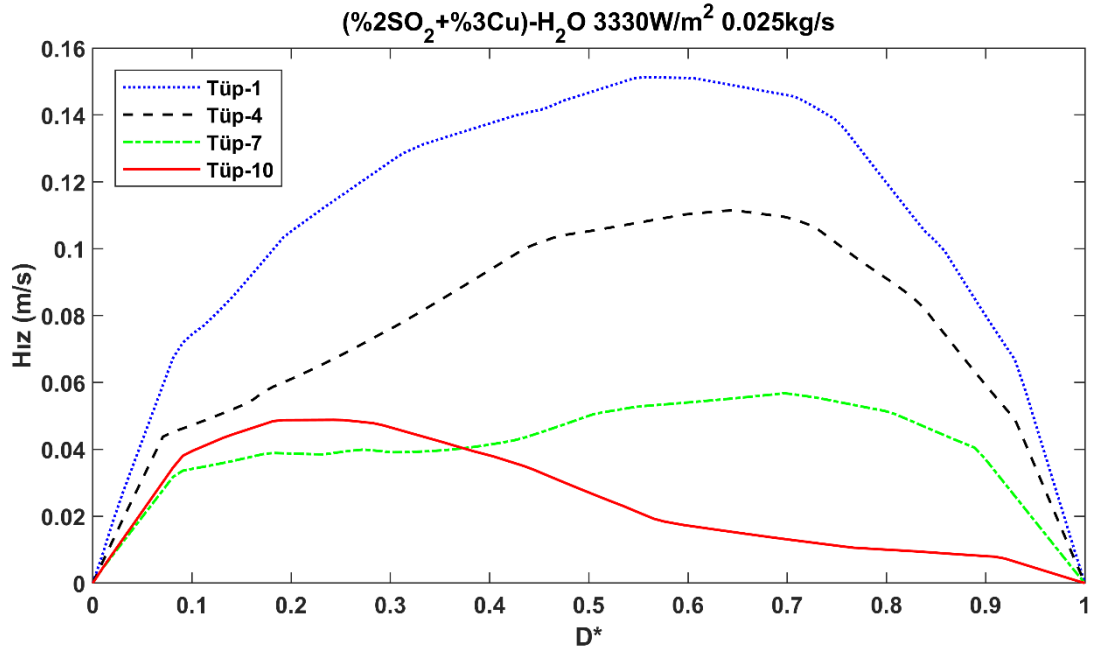
Şekil 5.11: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Akışkana Göre Sıcaklık Profili



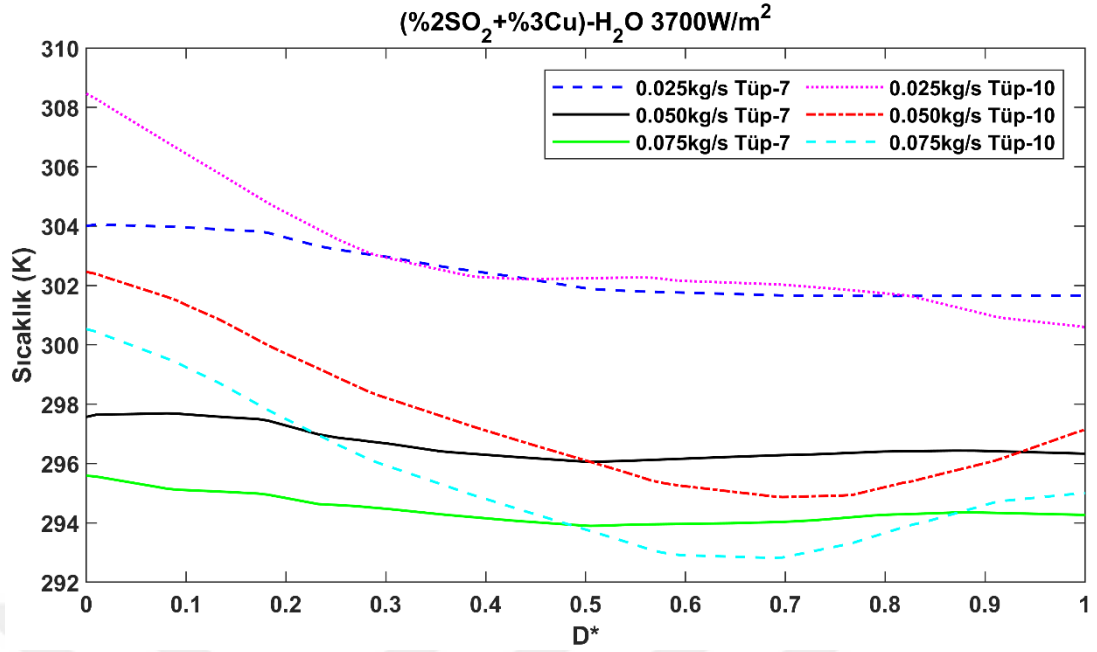
Şekil 5.12: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Akışkana Göre Hız Profili



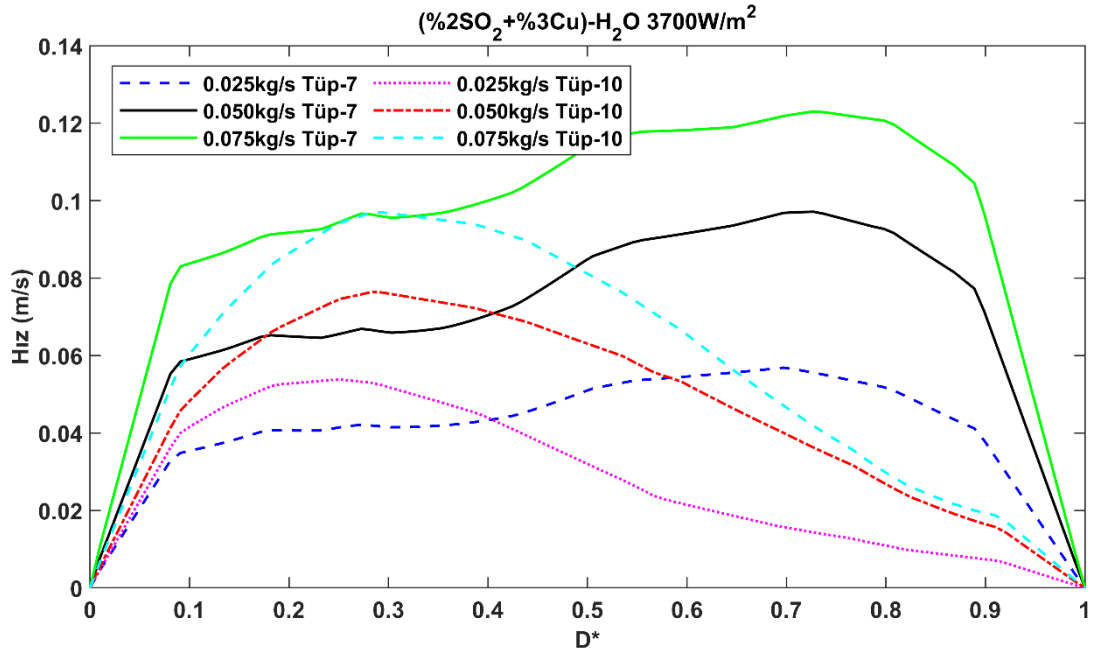
Şekil 5.13: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Tüplere Göre Sıcaklık Profili



Şekil 5.14: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Tüplere Göre Hız Profili

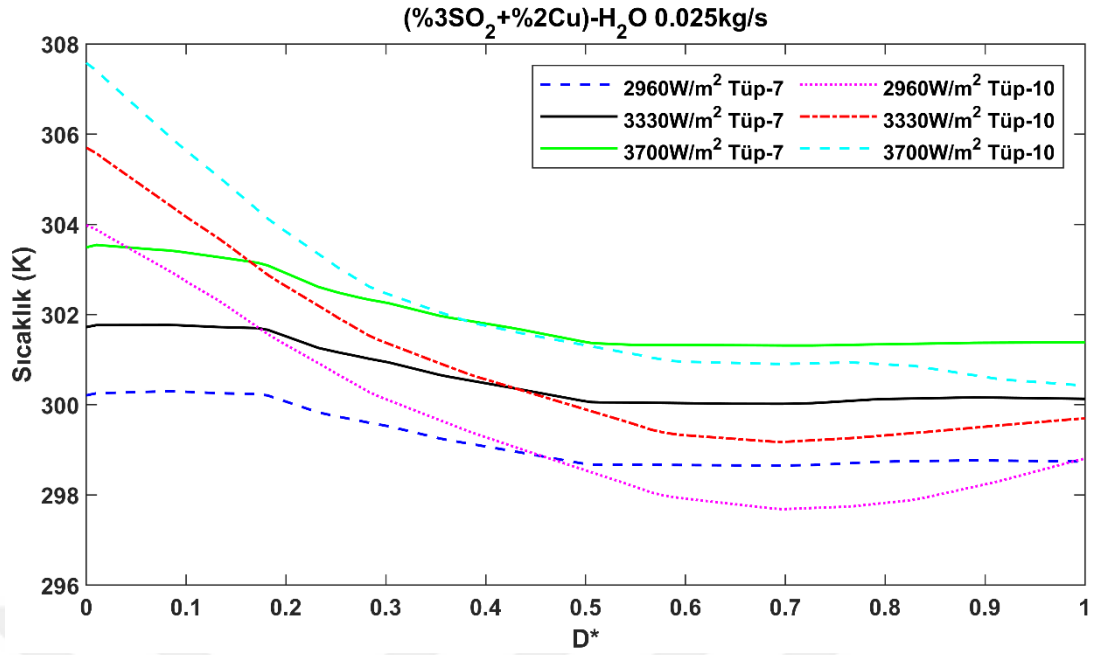


Şekil 5.15: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Debiye Göre Sıcaklık Profili

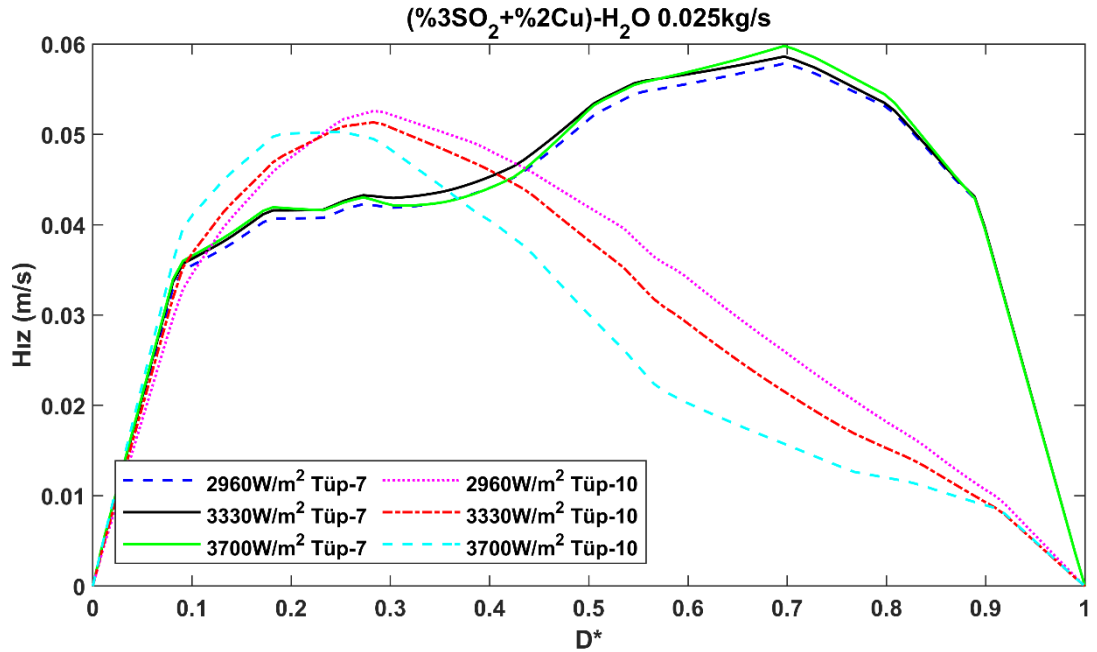


Şekil 5.16: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Debiye Göre Hız Profili





Şekil 5.17: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Isı Akısına Göre Sıcaklık Profili

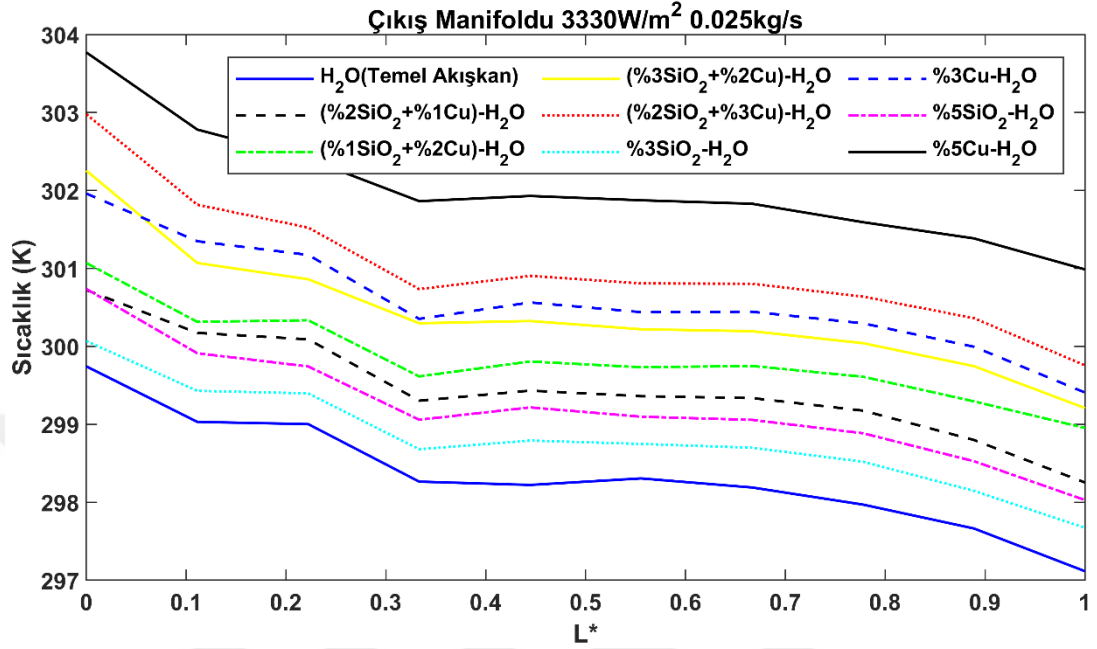


Şekil 5.18: U-Tüp ile Çıkış Manifoldu Kesişim Bölgesi Isı Akısına Göre Hız Profili

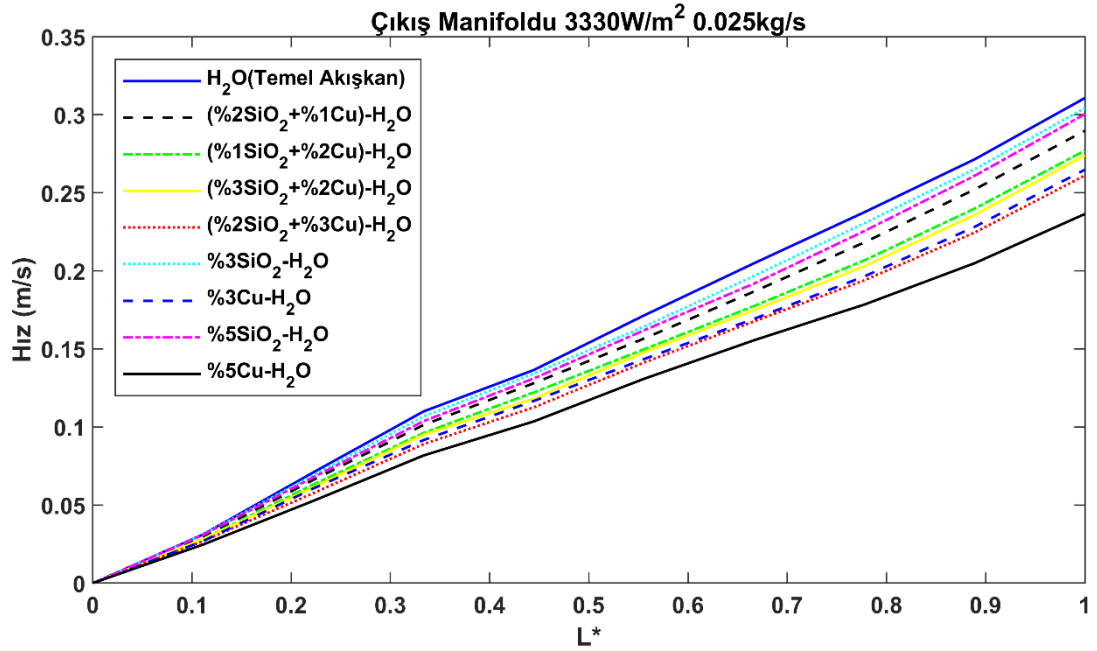
Şekil (5.19-5.24)'den de çıkış manifoldu boyunca akışkana, ısı akısına ve kütleli debiye göre sıcaklık ve hız profilleri incelenmiştir. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de  $3330\text{W/m}^2$  ile  $0.025\text{kg/s}$  için farklı hacimsel oranlarda farklı nanoakışkanların sırasıyla sıcaklık ve hız profilleri verilmiştir. Görüleceği üzere sistemimizin çıkışı giriş ile aynı yönde olması sebebiyle manifold boyunca çıkış yüzeyine doğru sıcaklık profilinin azaldığını hızın ise arttığını görmekteyiz. Buradan da nanopartikül hacimsel oranı arttıkça sıcaklığın arttığını, hızında azaldığını görmekteyiz. Akışkan içindeki nanopartiküllerden Cu nanopartikülü miktarının artması sıcaklığı önemli derecede arttırmakta olup, Cu nanopartikül miktarının azalması,  $\text{SiO}_2$  nanopartikül miktarının artmasıyla da akış hızının artış gösterdiğini ifade edebiliriz. Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de debiye göre incelenen sıcaklık ve hız profilleri Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'de de ısı akısına göre incelenmiştir. Debi etkisini ( $\%2\text{SiO}_2+\%3\text{Cu}$ )- $\text{H}_2\text{O}$  nanoakışkanı ve  $3700\text{W/m}^2$  için incelenmiş olup, kütleli debi arttıkça sıcaklıktaki azalmayı ve hız profilindeki yükselmeyi de net bir şekilde belirtebiliriz. Isı akısının etkisini de ( $\%3\text{SiO}_2+\%2\text{Cu}$ )- $\text{H}_2\text{O}$  nanoakışkanı ve  $0.025\text{kg/s}$  için inceldiğimizde ısı akısı arttıkça sıcaklıktaki artışı görmekteyiz.

Tüm bu şekiller ile akışkan tipine, ısı akısına, kütleli debiye, U-tüpe ve manifolda göre ısı ve hidrodinamik davranışlar ayrı ayrı incelenmiş olup, her özel duruma göre sıcaklık ve hız davranışları uygun ve birbirini destekleyici profiller göstermiştir. Ancak buradan her bir U-tüpün farklı bir hız ve sıcaklık değerinin olduğunu görmekteyiz. Fakat her bir U-tüpü ayrı ayrı değerlendirerek vakum tüplü güneş kollektör sisteminin genel performansı üzerine yorumlama yaparak, değerlendirme yapmak doğru olmaz. Çünkü sistem içindeki her bir U-tüpün ve manifoldların akışkan sıcaklığına ve akış yapısının kollektör sisteminin genel sıcaklık artışına ve hidrodinamik davranışına etkisi vardır. Bu sebeple akışkan tipinin ve nanopartikül oranının kollektör performansına katkısını manifold çıkış sıcaklıklarına göre değerlendirmek daha uygun olacaktır. Buradaki U-tüplere ve manifolda göre özel değerlendirmeleri genel olarak sistem için yapmış olduğumuz yorumları hem ısı hem de hidrodinamik açıdan destekleyici olması açısından analiz ettik. Beklenildiği gibi ısı ve hidrodinamik davranışları gözlemledik. Şekil (5.11-5.24)'de incelediğimiz hız ve sıcaklık profilleri, U-tüplü güneş kollektörünün manifold-tüp geçiş durumu ile çıkış manifoldu boyunca gelişen durumu göstermekte

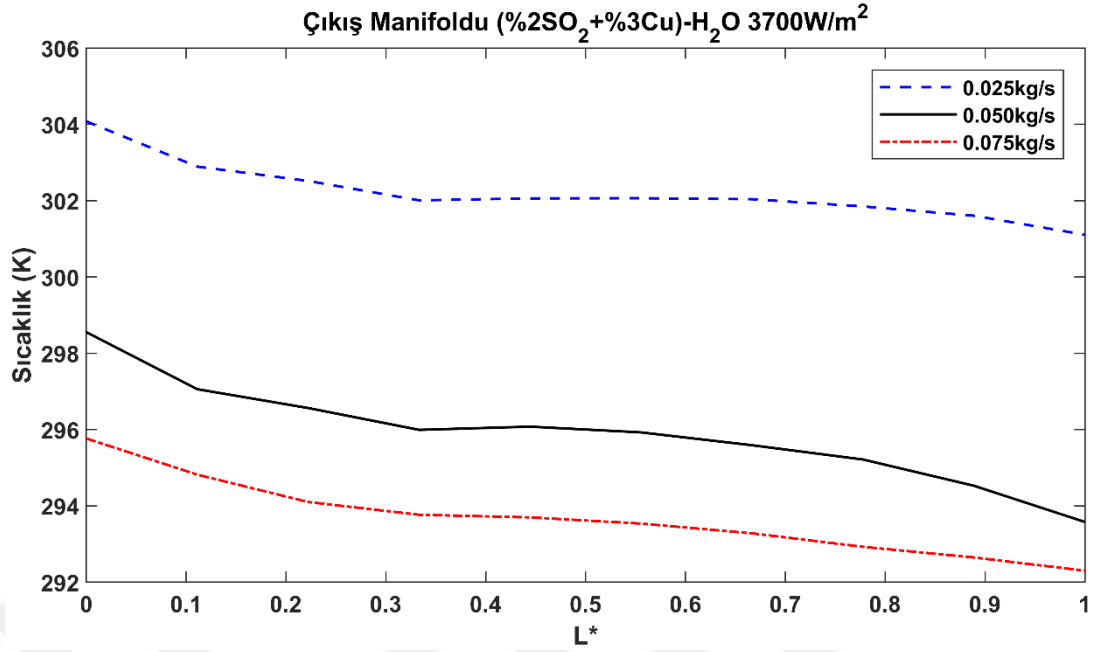
olup; bize hem sistemin çalışma prensibi hakkında bilgi vermektedir, hem de Boussiesq Yaklaşımının etkilerini de açıkça göstermektedir.



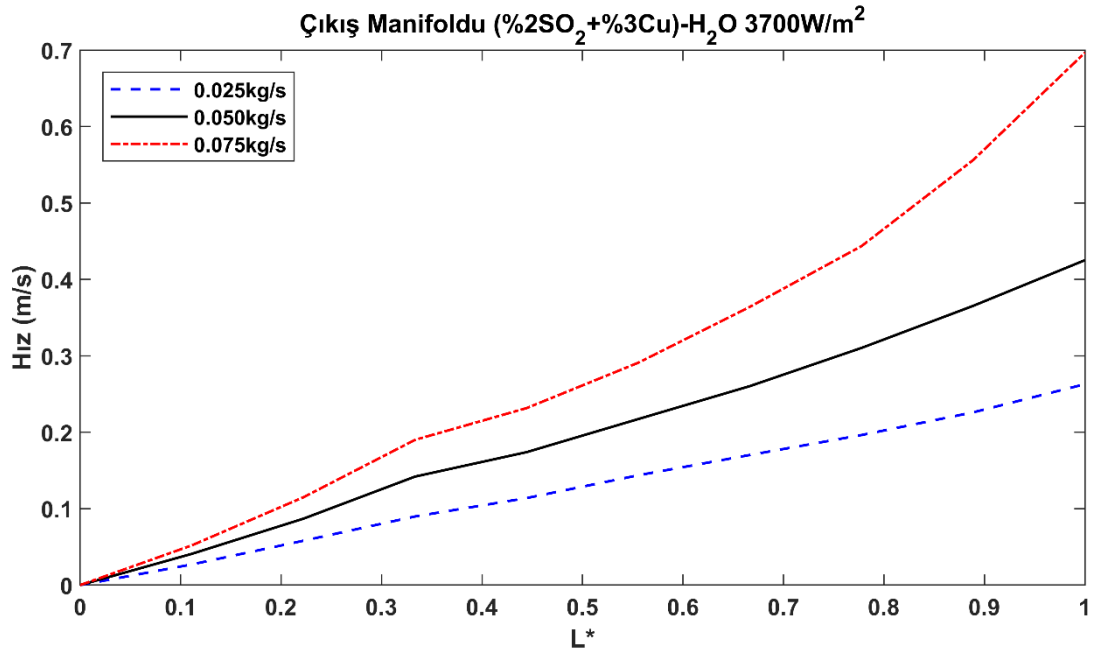
Şekil 5.19: Çıkış Manifoldu Boyunca Akışkana Göre Sıcaklık Profili



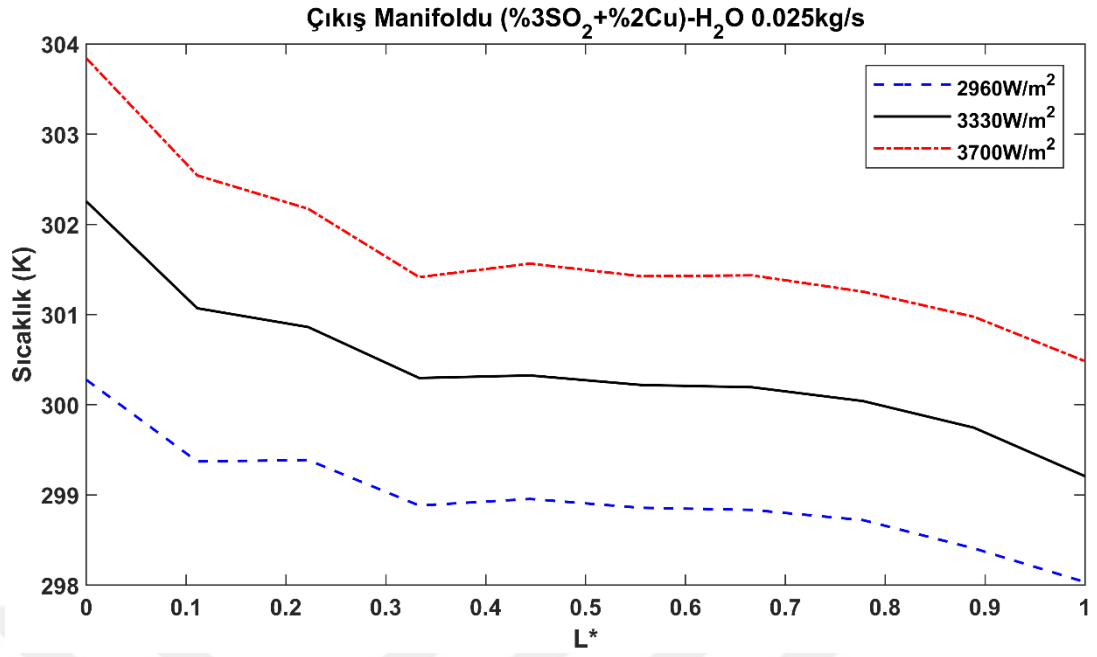
Şekil 5.20: Çıkış Manifoldu Boyunca Akışkana Göre Hız Profili



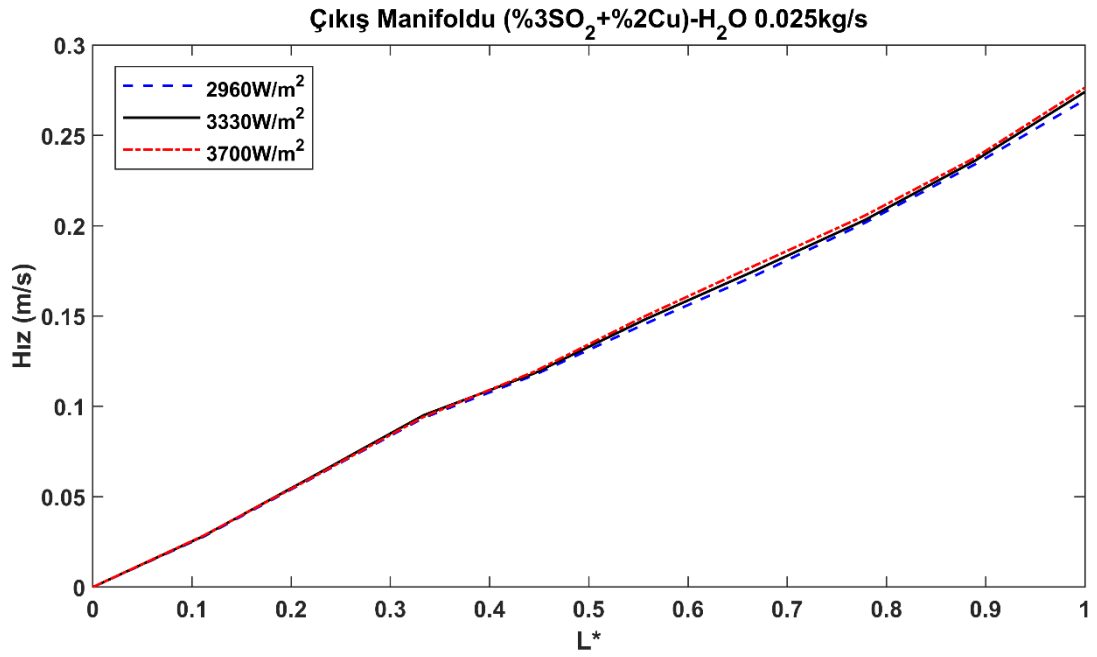
**Şekil 5.21:** Çıkış Manifoldu Boyunca Kütleli Debiye Göre Sıcaklık Profili



**Şekil 5.22:** Çıkış Manifoldu Boyunca Kütleli Debiye Göre Hız Profili



**Şekil 5.23:** Çıkış Manifoldu Boyunca Isı Akısına Göre Sıcaklık Profili



**Şekil 5.24:** Çıkış Manifoldu Boyunca Isı Akısına Göre Hız Profili

## 6. SONUÇLAR

Ele alınan sistemde 10 adet U-tüp ve bu tüplerin bağlı olduğu iki adet manifold bulunmaktadır. U-tüplerin alt borusu giriş manifolduna, üst borusu da çıkış manifolduna bağlıdır. Sistem 30° kollektör eğimi, 2960 W/m<sup>2</sup>, 3330 W/m<sup>2</sup> ile 3700 W/m<sup>2</sup> ısı akıları ve 0.025 kg/s, 0.05 kg/s ile 0.075 kg/s akış debileri altında; farklı hacimsel oranlarda farklı tiplerde nanopartikül barındıran mono ve hibrit nanoakışkanların ısı ve hidrodinamik davranışları sonlu hacimler metodu kullanılarak incelenmiştir. Bu sistemin bütün olarak matematiksel modellemesi yapılmış ve hem deneysel hem de nümerik çalışmalar ile modelimiz doğrulanmıştır. Aynı zamanda nümerik çalışmalarda en önemli adımlardan birisi olan mesh analizi de yapılmıştır.

Ele alınan parametrelerden ısı akısı arttıkça sistemin ısı performansını arttırmakta ve kütleli debisi arttıkça da sıcaklık profilinde düşüş gözlenmiştir. Bu artış ve azalış durumları her bir U-tüp için farklılıklar gösterse de prensip olarak aynıdır ve tüm sistemi de benzer şekilde etkilemektedir.

Temel akışkan olarak suyun kullanıldığı sistemimizde, farklı hacimsel oranlarda SiO<sub>2</sub> ve Cu nanopartikülleri ele alınmıştır. Bu iki nanopartikül farklı hacimsel oranlarda mono ve hibrit olarak modelimizde kullanılmıştır. Akışkan olarak su ve (%2SiO<sub>2</sub>+%1Cu)-H<sub>2</sub>O, (%1SiO<sub>2</sub>+%2Cu)-H<sub>2</sub>O, (%3SiO<sub>2</sub>+%2Cu)-H<sub>2</sub>O, (%2SiO<sub>2</sub>+%3Cu)-H<sub>2</sub>O, %3SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, %3Cu-H<sub>2</sub>O, %5SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O ile %5Cu-H<sub>2</sub>O nanoakışkanları dikkate alınmıştır. Yapılan analizlerde Cu-H<sub>2</sub>O nanoakışkan kullanılması durumunda sistemin ısı performansının daha iyi olduğu görülmüştür. Nanoakışkan içerisindeki nanopartikül hacimsel oranı arttıkça ısı transferinin de arttığı hesaplanmıştır. Nanoakışkan içindeki SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün oranı arttıkça sistem içindeki akışkan daha hızlı sirkülasyon olmakta ve bundan kaynaklı olarak Cu nanopartikülüne göre ısı performansına katkısı daha düşüktür. Ancak daha hafif olmasından kaynaklı olarak sistem içindeki çökelmelere ve bundan kaynaklı oluşabilecek tıkanmalara karşı daha etkin ve aynı zamanda suya göre ısı performansı daha yüksektir. Hibrit sistem kullanarak Cu nanopartikülünün ısı kabiliyetinden ve SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün de hafifliğinden yararlanarak etkin bir model ortaya

koyulmuştur. Nanopartiküllerin mono ve hibrit kullanımına göre ve aynı zamanda ısı akısı ve debiye bağlı olarak ele alınan U-tüplü güneş kollektör sisteminin ısı performansının suya göre yaklaşık olarak %1.6 ile %15 arasında arttığı belirlenmiştir.

Enerjinin her geçen gün daha büyük önem taşıması ve atmosferimizin hergün daha da kirlenmesi sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının genişletilmesi ve bu kaynaklarında performansının artırılması için sistemsel gelişimlerin sağlanması bir zaruret olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapmış olduğumuz çalışmada zararlı gaz emisyonlarının azalmasına katkı sunmakta olan U-tüplü güneş kollektör sistemlerinde hibrit nanoakışkan kullanımının fayda sağlayacağı kanısına bizleri ulaştırmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Morrison GL, Budihardjo I, Behnia M. Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. Sol Energy 2004; 76(1-3): 135–40. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.024>)
- [2] Morrison GL, Budihardjo I, Behnia M. Measurement and simulation of flow rate in a water-in-glass evacuated tube solar water heater. Sol Energy 2005; 78(2): 257–67. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.005>)
- [3] Sakhrieh A, Al-Ghandoor A. Experimental investigation of the performance of five types of solar collectors. Energy Convers Manage 2013; 65: 715–20. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.12.038>)
- [4] Mehla N, Yadav A. Experimental analysis of thermal performance of evacuated tube solar air collector with phase change material for sunshine and off sunshine hours. Int J Ambient Energy 2017; 38(2): 130-145. (<https://doi.org/10.1080/01430750.2015.1074612>)
- [5] Naik BK, Varshney A, Muthukumar P, Somayaji C. Modelling and performance analysis of U type evacuated tube solar collector using different working fluids. Energy Procedia 2016; 90: 227-37. (<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.189>)
- [6] Badar AW, Buchholz R, Ziegler F. Experimental and theoretical evaluation of the overall heat loss coefficient of vacuum tubes of a solar collector. Sol Energy 2011; 85(7) 1447-56. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.001>)
- [7] Y. Gao, Q. Zhang, R. Fan, X. Lin, Y. Yu, Effects of thermal mass and flow rate on forced-circulation solar hot-water system: comparison of water-in-glass and U-pipe evacuated-tube solar collectors. Sol Energy 2013; 98: 290-301. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.014>)
- [8] Rodriguez GM, Silva ALF, Nunez MP. Solar thermal networks operating with evacuated-tube collectors. Energy 2018; 146: 26-33. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.165>)
- [9] Farjallah R, Chaabane M, Mhiri H, Bournot P, Dhaouadi H. Thermal performance of the U-tube solar collector using computational fluid dynamics



simulation. J Sol Energy Eng 2016; 138: 061008. (<https://doi.org/10.1115/1.4034517>)

[10] Gao Y, Fan R, Zhang XY, An YJ, Wang MX, Gao YK, Yu Y. Thermal performance and parameter analysis of a U-pipe evacuated solar tube collector. Sol Energy 2014; 107: 714-27. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.023>)

[11] Dabra V, Yadav A. Effect of pressure drop and air mass flow rate on the performance of concentric coaxial glass tube solar air collector: a theoretical approach. Arabian J Sci Eng 2018; 43: 4549-59. (<https://doi.org/10.1007/s13369-017-2992-2>)

[12] Alfaro-Ayala JA, Martínez-Rodríguez G, Picón-Núñez M, Uribe-Ramírez AR, Gallegos-Muñoz A. Numerical study of a low temperature water-in-glass evacuated tube solar collector. Energy Convers Manage 2015; 94: 472-81. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.091>)

[13] Ma L, Lu Z, Zhang J, Liang R. Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. Build Environ 2010; 45: 1959-67. (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.015>)

[14] Gao Y, Fan R, Zhang XY, AN YJ, Wang MX, Gao YK, Yu Y. Thermal performance and parameter analysis of a U-pipe evacuated solar tube collector. Sol Energy 2014; 107: 714–27. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.023>)

[15] Nie X, Zhao L, Deng S, Lin X. Experimental study on thermal performance of U-type evacuated glass tubular solar collector with low inlet temperature. Sol Energy 2017; 150: 192–201. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.030>)

[16] Pawar VR, Sobhansarbandi S. CFD modeling of a thermal energy storage based heat pipe evacuated tube solar collector. J Energy Storage 2020; 30: 101528. (<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101528>)

[17] Kabeel AE, Abdelgaied M, Elrefay MKM. Thermal performance improvement of the modified evacuated U-tube solar collector using hybrid storage materials and low-cost concentrators. J Energy Storage 2020; 29: 101394. (<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101394>)

- [18] Korres DN, Tzivanidis C, Koronaki IP, Nitsas MT. Experimental, numerical and analytical investigation of a U-type evacuated tube collectors' array. *Renew Energy* 2019; 135: 218-31. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.003>)
- [19] Liang R, Zhang J, Zhao L, Ma L. Research on the universal model of filled-type evacuated tube with U-tube in uniform boundary condition. *Appl Therm Eng* 2014; 63: 362-9. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.020>)
- [20] Ghaderian J, Sidik NAC, Kasaeian A, Ghaderian S, Okhovat A, Pakzadeh A, Samion S, Yahya WJ. Performance of copper oxide/distilled water nanofluid in evacuated tube solar collector (ETSC) water heater with internal coil under thermosyphon system circulations. *Appl Thermal Eng* 2017; 121(5): 520–36. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.117>)
- [21] Dehaj MS, Mohiabadi MZ. Experimental investigation of heat pipe solar collector using MgO nanofluids. *Sol Energ Mat Sol C* 2019; 191: 91-9. (<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.025>)
- [22] Choi TJ, Jang SP, Kedzierski MA. Effect of surfactants on the stability and solar thermal absorption characteristics of water-based nanofluids with multi-walled carbon nanotubes. *Int J Heat Mass Transfer* 2018; 122: 483-90. (<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.141>)
- [23] Ghaderian J, Sidik NAC. An experimental investigation on the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/distilled water nanofluid on the energy efficiency of evacuated tube solar collector. *Int J Heat Mass Transf* 2017; 108: 972–87. (<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.101>)
- [24] Yurddaş A. Optimization and thermal performance of evacuated tube solar collector with various nanofluids. *Int J Heat Mass Transf* 2020; 152: 119496. (<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119496>)
- [25] Mahbubul IM, Khan MMA, Ibrahim NI, Ali HM, Al-Sulaiman FA, Saidur R. Carbon nanotube nanofluid in enhancing the efficiency of evacuated tube solar collector. *Renew Energy* 2018; 121: 36-44. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.006>)
- [26] Natividade PSG, Moura GM, Avallone A, Filho EPB, Gelamo RV, Gonçalves JCSI. Experimental analysis applied to an evacuated tube solar collector equipped

with parabolic concentrator using multilayer graphenebased nanofluids. *Renew Energy* 2019; 138: 152-60. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.091>)

[27] Sharafeldin MA, Grof G. Evacuated tube solar collector performance using CeO<sub>2</sub>/water nanofluid. *J Cleaner Prod* 2018; 185: 347-56. (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.054>)

[28] Sharafeldin MA, Grof G. Efficiency of evacuated tube solar collector using WO<sub>3</sub>/Water nanofluid. *Renew Energy* 2019; 134: 453-60. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.010>)

[29] Mercan M, Yurddaş A. Numerical analysis of evacuated tube solar collectors using nanofluids. *Sol Energy* 2019; 191: 167–79. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.074>)

[30] Tong Y, Kim J, Cho H. Effects of thermal performance of enclosed-type evacuated U-tube solar collector with multi-walled carbon nanotube/water nanofluid. *Renew Energy* 2015; 83: 463-73. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.042>)

[31] Kaya H, Arslan K, Elturgal N. Experimental investigation of thermal performance of an evacuated U-Tube solar collector with ZnO/Ethylene glycol-pure water nanofluids. *Renew Energy* 2018; 122: 329-38. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.115>)

[32] Kim H, Ham J, Park C, Cho H. Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids. *Energy* 2016; 94: 497-507. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.021>)

[33] Tong Y, Cho H. Comparative study on the thermal performance of evacuated solar collectors with u-tubes and heat pipes. *Int J Air Cond Refrig* 2015; 23(3): 1550019. (<https://doi.org/10.1142/S2010132515500194>)

[34] Kim H, Ham J, Cho H. Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids. *Energy* 2017; 118: 1304-12. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.009>)

[35] Kaya H, Alkasem M, Arslan K. Effect of nanoparticle shape of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pure Water nanofluid on evacuated U-Tube solar collector efficiency. *Renew Energy* 2020; 162: 267-84. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.039>)

- [36] Hosseini SMS, Dehaj MS. Assessment of TiO<sub>2</sub> water-based nanofluids with two distinct morphologies in a U type evacuated tube solar collector. *App Therm Eng* 2021; 182: 116086. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116086>)
- [37] Li X, Zeng G, Lei X. The stability, optical properties and solar-thermal conversion performance of SiC-MWCNTs hybrid nanofluids for the direct absorption solar collector (DASC) application. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2020; 206: 110323. (<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110323>)
- [38] Gulzar O, Qayoum A, Gupta R. Experimental study on stability and rheological behaviour of hybrid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Therminol-55 nanofluids for concentrating solar collectors. *Powder Technol* 2019; 352: 436-44. (<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.060>)
- [39] Camposa C, Vasco D, Anguloa C, Burdilesa PA, Cardemil J, Palza H. About the relevance of particle shape and graphene oxide on the behavior of direct absorption solar collectors using metal based nanofluids under different radiation intensities. *Energy Convers Manage* 2019; 181: 247-57. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.007>)
- [40] Hussein OA, Habib K, Muhsan AS, Saidur R, Alawi OA, Ibrahim TK. Thermal performance enhancement of a flat plate solar collector using hybrid nanofluid. *Sol Energy* 2020; 204: 208-22. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.034>)
- [41] Okonkwo EC, Wole-Osho I, Kavaz D, Abid M, Al-Ansari T. Thermodynamic evaluation and optimization of a flat plate collector operating with alumina and iron mono and hybrid nanofluids. *Sustain Energy Technol Assess* 2020; 37: 100636. (<https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100636>)
- [42] Verma SK, Tiwari AK, Tiwari S, Chauha DS. Performance analysis of hybrid nanofluids in flat plate solar collector as an advanced working fluid. *Sol Energy* 2018; 167: 231-41. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.017>)
- [43] Tahat MS, Benim AC. Experimental analysis on thermophysical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CuO hybrid nano fluid with its effects on flat plate solar collector. *Defect Diffus Forum* 2017; 374: 148-56. (<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.374.148>)

- [44] Bellos E, Tzivanidis C. Thermal analysis of parabolic trough collector operating with mono and hybrid nanofluids. *Sustain Energy Technol Assess* 2018; 26: 105-15. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2017.10.005>)
- [45] Minea AA, El-Maghlany WM. Influence of hybrid nanofluids on the performance of parabolic trough collectors in solar thermal systems: Recent findings and numerical comparison. *Renew Energy* 2018; 120: 350-64. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.093>)
- [46] Sreekumar S, Joseph A, Kumar CSS, Thomas S. Investigation on influence of antimony tin oxide/silver nanofluid on direct absorption parabolic solar collector. *J Clean Prod* 2020; 249: 119378. (<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119378>)
- [47] Sadeghi G, Nazari S. Retrofitting a thermoelectric-based solar still integrated with an evacuated tube collector utilizing an antibacterial-magnetic hybrid nanofluid. *Desalination* 2020; 114871. (<https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114871>)
- [48] Patankar SV. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor & Francis. ISBN 978-0-89116-522-4, 1980.
- [49] Barozzi GS, Zanchini E, Mariotti M. Experimental Investigation of Combined Forced and Free Convection in Horizontal and Inclined Tubes. *Meccanica* 1985; 20: 18–27. (<https://doi.org/10.1007/BF02337057>)
- [50] Petukhov BS, Polyakov AF. Experimental investigation of viscogravitational fluid flow in a horizontal tube, Scientific Research Institute of High Temperatures, Translated from *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1967; 5(1): 87–95. (<https://ci.nii.ac.jp/naid/10003779770>)
- [51] Ouzzane M, Galanis N. Numerical analysis of mixed convection in inclined tubes with external longitudinal fins. *Sol Energy* 2001; 71: 199–211. ([https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00030-5))
- [52] Yurddaş A, Çerçi Y. Numerical analysis of heat transfer in a flat-plate solar collector with nanofluids. *Heat Transf Research* 2017; 48: 681-714. (<https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2016012266>)

- [53] He Q, Zeng S, Wang S. Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids. *Appl Therm Eng* 2015; 88: 165–171. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.053>)
- [54] Brinkman HC. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J Chem Phys* 1952; 20: 571–581. (<https://doi.org/10.1063/1.1700493>).
- [55] Maxwell-Garnett JC. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford, UK, 1873.
- [56] Khanafer K, Vafai K, Lightstone M. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two dimensional enclosure utilizing nanofluids, *Int J Heat Mass Transf* 2003; 46: 3639–53. ([https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00156-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00156-X)).
- [57] Sabiha MA, Saidur R, Mekhilef S, Mahian O. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors, *Renew Sust Energ Rev* 2015; 51: 1038-54. (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.016>)
- [58] Shah LJ, Furbo S. Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions, *Appl Energy* 2004; 78: 371–95. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.10.004>)
- [59] Pei G, Li G, Zhou X, Ji J, Su Y. Comparative experimental analysis of the thermal performance of evacuated tube solar water heater systems with and without a mini-compound parabolic concentrating (CPC) reflector (Co1), *Energies* 2012; 5: 911–24. (<https://doi.org/10.3390/en5040911>)
- [60] Mercan M, Nanoakışkanlı vakum tüplü güneş kolektörlerinde ısı transferinin sayısal analizi, 2019. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi
- [61] Wang Y, Zhu Y, Chen H, Zhang X, Liao C. Performance analysis of a novel sun-tracking CPC heat pipe evacuated tubular collector. *Appl Therm Eng* 2015; 87: 381-8. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.045>)
- [62] Tang R, Yang Y. Nocturnal reverse flow in water-in-glass evacuated tube solar water heaters, *Energy Convers Manage* 2014; 80: 173-7. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.025>)

- [63] Liang R, Ma L, Zhang J. Theoretical and experimental investigation of the filled-type evacuated tube solar collector with U tube, *Sol Energy* 2011; 85(9): 1735-44. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.012>)
- [64] Gao Y, Fan R, Zhang XY, An YJ, Wang MX, Gao YK, Yu Y. Thermal performance and parameter analysis of a U-pipe evacuated solar tube collector, *Sol Energy* 2014; 107: 714-27. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.023>)
- [65] Papadimitratos A, Sobhansarbandi S, Pozdin V, Zakhidov A, Hassanipour F. Evacuated tube solar collectors integrated with phase change materials, *Sol Energy* 2016; 129: 10–9. (<https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.040>)
- [66] Hadjiat MM, Hazmoune M, Ouali S, Gama A, Yaiche MR. Design and analysis of a novel ICS solar water heater with CPC reflectors, *J Energy Storage* 2018; 16: 203–10. (<https://doi.org/10.1016/j.est.2018.01.012>)
- [67] Ramlow B, Nusz B. *Solar Water Heating*. New Society Publishers, Canada, 2010.
- [68] Duffie JA, Beckman WA. *Solar Engineering of Thermal Processes* 4th ed, Wiley, New Jersey, 2013.
- [69] Lee S, Choi SUS, Li S, Eastman JA. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *ASME J. Heat Transfer* 1999; 121: 280–9. (<https://doi.org/10.1115/1.2825978>)
- [70] Wang X, Mujumdar AS. Heat transfer characteristics of nanofluids: A review, *Int J Therm Sci* 2007; 46: 1–19. (<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>)
- [71] Xuan Y, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. *Int J Heat Fluid Flow* 2000; 21/1: 58–64. ([https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3))
- [72] Javad G, Nor Azwadi CS. An experimental investigation on the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/distilled water nanofluid on the energy efficiency of evacuated tube solar collector. *Int J Heat Mass Transfer* 2017; 108: 972–87. (<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.101>)

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Erdal YILDIRIM  
Doğum Yeri ve Yılı : Isparta-1982  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : erdalyildirim06@hotmail.com

### Eğitim Durumu

Lise : Isparta Teknik Lisesi (1996-2000)  
Lisans : Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi  
Makine Resmi ve Konstrüksiyon Öğretmenliği (2001-2007),  
Manisa Celal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü (2014-2016)  
Yüksek Lisans : MCBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD  
Termodinamik Ana Bilimdalı (2017-Halen)

### Mesleki Deneyim

Aliağa Gaz Türbinleri ve Kombine Çevrim Santrali, Buhar türbin Tablocu (2007-2016)

Ege Üniversitesi Bergama MYO Makine Bölümü ücretli Öğretim Görevlisi (2011-2012)

Aliağa Belediyesi Çevre Koruma ve Kontrol Müdürlüğü Ruhsat Birimi (2016-2019)

Aliağa Belediyesi İmar Müdürü (2019-Halen)