



**HELİSEL BORULU ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN SAYISAL VE DENEYSEL
ANALİZİ**

Azim Doğuş TUNCER

**DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2022

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Azim Doğuş TUNCER

31/08/2022

HELİSEL BORULU ISI DEĞİŞTİRİCİLERİN SAYISAL VE DENEYSEL ANALİZİ

(Doktora Tezi)

Azim Doğuş TUNCER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ağustos 2022

ÖZET

Gelişen teknolojiyle birlikte enerji ihtiyacı her geçen gün artmakta ve fosil enerji kaynaklarına dayalı sistemlerin olumsuz çevresel etkileri, verimli enerji sistemlerinin önemini artırmaktadır. Helisel borulu tip ısı değiştiriciler, diğer ısı değiştiricilere göre üstün özellikleri sayesinde çeşitli proseslerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, helisel borulu ısı değiştiricilerin ısı performanslarının artırılması için yeni bir akış yolu tasarlanmıştır. Isı değiştiricinin gövde tarafına yerleştirilen bir iç boru ile akışın regüle edilmesi amaçlanmıştır. Yeni akış yoluna sahip ısı değiştiricinin kanatçıksız ve kanatçıklı tipleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak sayısal olarak analiz edilmiş ve konvansiyonel tip helisel borulu ısı değiştirici ile karşılaştırılmıştır. Sayısal olarak elde edilen bulgular göz önünde bulundurularak yeni tip tasarıma sahip ısı değiştiriciler imal edilerek deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, ısı değiştiricilerin sıcak tarafında su, TiO_2/su tekli ve $\text{Cu-TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkanları test edilmiştir. Kütlece %1 konsantrasyona sahip nanoakışkanlar hazırlanarak termodinamik özellikleri de bu tez kapsamında araştırılmıştır. Deneyler farklı Reynolds sayıları ve sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, TiO_2/su nanoakışkanının kanatçıksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiricilerde kullanılması toplam ısı transfer katsayısını sırasıyla ortalama %7,5 ve %8,6 oranında arttırmıştır. Hibrit nanoakışkanın kanatçıksız ve kanatçıklı sistemlerde kullanımı ise toplam ısı transfer katsayısını sırasıyla ortalama %10,8 ve %12 oranında iyileştirmiştir. Genel olarak, tekli ve hibrit nanoakışkanların kanatçıksız ve kanatçıklı ısı değiştiricilerde kullanımı ısı performansını önemli ölçüde arttırmıştır. Ancak, hibrit nanoakışkan kullanımı her iki ısı değiştiricide de tekli nanoakışkana oranla daha iyi performans göstermiştir. Ek olarak, çalışma bulgularına göre genişletilmiş ısı transfer yüzeylerinin helisel borulu ısı değiştiricilere entegre edilmesinin ısı performans üzerine olumlu etkileri gözlemlenmiştir. Bunun yanında, elde edilen sayısal ve deneysel sonuçların birbiriyle uyum içinde olduğu bulunmuştur.

Bilim Kodu : 91412

Anahtar Kelimeler : Helisel borulu, ısı değiştirici, kanatçık, nanoakışkan, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, ısı transferi

Sayfa Adedi : 124

Danışman : Prof. Dr. Adnan SÖZEN

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF HELICALLY-COILED HEAT EXCHANGERS

(Ph. D. Thesis)

Azim Doğuş TUNCER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2022

ABSTRACT

Along with the developing technologies, the need for energy resources has increased day by day and the negative environmental effects of fossil energy-based systems increased the importance of efficient energy systems. Helically-coiled type heat exchangers are extensively used in various processes because of their superior specifications in comparison with other heat exchangers. In this thesis study, a new flow path has been designed to enhance the performance of helically-coiled heat exchangers. It is aimed to regulate the flow with an inner pipe placed on the shell side of the heat exchanger. Finless and finned types of heat exchangers with new flow path have been numerically analyzed by using computational fluid dynamics and they have been compared with conventional type helically-coiled heat exchanger. Heat exchangers with new designs have been manufactured considering numerically obtained findings and have been experimentally analyzed. In the experimental study, water, $\text{TiO}_2/\text{water}$ single and $\text{Cu-TiO}_2/\text{water}$ hybrid nanofluids have been tested in the hot side of the heat exchangers. Nanofluids with 1% (wt./wt.) concentration has been prepared and their thermophysical properties have been also analyzed within the scope of this thesis. Experiments have been conducted at various Reynolds numbers and temperature values. According to the experimental findings, $\text{TiO}_2/\text{water}$ working nanofluid utilization in finless and finned helically-coiled heat exchangers averagely upgraded overall heat transfer coefficient as 7.5% and 8.6%, respectively. $\text{CuO-TiO}_2/\text{water}$ nanofluid application in finless and finned systems averagely upgraded overall heat transfer coefficient as 10.8% and 12%, respectively. Generally, it was observed that using $\text{TiO}_2/\text{water}$ and $\text{CuO-TiO}_2/\text{water}$ nanofluid in finless and finned heat exchangers importantly raised the thermal performance. However, utilization of hybrid type nanofluid presented better performance than single nanofluid in both heat exchangers. Also, outcomes exhibited further positive impacts of integrating extended heat transfer surfaces in helically-coiled heat exchangers on the thermal performance. Moreover, it was found that numerical and experimental findings are in good agreement.

Science Code : 91412

Key Words : Helically-coiled, heat exchanger, fin, nanofluid, computational fluid dynamics, heat transfer

Page Number : 124

Supervisor : Prof. Dr. Adnan SÖZEN

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim ve tez çalışması süresince beni yönlendiren, değerli bilgilerini, görüşlerini ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım sayın Prof. Dr. Adnan SÖZEN'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmasındaki görüşleri, önerileri ve katkıları için sayın hocam Doç. Dr. Ata HANLAR'a teşekkür ederim. Ek olarak, tez çalışması sürecindeki yardımlarından dolayı sayın hocalarım Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ ve Arş. Gör. Dr. Emine Yağız GÜRBÜZ'e teşekkür ederim. Eğitim hayatımın tüm süreçlerinde beni destekleyen ve teşvik eden, başta annem Asuman SOYLU ve babam Rauf TUNCER olmak üzere aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ISI DEĞİŞTİRİCİLER.....	9
2.1. Borulu Isı Değiştiriciler.....	10
2.1.1. Çift borulu ısı değiştiriciler	10
2.1.2. Gövde borulu ısı değiştiriciler	11
2.1.3. Helisel borulu ısı değiştiriciler.....	12
2.2. Plakalı Isı Değiştiriciler.....	14
2.3. Geniştirilmiş Yüzeyli Isı Değiştiriciler.....	16
3. NANOAKIŞKANLAR	19
3.1. Nanoakışkan Çeşitleri	21
3.2. Nanopartikül Hazırlama Yöntemleri.....	23
3.3. Nanoakışkan Hazırlama Yöntemleri	23
3.4. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri	25
3.4.1. Özgül ısı kapasitesi.....	26
3.4.2. Viskozite	26
3.4.3. Yoğunluk	27

	Sayfa
3.4.4. Isı iletim katsayısı.....	27
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	29
5. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	47
5.1. Sayısal Analiz.....	48
5.1.1. Isı değıştirici modellerinin oluşturulması.....	48
5.1.2. Isı değıştiricilerin ağ yapısının oluşturulması.....	51
5.1.3. Sayısal analiz işlemleri.....	54
5.2. Deneysel Çalışma.....	55
5.2.1. Helisel borulu ısı değıştiricilerin imalatı.....	55
5.2.2. Deney düzeneği.....	58
5.2.3. Nanoakışkanların hazırlanması.....	61
5.2.4. Deneysel prosedür.....	69
6. TEORİK HESAPLAMALAR.....	71
6.1. Performans Parametrelerinin Teorik Analizi.....	71
6.2. Belirsizlik Analizi.....	74
7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	77
7.1. Sayısal Bulgular.....	77
7.2. Deneysel Bulgular.....	84
7.2.1. Deneysel ısı transferi bulguları.....	84
7.2.2. Deneysel toplam ısı transfer katsayısı bulguları.....	86
7.2.3. Deneysel sıcak taraf ısı transfer katsayısı bulguları.....	88
7.2.4. Deneysel soğuk taraf ısı transfer katsayısı bulguları.....	89
7.2.5. Deneysel Nusselt sayısı bulguları.....	90
7.2.6. Deneysel etkinlik katsayısı bulguları.....	92
7.3. Deneysel Bulguların Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırılması.....	93
7.4. Deneysel ve Sayısal Bulguların Karşılaştırılması.....	95

	Sayfa
7.5. Belirsizlik Analizi Bulguları	99
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. İncelenen ısı değıştiricilerin ölçüleri	51
Çizelge 5.2. AND SV-10 viskozimetre cihazının teknik özellikleri.....	64
Çizelge 5.3. Diamond DSC cihazı teknik özellikleri	64
Çizelge 5.4. Kullanılan çalışma akışkanlarının termofiziksel özellikleri	65
Çizelge 7.1. Mevcut tez çalışmasının benzer çalışmalar ile karşılaştırılması.....	94

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Isı değıştircilerinin sınıflandırılması.....	9
Şekil 2.2. Çift borulu ısı değıştircinin şematik gösterimi	10
Şekil 2.3. Gövde borulu ısı değıştircinin şematik gösterimi	12
Şekil 2.4. Helisel borulu ısı değıştircinin şematik gösterimi	13
Şekil 2.5. Contalı plakalı ısı değıştirci bileşenleri	15
Şekil 2.6. Genişletilmiş yüzeyli ısı değıştircilerin şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.1. Nanoakışkan yapısı gösterimi.....	20
Şekil 3.2. Nanoakışkanların ısı davranışını etkileyen temel faktörler	21
Şekil 3.3. Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan nanopartikül çeşitleri	22
Şekil 3.4. Tek aşamalı nanoakışkan hazırlama yönteminin şematik gösterimi	24
Şekil 3.5. İki aşamalı nanoakışkan hazırlama yönteminin şematik gösterimi	25
Şekil 5.1. Mevcut tez çalışmasının adımları	47
Şekil 5.2. İncelen konvansiyonel ısı değıştirci geometrisi.....	49
Şekil 5.3. İncelen ısı yeni tip ısı değıştircilerin geometrileri	49
Şekil 5.4. Sayısal olarak analiz edilen ısı değıştircilerin yan görünüşleri	50
Şekil 5.5. Tüm geometriye ait ağ yapısı	52
Şekil 5.6. Helisel boru ağ yapısı	52
Şekil 5.7. Kanatçığa ait ağ yapısı.....	53
Şekil 5.8. Ağ bağımsızlığı grafiğı	54
Şekil 5.9. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	60
Şekil 5.10. Nanoakışkanların hazırlanma aşamaları	63
Şekil 5.11. TiO ₂ /su nanoakışkanına ait DLS partikül boyutu analizi	67
Şekil 5.12. CuO-TiO ₂ /su nanoakışkanına ait DLS partikül boyutu analizi	67
Şekil 7.1. Helisel borular üzerindeki sıcaklık dağılımları.....	78
Şekil 7.2. Soğuk tarafa (gövde) ait sıcaklık dağılımları.....	79

Şekil	Sayfa
Şekil 7.3. Soğuk devredeki (gövde) hız dağılımları	80
Şekil 7.4. Yeni tip kanatçıksız ısı değiştiriciye ait akış çizgileri	81
Şekil 7.5. Yeni tip kanatçıklı ısı değiştiriciye ait akış çizgileri	82
Şekil 7.6. $Re=6\ 600$ için sayısal olarak elde edilen ısı transferi değerleri	83
Şekil 7.7. $Re=11\ 000$ için sayısal olarak elde edilen ısı transferi değerleri	83
Şekil 7.8. $Re=16\ 000$ için sayısal olarak elde edilen ısı transferi değerleri	84
Şekil 7.9. Farklı parametrelere göre ısı transferi değerlerinin değişimi	86
Şekil 7.10. Farklı parametrelere göre toplam ısı transfer katsayısının değişimi.....	87
Şekil 7.11. Farklı parametrelere göre sıcak taraf ısı transfer katsayısının değişimi	88
Şekil 7.12. Farklı parametrelere göre soğuk taraf ısı transfer katsayısının değişimi	90
Şekil 7.13. Farklı parametrelere göre sıcak taraf Nusselt sayısının değişimi	91
Şekil 7.14. Farklı parametrelere göre etkinlik katsayısı değerlerinin değişimi	93
Şekil 7.15. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen gövde çıkış sıcaklıkları	96
Şekil 7.16. $Re=6\ 600$ için deneysel ve sayısal toplam ısı transfer katsayısı bulguları ..	97
Şekil 7.17. $Re=11\ 000$ için deneysel ve sayısal toplam ısı transfer katsayısı bulguları	98
Şekil 7.18. $Re=16\ 000$ için deneysel ve sayısal toplam ısı transfer katsayısı bulguları	98

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Gövde, iç boru ve gövde kapaklarına ait fotoğraflar	56
Resim 5.2. Kanatçıksız ve kanatçıklı helisel boru görselleri	57
Resim 5.3. Helisel boruların gövdelere yerleştirilmesi.....	57
Resim 5.4. Kaynak işlemi ile ısı değıştiricilerin birleştirilmesi.....	58
Resim 5.5. Deney düzeneği fotoğrafı	61
Resim 5.6. Hazırlanan CuO nanopartiküllere ait SEM görüntüsü.....	62
Resim 5.7. Hazırlanan TiO ₂ nanopartiküllere ait SEM görüntüsü.....	62
Resim 5.8. Hazırlama ve analiz sürecinde kullanılan cihazlar	65
Resim 5.9. Krüss DSA100 gonyometre ve Malvern Zetasizer Nano ZSP	68
Resim 5.10. Kullanılan çalışma akışkanlarının temas açıları	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\dot{Q}$	transfer edilen ısı (W)
$\dot{m}$	kütleli debi (m/s)
A	ısı transfer yüzey alanı (m ²)
C	ısı kapasite
c_p	özgül ısı kapasitesi (kJ/kg.K)
d	helisel boru çapı (m)
De	Dean sayısı
D_h	hidrolik çap (m)
DLS	dinamik ışık saçılımı
h	ısı transfer katsayısı (W/m ² .K)
HTC	ısı transfer katsayısı (W/m ² .K)
k	ısı iletkenlik (W/m.K)
Nu	Nusselt sayısı
$OHTC$	toplam ısı transfer katsayısı (W/m ² .K)
PDI	polidispersite indeksi
Re	Reynolds sayısı
SEM	taramalı elektron mikroskobu
T	sıcaklık (K)
V	hız (m/s)
w_n	bağımsız değişkenlerin belirsizliği
W_R	toplam belirsizlik
ΔT_{LMTD}	logaritmik ortalama sıcaklık farkı (K)
ϵ	etkinlik katsayısı
μ	dinamik viskozite (Pa.s)
ρ	yoğunluk (kg/m ³)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

c	soğuk taraf
cf	soğuk akışkan
co	helisel boru
cr	kritik
h	sıcak taraf
hf	sıcak akışkan
sh	gövde
v/v	hacimce %
w/w	kütlece %

1. GİRİŞ

Artan dünya nüfusuna bağlı olarak küresel enerji talebi de giderek yükselmektedir. Enerji, küresel iktisadi ve sosyal kalkınmanın temel kaynağı olarak nitelendirilebilir. Fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olduğu bilinmekte ve gelecekte bu kaynakların yerine kullanılacak alternatiflerin yaygınlaştırılması gerekmektedir. Mevcut kaynakların azalma eğiliminde oluşu, yeni alternatiflerin geliştirilmesinin yanı sıra enerji politikalarının düzenlenmesi ve enerji verimliliği konuları da gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bunun yanında, mevcut kaynakların azalışı enerji üretimindeki maliyetleri de arttırmaktadır. Bu nedenle, enerji üretimi ve tüketimi sürecindeki verim kayıplarının en aza indirilmesi önemli bir gerekliliktir. Bu gerekliliklerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilebilmesi için yerine getirilmesi hususunun gün geçtikçe bir zorunluluk haline geldiği ifade edilebilir.

Sürdürülebilir kalkınma ifadesi, çevresel hareket içerisinde ortaya çıkmış olup, bugün için duyulan gereksinimlerin ileriki nesilleri ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden yoksun bırakmadan karşılanması olarak tanımlanabilir. Diğer bir ifade ile çevresel değerler ve doğal kaynakların savurganlığa yol açmadan ve akılcı teknikler kullanılarak ekonomik gelişmenin sağlanabilmesi sürdürülebilir kalkınma olarak ifade edilebilir. Buna göre ekonomik sistemin uzun vadede beşeri talepleri karşılamada ekolojinin canlılığına dayanmaktadır.

Sürdürülebilir kalkınma, hem ulusal hem de küresel ölçekte olan çevre koruma politikalarının ana kavramı olarak bilinmektedir. Dünyamızdaki doğal kaynakların ve doğal kaynaklara bağlı olarak çevremizin, insana bağlı etkenler sebebiyle tükenme noktasına geldiği söylenebilir. Mevcut olan ekonomik kalkınma modellerinin hemen hemen tümü doğal kaynakların ve çevresel kalitenin tahribatı göz önünde bulundurmadan tasarlanmıştır. Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi amacıyla doğal kaynakların herhangi bir dış etki olmadan kendiliğinden yenilenebilmesine olanak tanınması gerekmektedir. İktisadi anlamda değerlendirildiğinde, sürdürülebilir kalkınmanın üretim proseslerinde temiz ve tükenmez kaynakların kullanımına önem vermek, üretimde çevresel etkilere dikkat edilerek bu etkilerden sorumlu olmak ile tanımlanabilir. Buna göre, fiziksel ve biyolojik sistemlerin denge içerisinde olması beklenmektedir. Çevresel olarak bakıldığında, iktisadi kaynak olarak tanımlanmayan atmosfer dengesi, biyolojik

çeşitlilik ve farklı ekosistem bileşenlerinin korunması da sürdürülebilir kalkınma kapsamındadır.

Çevresel sürdürülebilirliğin etkinliği, enerjinin kullanımında temiz ve tükenmez enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, bunların kullanımına öncelik verilmesi ve teşvik edilmesine bağlıdır. Sürdürülebilir kalkınma ifadesinin çevresel yönü, beşeri faaliyetleri de içerisinde barındıran doğal çevre ile ilişkilendirilmektedir. Gereksinim duyulan bütün kaynaklar doğal çevreden bulunabilmekte ve ekolojik sistemlerden enerji üretilerek hammaddelerin iktisadi çıktılarına dönüşümü gerçekleşmektedir. Ek olarak, belirtilen bu dönüşüm prosesi içinde ortaya çıkacak atıkların geri kazanımı da mümkündür. Ancak doğal çevrenin belli sınırları bulunmaktadır. Doğal kaynakların bilinçsizce kullanılması ve yeniden oluşturulmasına müsaade edilmeden tüketilen yenilebilir kaynaklar tüm doğal yaşamı olumsuz olarak etkilemektedir. Bu durum da yeniden oluşturulma oranından daha hızlı bir biçimde kullanılan birçok materyalin yok olmasına neden olmaktadır. Bu yüzden, yenilenemeyen kaynakların tüketiminde kısıtlamaya gidilmesinin yanında yenilenebilir kaynakların da kullanımının daha dikkatli yapılması gerekliliği de göz önünde bulundurulmalıdır. Çevresel anlamda sürdürülebilirliğin başarılı bir şekilde devamı sürdürülebilir kaynakların ve ekolojik çeşitliliğin korunabilmesi ile mümkün olacaktır.

Çevrenin korunması, iktisadi büyüme ve sosyal denge ile alakalı hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için enerji oldukça önemli bir kavramdır. Bu sebeple enerji kavramı sürdürülebilir kalkınma ile ilgili yapılan incelemelerde sıklıkla kullanılmaktadır. Enerjinin üretimi ve tüketiminin çevreye zarar verilmeksizin gerçekleştirilmesi ve ekonomik açıdan uygun olması amaçları sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin yerine getirilmesi için önemli bir husustur. Sürdürülebilir enerji, ihtiyaç duyulan enerjinin en az finansman en az çevresel ve sosyal maliyetle sürekli şekilde karşılanmasını sağlayacak strateji, teknoloji ve uygulamaları kapsamaktadır. Kaynak, gereksinimlerin karşılanması için canlı ve cansız çevreden alınan herhangi bir nesne olarak ifade edilebilmektedir. Enerjinin üretim açısından kaynakları yenilenemez ve yenilebilir kaynaklar olmak üzere iki grupta incelenebilir.

Yenilenemez kaynaklar, fosil kaynaklar olarak da bilinmektedir. Bunlar; petrol, kömür ve doğalgaz gibi insanlar tarafından sürekli olarak tüketilen ve tüketildiği sürece devamlı

biçimde çevremize zararlı etkiler veren ve zamanla azalma eğiliminde olan kaynaklar olarak tanımlanabilmektedir. Yenilenemeyen kaynakların tüketimine bağlı olarak çevre kirliliği, sıcaklık artışları, iklim değişikliği, sellerin oluşumu ve kutuplardaki buzulların erimesi gibi olumsuz durumlara sebep olmaktadır. Belirtilen bu olaylara bağlı olarak dünyamızdaki canlı yaşamı da tehdit altında bulunmaktadır. Bu olumsuzluklar sonucunda, sürdürülebilir kalkınmanın tam tersi bir durum meydana gelmektedir. Yenilenemez kaynakların yaygın biçimde tüketilmesi, insanlığın ekosisteme, canlılara ve gelecek nesillere olan sorumluluklarını yerine getirmediğini açık biçimde göstermektedir.

Enerji kavramı çevresel ve sürdürülebilir kalkınmanın sürekliliğinde önem arz etmektedir. Bu süreklilik adına yenilenebilir enerji temelli uygulamaların yaygın biçimde kullanılması, enerji verimliliği konusunun hem evsel hem de endüstriyel anlamda tüm sektörlerde yaygınlaştırılması gibi etkenlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Sürdürülebilir gelecek kapsamında temiz ve tükenmez enerji kaynaklarının tüketilmesi, zararlı emisyonların azaltılmasına katkı sağladığı gibi, enerji çeşitliliği ve enerji arz güvenliği sağlamaktadır. Sınırlı olan yenilenemeyen kaynakların korunması ve yenilenemeyen yakıtların arzına bağlı fiyat istikrarsızlığı risklerini önleme konusunda da yenilenebilir enerji tüketimi ve enerji verimliliği konularının yardımı bulunmaktadır. Ek olarak küçük ölçekli, dağıtılmış ve modüler teknolojiler ile kayıpların azaltılması, esneklik ve altyapı konularına katkılar sağlamaktadır.

Enerji verimliliği ifadesi, üretimde, konforda ve iş gücünde bir azalma olmaksızın enerjiyi en doğru şekilde kullanmak olarak tanımlanabilir. Diğer bir ifade ile aynı işi daha az enerji kullanarak ya da aynı miktar enerji kullanılarak daha fazla iş yapabilmektir. Enerji verimliliği temelde israfı asgari seviyeye indirmek veya tümüyle ortadan kaldırmak için yapılan çalışmalardır. Elektriksel ve ısı enerjisi verimliliği amacıyla bazı konuların değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunlar, çeşitli prosesler sonucu ortama atılan enerjilerin geri kazanılması, kayıpların önlenmesi, tasarım ve geliştirme aşamasında yeni çözümler üretilmesi, büyük enerji kaybına neden olan uygulamaların revize edilmesi ve bakım işlemlerinin eksiksiz ve zamanında yapılması olarak sıralanabilir.

Enerji verimliliği konusunun önemi ve ihtiyacı pek çok konu ile ilgilidir. Daha önce de bahsedildiği üzere fosil yakıt rezervleri hızla tükenmektedir. Bunun yanında, enerji üretimi ve tüketimi proseslerinde ortaya çıkan olumsuz emisyonlar iklim değişikliği ve küresel

ısınma gibi pek çok olumsuzluğa yol açmaktadır. Konu Türkiye için değerlendirilirse, ülkemizde konu ile ilgili ihtiyaç duyulan kaynakların büyük bölümü yurtdışından ithal edilmektedir. Verilen bu hususlar ve bunlara benzer pek çok örnekten yola çıkarak, enerji verimliliğinin önemi açık biçimde görülebilmektedir. Son yıllarda ülkemizde sanayi sektörünün gelişmesiyle önemi artan enerjinin etkin kullanılması ve enerji yönetimi faaliyetleri, hemen hemen tüm işletmelerin üzerinde durduğu en önemli konu haline gelmiştir. Öne çıkan bu konular, bina sektöründe de önemli bir husus haline gelmiş ve konu yasal düzenlemeler ile de şekillendirilmiştir.

Hem çevremiz, hem de endüstriyel işletmelerin sürdürülebilirliği adına enerji verimliliği, gerek ulusal gerekse uluslararası yasal sözleşmeler ve düzenlemeler sonucunda enerji yönetimi konusu önemli hale gelmiştir. Enerji yönetimi konusu kapsamında, enerjinin verimli kullanımının gelişimi için veri toplanması, verilerin değerlendirilmesi ve verimsizliğe yol açan durumlar adına projeler ve çalışmalar gerçekleştirilmesi süreçlerini içermektedir. Ek olarak, enerjiyi daha verimli ve etkin kullanabilecek çeşitli çalışmaların hayata geçirilmesi bir zorunluluk haline gelmiştir.

Küresel enerji ihtiyacı, hem elektriksel hem de ısı enerjileri kapsamaktadır. Isıl enerjiye hem evsel hem de endüstriyel pek çok proseste ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Daha önce de belirtildiği gibi, elektriksel ve ısı enerjisi talebinin karşılanmasında günümüzde sıklıkla fosil yakıtlar kullanılmaktadır ve bu kullanım pek çok olumsuzluğu da beraberinde getirmektedir. Bu olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması için, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, enerji verimliliği ve tasarrufu gibi çözümlerin hayata geçirilmesi önem arz etmektedir.

Isı değiştiriciler, bir akışkandan diğer bir akışkana ısı transferinin sağlanması için kullanılan sistemlerdir. Isı değiştiriciler ısıtma-soğutma, iklimlendirme, güç üretimi ve kimyasal proseslerde sıklıkla kullanılmaktadır [2,3]. Isı değiştiricilerin yüksek performansa sahip olması, ısı enerjisi sistemlerinin verimli kullanılabilmesi ve böylelikle ekonomik ve çevresel anlamda olumlu etkiler sağlanması için oldukça önemli bir husustur. Bu bağlamda, dolaylı olarak sürdürülebilir kalkınmaya olumlu katkılar sağlanması da söz konusudur.

Farklı alanlarda ve farklı amaçlar için faydalanan ısı değıştirciler, ısı değışim biçimine, kullanılan akışkan sayısına, yapısal özelliklerine, akış biçimlerine, ısı transfer mekanizmalarına ve ısı transfer yüzeyinin ısı transfer hacmine oranına (kompaktlık) göre sınıflandırılmaktadır.

Isı değıştircilerin geometrik olarak pek çok farklı türü bulunmaktadır. Isı değıştirciler, geometrilerine göre boru tipi, plakalı ve genişletilmiş yüzeyli olmak üzere üç ana kısma ayrılabilir [4]. Helisel borulu ısı değıştirciler, boru tipi ısı değıştirciler grubunda bulunmakta, kompakt tasarımları, kolay imal edilebilirliği ve yüksek ısı transferi gibi avantajları ile sıklıkla tercih edilmektedirler [5]. Helisel borulu ısı değıştirciler, eksenel akışkan yönüne dik olarak dolaşan ikinci akışkan sayesinde, ısı değıştirci sistemi içerisindeki ısı sınır tabaka kalınlığını azaltmakta gelişmiş bir ısı transferi sağlamaktadır.

Araştırmacılar yakın zamana kadar malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini anlayabilmek için büyük boyutlu ve kompleks yapıları incelemiş ve sonrasında bu yapıların daha basit ve küçük formlarını araştırmıştır. Atom ve moleküllerin tek tek gözlenebilmesine olanak tanıyarak elektron mikroskopunun icadıyla birlikte atomik seviyedeki parçacıklar kullanılarak yeni tip malzemelerin üretilmesi mümkün kılınmıştır. Bu gelişmeler, nanoteknoloji biliminin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Nanoteknoloji biliminin temelini nanomalzemeler oluşturmaktadır. 100 nanometre ve daha az ortalama kristal boyutuna sahip malzemeler nanopartikül (nanoparçacık) olarak tanımlanmaktadır.. Nanomalzeme çeşitlerinden biri olan nanopartiküller gelişmiş özelliklerinden dolayı pek çok uygulamada kullanılmakta ve konu ile ilgili araştırmalar devam etmektedir.

Nanopartiküllerin fiziksel, kimyasal, ısı ve manyetik pek çok gelişmiş özelliği bulunmakla birlikte, bu özellikler sayesinde kullanım alanları da geniş bir yelpazeye sahiptir. Büyük partiküllere göre daha yüksek yüzey/hacim oranına sahip olan nanopartiküller, yüksek ısı iletkenliğe sahip türlerinin de seçilmesi ile ısı transferi uygulamalarında da kullanılabilir. Parçacıkların boyutlarının küçülmesi ile yüzey üzerindeki atom miktarı artmaktadır. Buna bağlı olarak malzemenin çevresiyle olan etkileşimi de etkilenmektedir. Bu tür malzemelerin gelişmiş özelliklerinin bulunması ile elektronik

malzemeler, ısı transferi uygulamaları, sağlık sektörü ve soğutma uygulamaları gibi farklı işlemlerde nanopartiküllerin kullanımına olanak sağlanmıştır.

Isı değiştiricilerin performansının farklı geometrik modifikasyonlar ile arttırılmasının yanı sıra, kullanılacak iş akışkanının yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması da ısı transferinde meydana gelecek sınırlandırmaları azaltacaktır [6]. Son yıllarda oldukça popüler hale gelen araştırma konularından biri olan nanoakışkanlar, ısı transferinin iyileştirilmesi hususunda kritik bir öneme sahiptir [7]. Isı değiştiricilerinde kullanılan iş akışkanının termofiziksel özelliklerinin ısıl anlamda iyileştirilmesi, nanopartiküller kullanılarak gerçekleştirilebilir [8]. Isı değiştiricilerde yapılacak ısı transfer yüzey alanının arttırılması ve akış yolu düzenlemeleri gibi geometrik modifikasyonların yanında, yüksek ısıl iletkenliğe sahip nano boyuttaki parçacıkların çalışma akışkanına süspansiyon edilmesi, ısıl verimi arttıracak bir başka çözümdür [9].

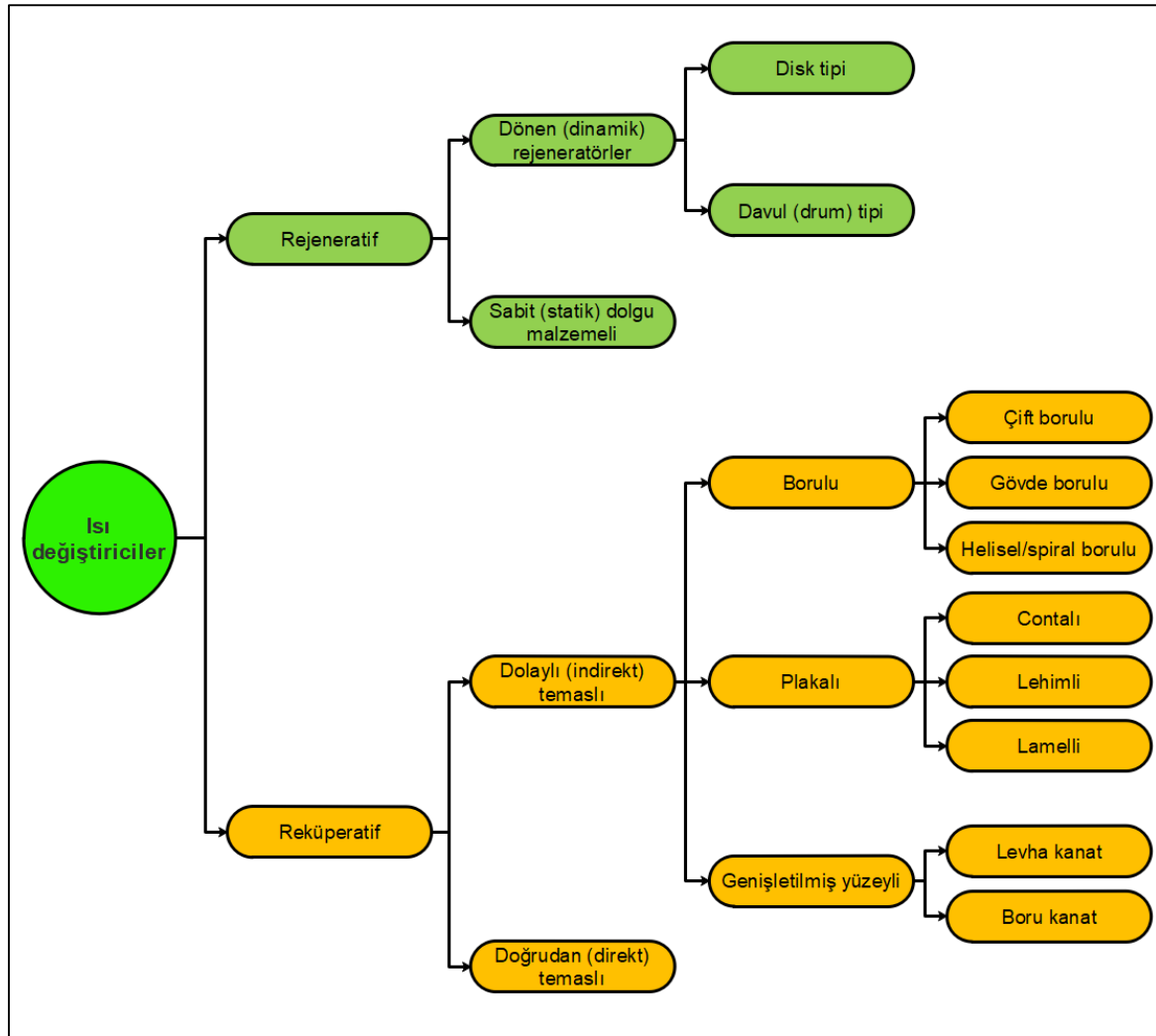
Temel çalışma sıvısı içine nano boyutta partiküller eklenmesi ile yüksek ısı iletim katsayısına sahip nanopartiküllere bağlı olarak oluşturulan yeni çalışma akışkanının da ısıl iletkenliği artmaktadır. Buna ek olarak, nanopartiküllerin çalışma akışkanına eklenmesi ısı transferi yüzey alanını arttırmakta, nanoakışkan içindeki nanoparçacıklar sayesinde türbülans şiddeti de artmaktadır. Ayrıca, bu modifikasyon ile akışkanın ısı kapasitesi de artmaktadır. Akışkan içerisindeki parçacık boyutunun düşük olması, akışkanın kullanıldığı ısıl sistemlerde tıkanıklık durumunun önüne geçmekte ve ısı iletim katsayısı değerinde elde edilen iyileştirme oranı ile sistemin pompalama gücünde de tasarruf edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, helisel borulu ısı değiştiriciler sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Tezin esas amaçları, helisel borulu ısı değiştiriciler için yeni ve yüksek performansa sahip bir tasarım önerilmesi ve tasarlanan bu helisel borulu ısı değiştiricinin performansının tekli ve hibrit nanoakışkanlar ile arttırılmasıdır. Tez çalışması kapsamında hem geometrik modifikasyonların helisel borulu ısı değiştiricilere uygulanması hem de çalışma akışkanının termofiziksel özelliklerinin geliştirilerek sistem içerisinde kullanılması ile helisel borulu ısı değiştiricilerin ısıl performanslarının arttırılması hedeflenmiştir. Tez çalışmasının ilk aşamasında, helisel borulu ısı değiştiriciler için yeni bir akış yolu tasarlanmıştır. Tasarlanan ısı değiştiricinin kanatçıksız ve kanatçık içeren tiplerinin ısıl performansı, konvansiyonel helisel borulu ısı değiştirici ile sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Sayısal analizler için hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniğinden

faýdalanılmıştır. Sayısal analiz sonuçları sonrasında imal edilen kanatçyksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiriciler deneysel olarak incelenmiştir. Deneýlerde helisel borulu ısı değiştiricilerin sıcak tarafında saf su, TiO_2/su tekli nanoakışkan ve $\text{TiO}_2\text{-CuO}/\text{su}$ hibrit nanoakışkan farklı debilerde denenmiştir. Sonuçlar analiz edilmiş, detaylı olarak tartışılmış ve literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

2. ISI DEĞİŞTİRİCİLER

Isı değıştirciler (ısı eşanjörleri), farklı sıcaklığa sahip ve birbirinden katı bir cıdar yardımıyla ayrılmış iki akışkanın arasındaki ısı geçişini sağlamak amacıyla kullanılan cihazlar olarak tanımlanmaktadır [4]. Akışkanların direkt olarak temas ettiği bazı uygulamaları da bulunmaktadır. Isı değıştirciler, ısı enerjiden maksimum derecede faydalanmakta ve yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Isı değıştirciler, ısıtma-soğutma, kimyasal prosesler, atık ısı geri kazanımı, ulaşım, savunma ve güç üretimi gibi pek çok farklı uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır [2-4]. Şekil 2.1’de ısı değıştircilerin sınıflandırılmasını içeren bir diyagram gösterilmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünün devamında dolaylı (indirekt) temaslı ısı değıştirici tipleri sunulmuştur.



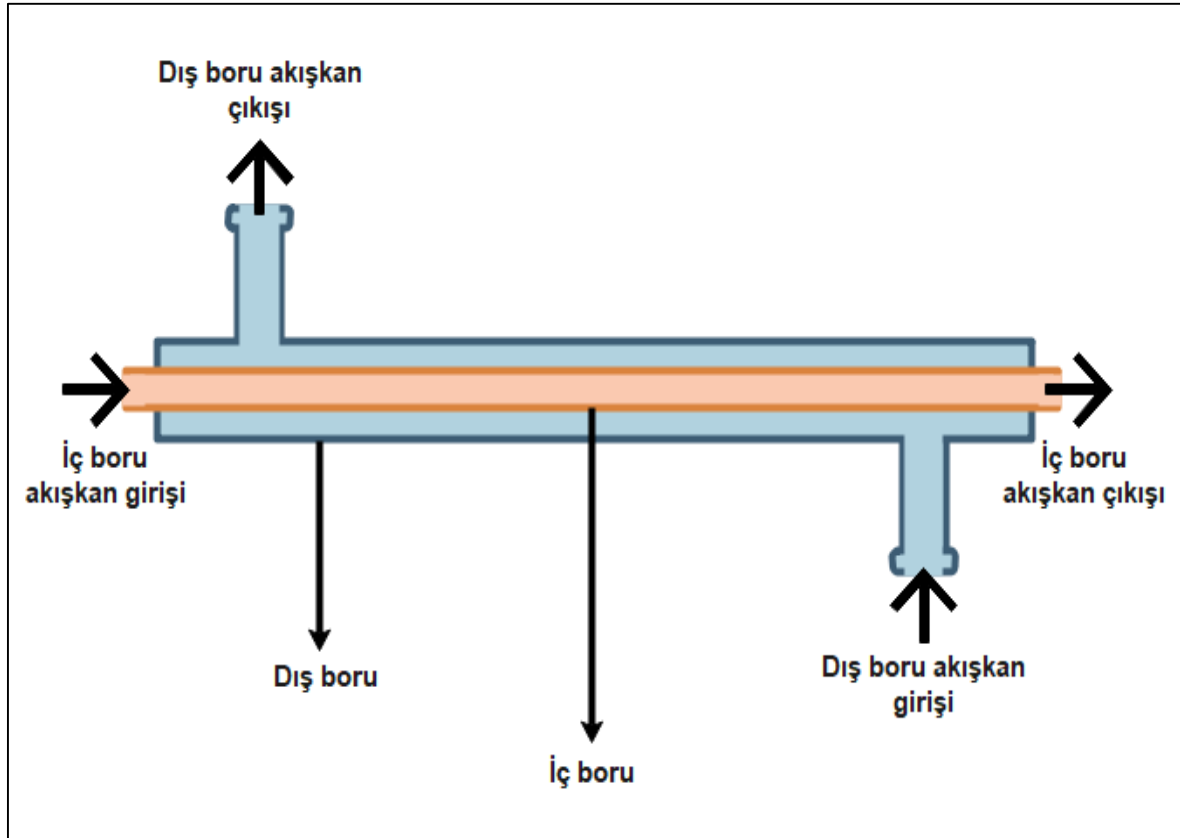
Şekil 2.1. Isı değıştircilerinin sınıflandırılması [4]

2.1. Borulu Isı Değiştiriciler

Borulu ısı değiştiriciler, dairesel borular kullanılarak üretilmektedir. Bir akışkan boru içerisinden dolaşırken, diğer akışkan ise boru dışından akarak ısı transferi gerçekleşmektedir. Boru apı, boru uzunluğu, boru sayısı ve borular arasındaki mesafe gibi geometrik parametreler değiştirilebildiğinden, tasarım açısından farklı pek çok borulu ısı değiştiriciye rastlamak mümkündür.

2.1.1. Çift borulu ısı değiştiriciler

Bu tip ısı değiştiricilerde, farklı çaptaki iki boru eş merkezli olarak yerleştirilirler. Çift borulu ısı değiştiriciler, en basit ısı değiştirici geometrisi olarak bilinmektedirler. Sistemdeki akışkanların biri dış borudan, diğeri ise i borudan akmaktadır. Çift borulu ısı değiştiriciler, talep edilen sıcaklık farkı ve basınç dışümü değerlerini karşılayabilmek adına seri ya da paralel olarak düzenlenebilmektedir. şekil 2.2’de çift borulu bir ısı değiştiriciye ait şematik bir görsel sunulmuştur.



şekil 2.2. Çift borulu ısı değiştiricinin şematik gösterimi [10]

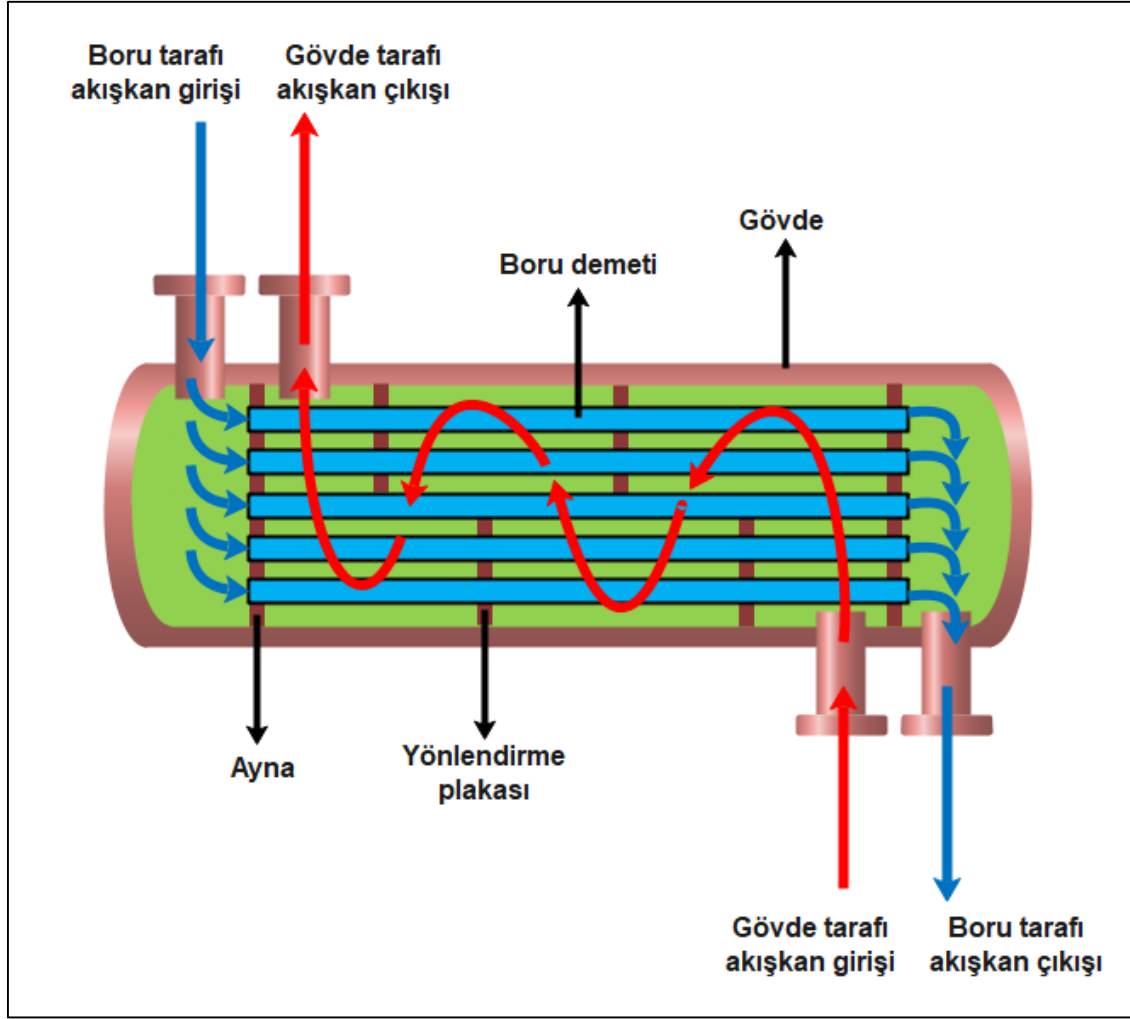
Genelde çoklu üniteler halinde kullanılan çift borulu ısı değiştiricileri, yüksek basınçlara dayanabilmektedir. Ek olarak bu tip ısı değiştiricilerinde zıt (karşıt) akış elde etmek oldukça kolaydır. Temizlik işlemi kolay olduğundan kirletici akışkanlar bu sistemlerde kullanılabilir. Bu tip ısı değiştiricileri genelde daha küçük ısı transfer alanlarına ihtiyaç duyulan proseslerde duyulur ısıtma ve soğutma için kullanılırlar. Basit geometrisi sayesinde bakım ve tamiri oldukça kolaydır.

2.1.2. Gövde borulu ısı değiştiriciler

Endüstride sıklıkla kullanılan gövde borulu ısı değiştiriciler, silindirik bir gövde ve gövde içerisine paralel olarak yerleştirilmiş borulardan oluşmaktadır [11]. Bir akışkan gövde kısmından akarken, diğer akışkan ise gövde içerisine yerleştirilmiş boru demeti üzerinden akmaktadır. Gövde kısmındaki akışı yönlendirmek ve boru demetine destek olması amacıyla gövde kısmına yönlendirme plakaları da eklenebilir. Şekil 2.3'te bir gövde borulu ısı değiştiricinin şematik gösterimi sunulmuştur.

Gövde borulu ısı değiştiricileri, kimya endüstrisi, termik santraller ve petrol rafinerileri gibi pek çok farklı endüstride kullanılabilmektedir. Temizlik ve bakım işlemleri için demonte edilebilecek şekilde tasarlanırlar. Bu nedenle bakım ve temizlikleri kolaydır. Ek olarak bu tip ısı değiştiricilerde çoklu üniler yapmak oldukça kolaydır. Farklı metal tiplerinden imal edilebildikleri için, akışkan sınırlaması çok azdır. Yaygın olarak kullanıldıklarından, kolay şekilde ulaşılabilir niteliktedirler.

Gövde borulu ısı değiştiricilerin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Gövde borulu ısı değiştiriciler, yüksek plan alanına gereksinim duyarlar. Ek olarak, boru demetini sökebilmek adına ekstra alana ihtiyaç duyulmaktadır. Genellikle büyük çaptaki uygulamalarda kullanıldığından, planlama konusuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Daha düşük sıcaklık ve basınç uygulamaları için daha kompakt tasarıma sahip ısı değiştiricilerin tercih edilmesi, maliyeti önemli ölçüde azaltacak önlemlerdendir.



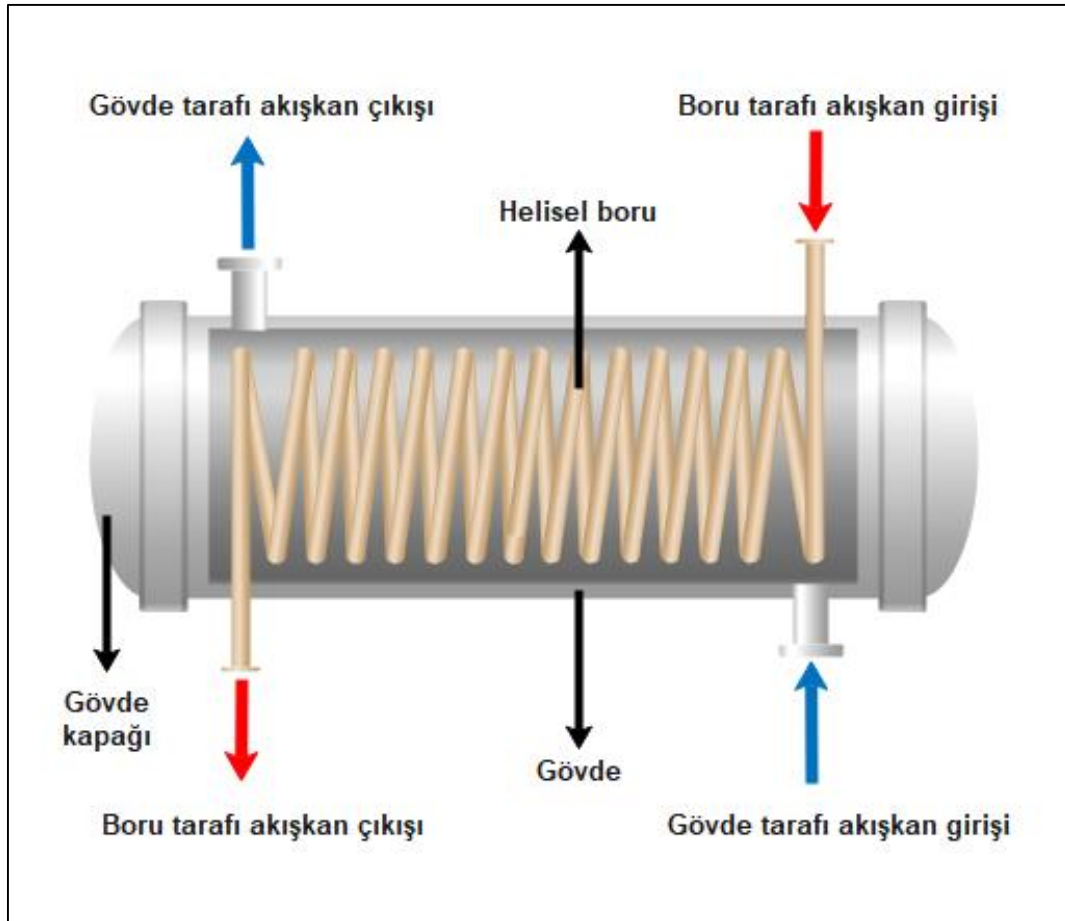
Şekil 2.3. Gövde borulu ısı değiştiricinin şematik gösterimi [11]

2.1.3. Helisel borulu ısı değiştiriciler

Helisel borulu ısı değiştiriciler, borulu tip ısı değiştiriciler grubunda yer alan sistemlerdir. Kompakt tasarımları, üretim kolaylığı ve ısı transfer verimliliği nedeniyle helisel borulu ısı değiştiricileri, yaygın kullanılan kavisli borulu ısı değiştirici çeşididir. Gıda, nükleer enerji, ısı geri kazanımı, soğutma, mahal ısıtma ve iklimlendirme gibi pek çok endüstriyel uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Helisel borulu ısı değiştiricileri, eksenel akışkan yönüne dik olarak dolaşan ikinci akışkan sayesinde, sistem içerisindeki ısı sınır tabaka kalınlığını azaltarak gelişmiş bir ısı transferi sağlamaktadır [5]. Bu yönüyle düzlemsel borulu ısı değiştiricilerinden daha yüksek performansa sahiptirler [4].

Helisel borulu ısı değiştiricileri genel olarak bir gövde ve gövde içerisinde yerleştirilmiş olan helisel olarak sarılmış boru bileşenlerinden oluşmaktadır. Şekil 2.4'te helisel borulu

bir ısı değiştiriciye ait şematik görsel yer almaktadır. Helisel borulu ısı değiştiricilerinde, helisel boru malzemesi seğimi de performansı önemli ölçüde etkilemektedir. Bu bağlamda, bakır ya da alüminyum gibi yüksek ısıl iletkenliğe sahip boru malzemeleri kullanılması ısı transferini önemli ölçüde arttırmaktadır. Helisel borulu ısı değiştiricilerinin pek çok avantajının yanında bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunların başında ise temizlik sorunu gelmektedir. Tıkanıklık ve temizlik gibi bazı problemlerin giderilmesi amacıyla demonte edilerek gerekli bakımların yapılması oldukça zordur. Bu nedenle yivli borular yerine pürüzsüz boruların sistem içerisinde kullanılması amacıyla tercih edilmesi daha uygun olacaktır.



Şekil 2.4. Helisel borulu ısı değiştiricinin şematik gösterimi [12]

Helisel borulu ısı değiştiricilerinde ısı transferi, helisel boru boyutu, helisel boru sarım sayısı, gövde boyutu, kütlesel debi ve kullanılan iş akışkan gibi parametrelere bağlıdır [13]. Helisel borulu ısı değiştiricileri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların sabit duvar sıcaklığı ve sabit ısı akısı olmak üzere iki temel sınır koşuluna odaklandığı görülebilmektedir [14-16].

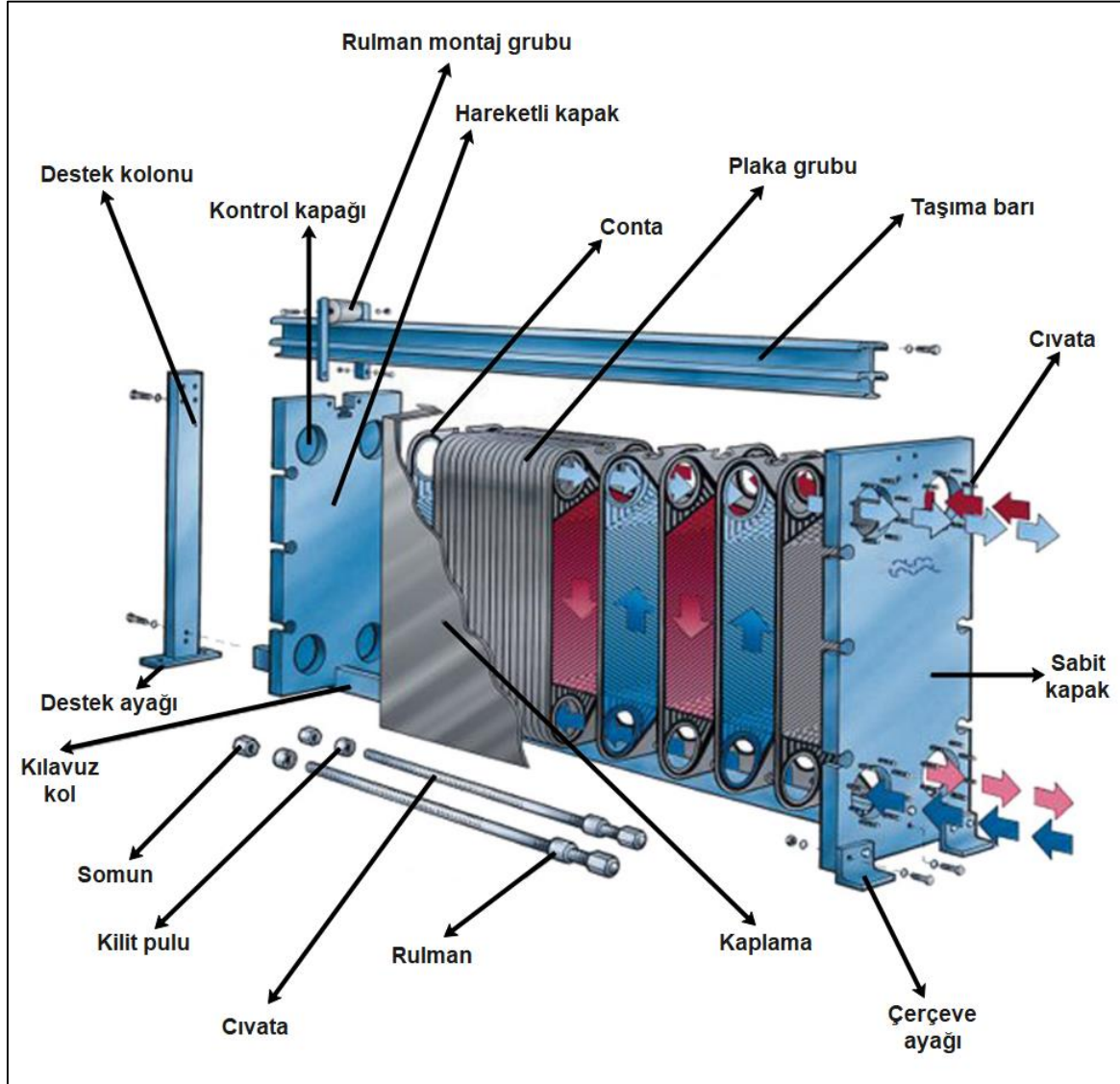
2.2. Plakalı Isı Değiştiriciler

Plakalı ısı değiştiricileri ısı transfer yüzey alanlarının geniş olmasından dolayı verimli ısı değiştiriciler olarak bilinmektedir. Plakalı ısı değiştiricilerde, akış kanalları ince plakalardan imal edilmektedir. Plakalı ısı değiştiriciler, contalı, lehimli ve lamelli olmak üzere üç ana kısma ayrılabilir [4]. Plakalı ısı değiştiricilerde, birbirinden farklı sıcaklıkta olan akışkanlar, düzlemsel veya desenli plakalar yardımı ile birbirinden ayrılmaktadır ve karışması engellenmektedir.

Contalı plakalı ısı değiştiriciler, genellikle endüstriyel ısıtma-soğutma sistemleri ve gıda sektöründe tercih edilmektedir [17]. Contalı plakalı ısı değiştiricilerde plaka grubu ihtiyaç duyulan miktarda artırılıp azaltılabilmektedir. Böylelikle istenen ısı kapasitenin sağlanmaktadır. Temelde her bir plaka, sızdırmazlığın sağlanması amacıyla birer conta ile birlikte montajlanırlar. Ek olarak bu contalar, sıcak ve soğuk akışkanın yönlendirilmesini sağlamak ve birbirine karışmasını engellemektedir. Contalı plakalı ısı değiştirici sistemi, cıvatalar ile birleştirilmektedir. Bu sistemlerin tasarımı, sistem bileşenlerinin kolay sökölüp takılmasına olanak sağlamak ve temizlik işlemlerini oldukça kolaylaştırmaktadır. Contalı plakalı ısı değiştiricilerde, contalar zayıf noktalar olarak nitelendirilmekte ve conta malzemesi seçiminin oldukça önemli bir husus olduğu bilinmektedir. Contaların sistemde bulunması her zaman sızıntı riskinin oluşmasına neden olmaktadır. Ek olarak, çalışma sıcaklıkları da conta malzemesi tarafından sınırlandırılmaktadır. Plakaların düzlemsel oluşu, conta malzeme çeşidi ve sistem çerçevesinin konstrüksiyonu sebebiyle yüksek basınçlardaki prosesler için uygun değildir. Bunun yanında, contalı plakalı ısı değiştiricilerde akışkanların karışma olasılığı oldukça düşüktür ve kaçaklar dış tarafa doğrudur. Ancak kullanılan contalar zamanla özelliklerini kaybedeceğinden, belirli aralıklarla contaların değiştirilmesi gerekmektedir. Şekil 2.5'te bir contalı plakalı ısı değiştirici sisteminin bileşenleri sunulmuştur.

Lamelli plakalı ısı değiştiricileri, bir gövde içerisine yerleştirilmiş olan ısı transferi bileşenlerini içermektedir. Lamelli plakalı ısı değiştiriciler, bir gövde içerisine uzunlamasına yerleştirilmiş bir dizi kaynaklanmış paralel ve ince kanallardan oluşmaktadır. Bu kanallar yassı borular ya da dikdörtgen kanallar şeklindedir. Lamelli plakalı ısı değiştiricilerde, gövde tarafında tek geçişli bir akış gerçekleşmekte ve diğer akışkan da kanallar arasındaki plakalardan uzunlamasına geçmektedir. Bu tip ısı

değiştiricilerde genellikle yüzey desenleri ya da kanatçıklar gibi elamanlar tercih edilmemektedir [4]. Sahip olduğu pürüzsüz yüzeyler sayesinde lamelli plakalı ısı değiştiriciler daha az kirlenmektedirler.



Şekil 2.5. Contaıı plakalı ısı değiştirici bileşenleri [18]

Lehimli plakalı ısı değiştiricilerde conta bulunmamakla birlikte, contaıı plakalı ısı değiştiricilere benzer şekilde dalgalı yüzeye sahip ince plakalardan imal edilmektedirler. Genelde küçük ebatlarda üretilen lehimli plakalı ısı değiştiriciler, vakumlu fırınlarda kaynaklanarak üretilmektedir. Kaynaklama işlemi gerçekteştirildiğinden, bu tip ısı değiştiricilerde plaka ekleme veya çıkarma mümkün olmamaktadır. Lehimli plakalı ısı değiştiricilerde conta kullanılmadığından yüksek sıcaklık ve basınçlarda çalışılabilmesine olanak sağlanmaktadır.

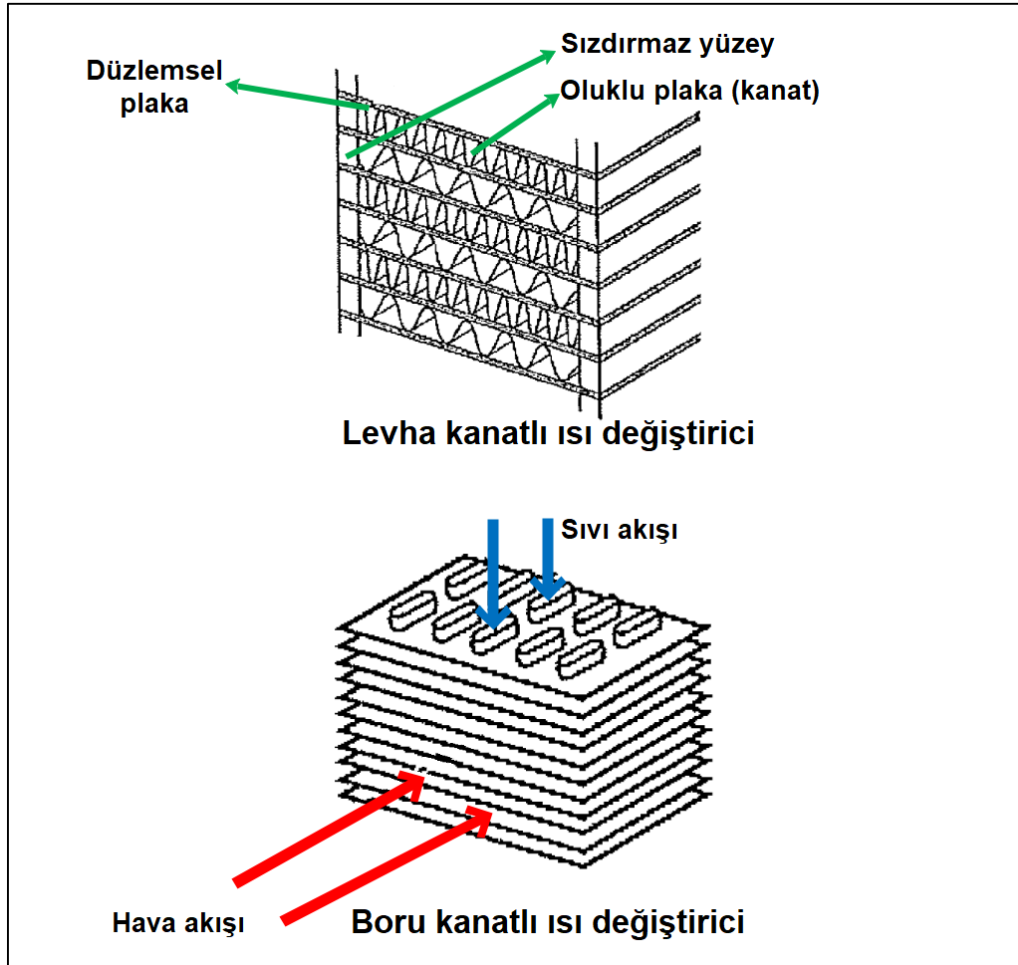
2.3. Genişletilmiş Yüzeyli Isı Değiştirciler

Genişletilmiş yüzeyli ısı değiştirciler, temel ısı transfer yüzeyine farklı genişletilmiş ısı transfer yüzeyleri eklenmesi ile oluşturulurlar. Bu tip ısı değiştirciler, levha kanatlı ve boru kanatlı olmak üzere iki kısma ayrılabilir [4]. şekil 2.6’da genişletilmiş yüzeyli ısı değiştircilerin şematik gösterimi sunulmuştur.

Bilindiği üzere, gaz tarafındaki ısı transfer katsayısı sıvı tarafındakine göre oldukça düşüktür. Bu yüzden genişletilmiş ısı transfer yüzeyleri genellikle gaz tarafındaki ısı transfer alanını arttırmak için kullanılmaktadır. Kanatçık gibi genişletilmiş ısı transfer yüzeyleri genellikle gaz-gaz ve gaz-sıvı fazlarındaki akışkanların kullanıldığı sistemlerde kullanılmaktadır. Bu tip ısı değiştircilerde iki akışkan genellikle birbirine dik olarak hareket etmektedir ve bu akış tipi çapraz akış olarak tanımlanmaktadır. Genişletilmiş ısı transfer yüzeylerinin kullanılması daha kompakt bir ısı değiştirci tasarımına olanak sağlamaktadır. Bu tip ısı değiştirciler, ağırlık ve hacim açısından kısıtlamaların olduğu uygulamalarda tercih edilmektedirler.

Levha kanatlı ısı değiştirciler genel olarak, otomobil ve uçak motorları soğutma sistemleri, gaz ve buhar türbinleri, soğutma ve iklimlendirme sistemleri, ısı pompaları ve enerji geri kazanım sistemlerinde kullanılmaktadır. Tek fazlı ve çift fazlı akışlarda kullanılabilen levha kanatlı ısı değiştircilerde akış sınırlaması kullanılan malzemeye bağlı olarak değişmektedir.

Boru kanatlı ısı değiştirciler ise güç santralleri, taşıtlar, pervaneli soğutma grupları ve iklimlendirme-soğutma sistemlerinde kullanılabilir. Bu tip ısı değiştircilerin kullanım sıcaklıkları kanatların boruya bağlantı şekline göre değişmektedir. Bunun yanında, sisteme eklenen kanatların oluşturduğu ilave basınç kayıpları hesaplamalarda göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.6. Genişletilmiş yüzeyli ısı değıştiricilerin şematik gösterimi [4]

3. NANOAKIŞKANLAR

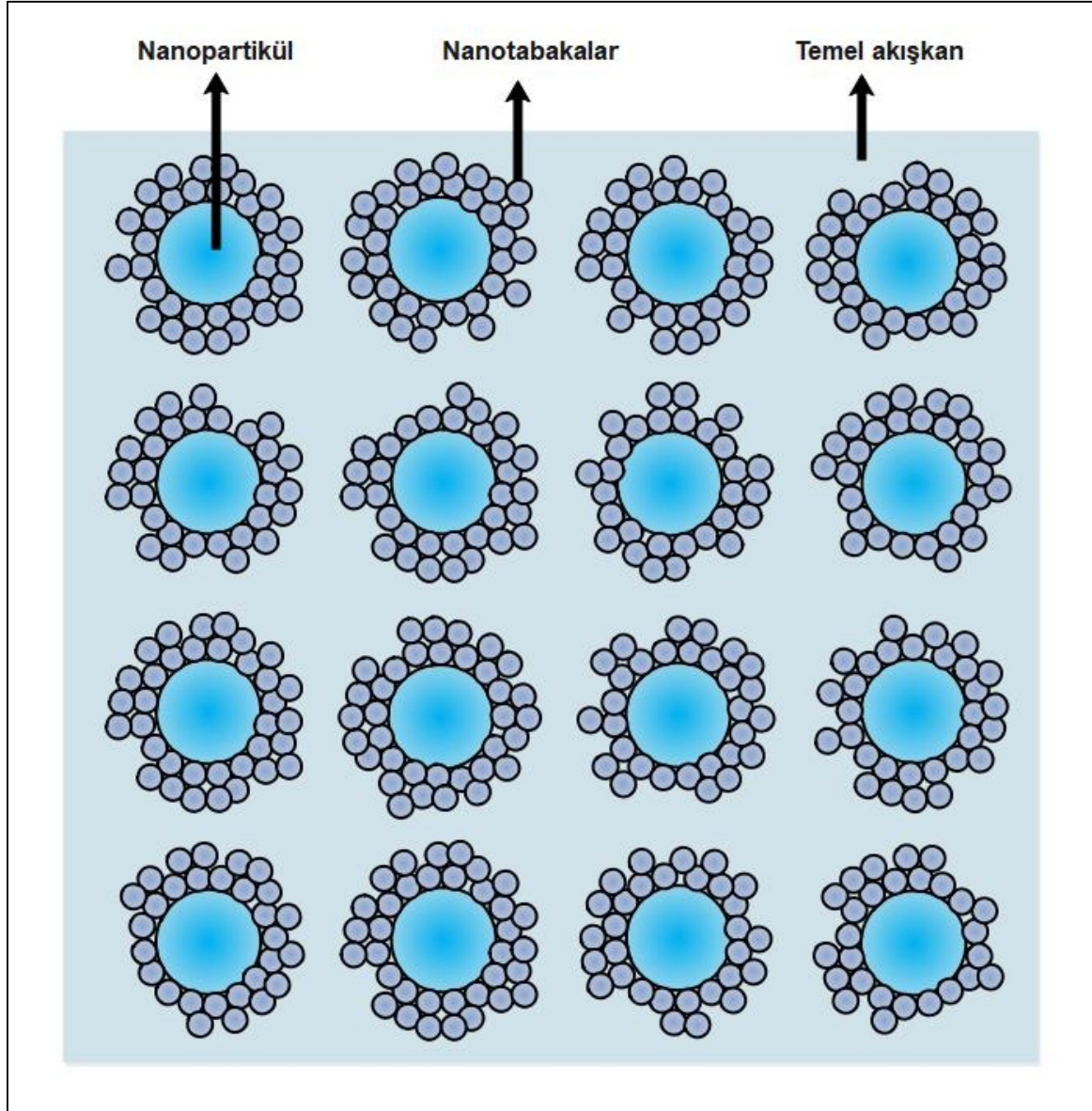
Teknolojik gelişmeler sonucunda pek çok proseste kullanılmak üzere yeni tip malzemeler geliştirilmektedir. Geliştirilen bu yeni malzemeler, yüksek teknoloji uygulamalarında kullanılması amaçlanan ve yüksek katma değere sahip malzemeler olarak bilinmektedir. Bu malzemeler genellikle spesifik görevler göz önünde bulundurularak ve yüksek performansa sahip olacak şekilde tasarlanarak geliştirilmektedirler.

Yakın bir zamana kadar, araştırmacılar malzemelerin fiziğini ve kimyasını anlayabilmek adına kullandıkları genel yöntem, büyük boyutlu ve karmaşık yapıları incelemek ve sonrasında, belirtilen bu yapıların daha küçük ve basit yapı taşlarını incelemek olmuştur. Bunun aksine, atomların ve moleküllerin tek tek gözlenmesine izin veren elektron mikroskobu teknolojisinin icadı ile birlikte atomik seviyedeki bileşenler kullanılarak yeni malzemelerin tasarlanması mümkün duruma gelmiştir.

Nanomalzemeler, nanoteknoloji biliminin temelini oluşturmaktadır. En az bir boyutta 100 nanometre ve daha az ortalama kristal boyutuna sahip malzemeler nanopartikül (nanoparçacık) olarak adlandırılmaktadır. Nanopartiküller, nanomalzemeler altında incelenmekle birlikte, lamelli ve tabakalı nanoyapılar, kütsel nanoyapılı malzemeler ve telsi nanoyapılan diğer nanomalzemelerdendir.

Son yıllardaki araştırmalar sayesinde, nanopartiküllerin fiziksel, kimyasal, manyetik ve ısı pek çok olumlu özelliklerinin olduğu tespit edilmiştir. Nanopartiküller, büyük partiküllere göre daha yüksek yüzey/hacim oranına sahiptirler. Partikül boyutu küçüldükçe yüzey üzerinde bulunan atom miktarı artmakta ve bununla birlikte materyalin çevresi ile olan etkileşimi değişmektedir. Nanopartiküllerin olumlu özelliklerinin tespiti ile bu malzemelerin elektronik malzemeler, soğutma uygulamaları, sağlık sektörü ve ısı transferi işlemleri gibi pek çok uygulamada kullanımına olanak sağlanmıştır.

Nanoakışkan kavramı ilk olarak Choi (1995) tarafından kullanılmış olup, nanopartiküllerin bir iş akışkanı içerisinde kullanılarak, akışkanın ısı iletkenliğinin artırılması prensibine dayanmaktadır [19]. Yapılan araştırma sonuçlarına göre, nanopartiküllerin çalışma akışkanı içerisinde kullanılması ile yüksek ısı iletim katsayısı değerlerine ulaşıldığı belirtilmiştir. Nanoakışkanlar bir temel akışkan, nanopartiküller ve nanotabakalardan oluşmaktadır. Şekil 3.1’de nanoakışkan yapısının şematik bir gösterimi sunulmuştur.

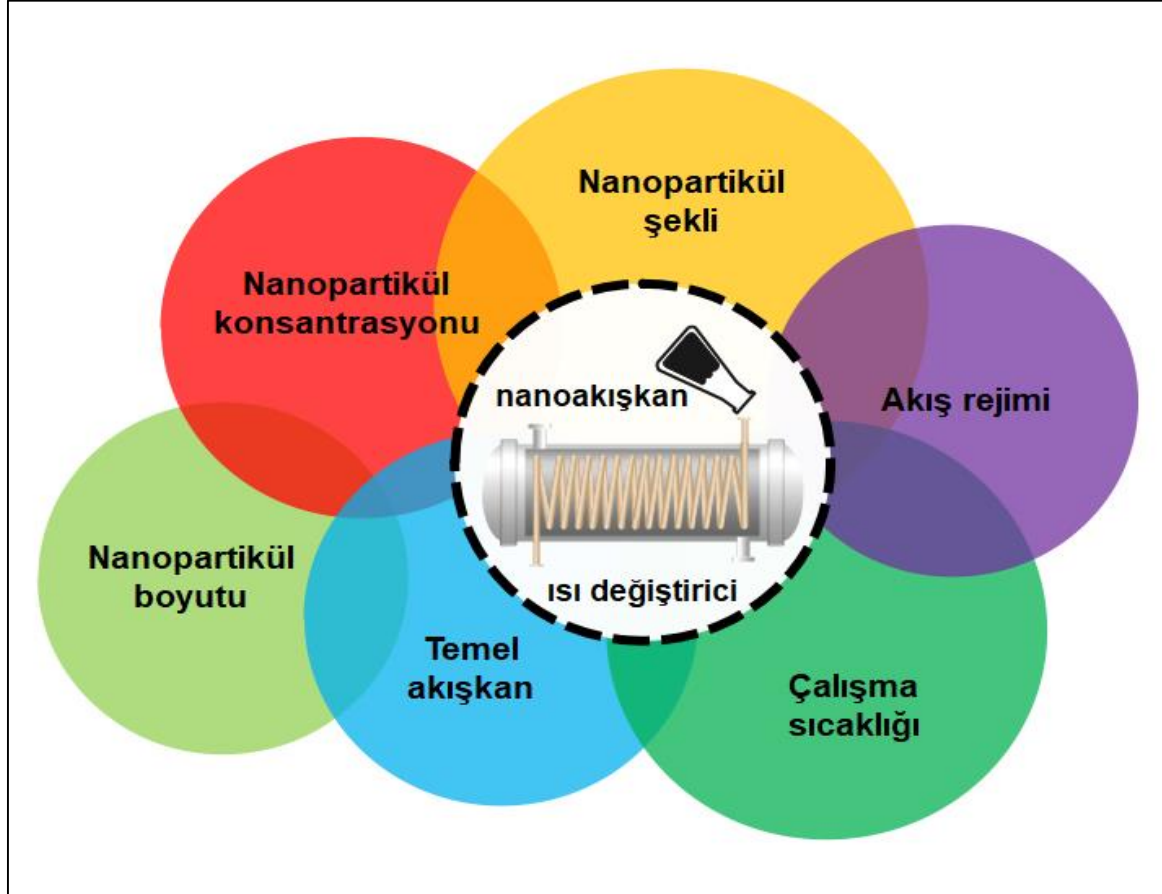


Şekil 3.1. Nanoakışkan yapısı gösterimi [20]

Temel akışkanın içerisine nanopartiküller eklenmesi ile yüksek ısı iletkenliğe sahip nanopartiküller oluşturulan yeni akışkanın (nanoakışkan) ısı iletim katsayısını arttırmakta, ısı transfer yüzey alanı artmakta, akışkanın ısı kapasitesi arttırılmakta ve nanoakışkan içerisindeki nanopartiküller türbülans şiddetinin artmasını sağlamaktadır [21]. Ek olarak, sıvı içerisindeki partikül boyutunun oldukça düşük oluşu, akışkanın kullanıldığı ısıl sistemdeki tıkanıklıkların önüne geçmekle birlikte ısı iletkenlik değerinde elde edilen artış oranı pompalama gücünde de tasarruf sağlamaktadır [22].

Nanoakışkanların ısıl davranışları farklı parametrelere bağlı olarak değişmektedir ve yüksek ısıl performans elde etmek için bu parametreler göz önünde bulundurulmalıdır.

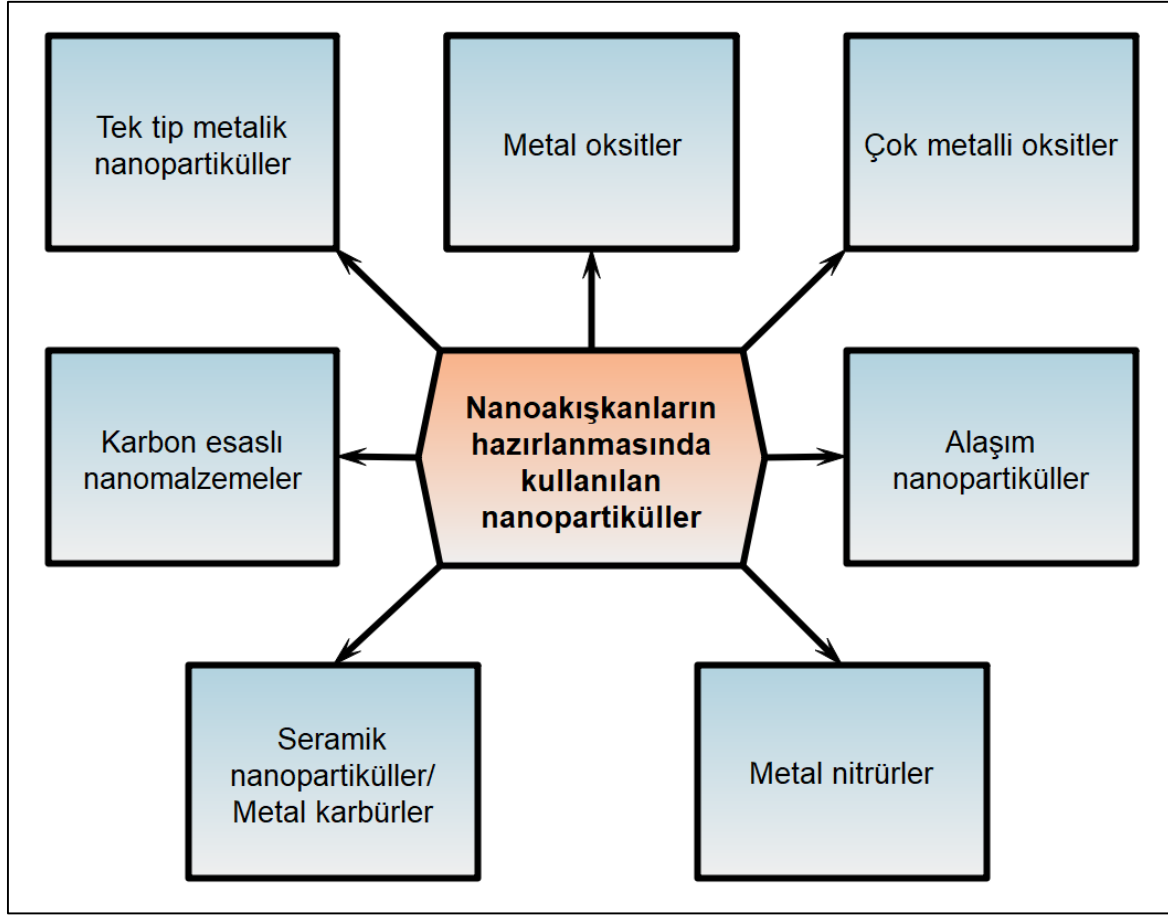
Şekil 3.2’de Nanoakışkanların ısıl davranışını etkileyen temel faktörler sunulmuştur. Partikül boyutu, partikül şekli, partikül konsantrasyonu ve temel akışkan özellikleri gibi parametreler nanoakışkanların ısıl ve akış davranışını etkileyen önemli parametreler olarak sıralanabilir [21, 22].



Şekil 3.2. Nanoakışkanların ısıl davranışını etkileyen temel faktörler

3.1. Nanoakışkan Çeşitleri

Daha önce de bahsedildiği üzere, nanoakışkanlar bir temel akışkan ve nanopartiküllerden oluşmaktadır. Çalışma akışkanı olarak, su, madeni yağlar ve etilen glikol gibi sıvılar kullanılabilir. Ek olarak belirtilen bu akışkanların karışımları da nanoakışkanlarda temel akışkan olarak tercih edilebilmektedir. Kullanılan nanopartiküller ise tek tip metalik nanopartiküller, metal oksitler, alaşım nanopartiküller, çok metalli oksitler, metal nitürler, karbon esaslı nanopartiküller, seramik malzemeler ve metal karbürler olarak gruplandırılabilir [21, 22]. Şekil 3.3.’te nanoakışkan hazırlanmasında kullanılan nanopartiküllere ait şematik bir görsel sunulmuştur.



Şekil 3.3. Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan nanopartikül çeşitleri

Metalik nanoparçacıkların ısı iletkenlikleri oldukça yüksektir. Bu sebeple, bu parçacıklar kullanılarak hazırlanan nanoakışkanların ısı iletim katsayısı, diğer tip nanoparçacıkların kullanıldığı akışkanlara göre oldukça fazladır. Tek tip metalik nanopartikül esaslı nanoakışkanlarda kullanılan malzemelere örnek olarak Fe (demir), Mg (magnezyum), Zn (çinko), Ag (gümüş) ve Au (altın) verilebilir. Bunun yanında, CuO (bakır oksit), TiO₂ (titanyum dioksit) ve Al₂O₃ (alümina) gibi metal oksitler de nanoakışkan yapımında kullanılabilir. Nanoakışkan yapımında kullanılan bir diğer partikül tipi ise çok metalli oksitlerdir. NiFe₂O₄ (nikel ferrit) ve ZnFe₂O₄ (çinko ferrit) bu tip malzemelere örnek olarak verilebilir. Tek tip metalik, metal oksit ve çok metalli oksit nanopartiküllere ek olarak, Ag-Al, Ag-Cu ve Al-Cu gibi alaşım metallere oluşan nanopartiküller de ısı sistemlerinde kullanılmak üzere nanoakışkan hazırlanmasında tercih edilebilir. SiN (silisyum nitrür) ve TiN (titanyum nitrür) gibi metal nitrürler de nanoakışkan kullanımında kullanılan malzemelerdendir [22].

Karbon esaslı nanopartiküller, yüksek ısı iletim katsayısına ve düşük yoğunluk değerine sahiptirler [21]. Karbon nanotüp (tek duvarlı ve çok duvarlı), grafit ve elmas gibi malzemeler karbon esaslı nanopartiküllere örnek olarak verilebilir.

Seramik nanopartiküller/metal karbürler de nanoakışkan yapımında tercih edilebilir. Bu tip malzemeler yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemeler olup, üretimi diğer nanopartiküllere göre daha kolay niteliktedir. Seramik esaslı nanopartiküllere MgO (magnezyum oksit), SiO₂ (silisyum dioksit) ve CaO (kalsiyum oksit) örnek olarak verilebilir [21].

3.2. Nanopartikül Hazırlama Yöntemleri

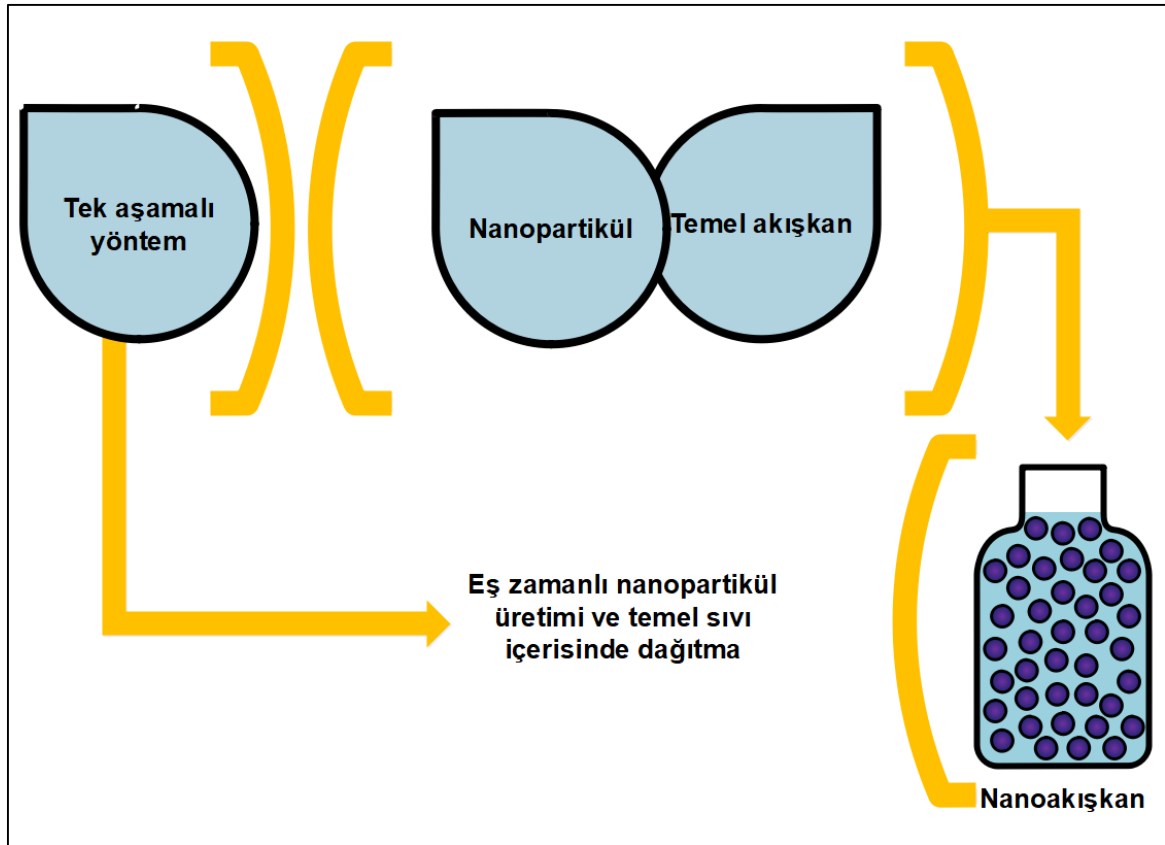
Nanopartiküller genelde iki yöntemle hazırlanmaktadır. Bunlar aşağıdan yukarı (bottom up) ve yukarıdan aşağı (top down) yöntemleridir [21]. Aşağıdan yukarıya tekniğinde ilgili malzemenin parçacık boyutunun nanometre seviyesine getirebilmek için atomik ya da moleküler boyuttaki partiküller büyütülmektedir. Bu yöntemde kimyasal tepkilerden faydalanılmaktadır. Gaz yoğunlaştırma metodu, sprej piroliz, sol jel, kimyasal buhar kaplama ve kimyasal buhar yoğunlaştırma gibi işlemler aşağıdan yukarıya tekniği için kullanılabilir [21]. Yukarıdan aşağı yönteminde ise mekanik aşındırma ve öğütme gibi işlemler ile büyük tanecik boyutuna sahip partiküller nano boyuta getirilmektedir.

3.3. Nanoakışkan Hazırlama Yöntemleri

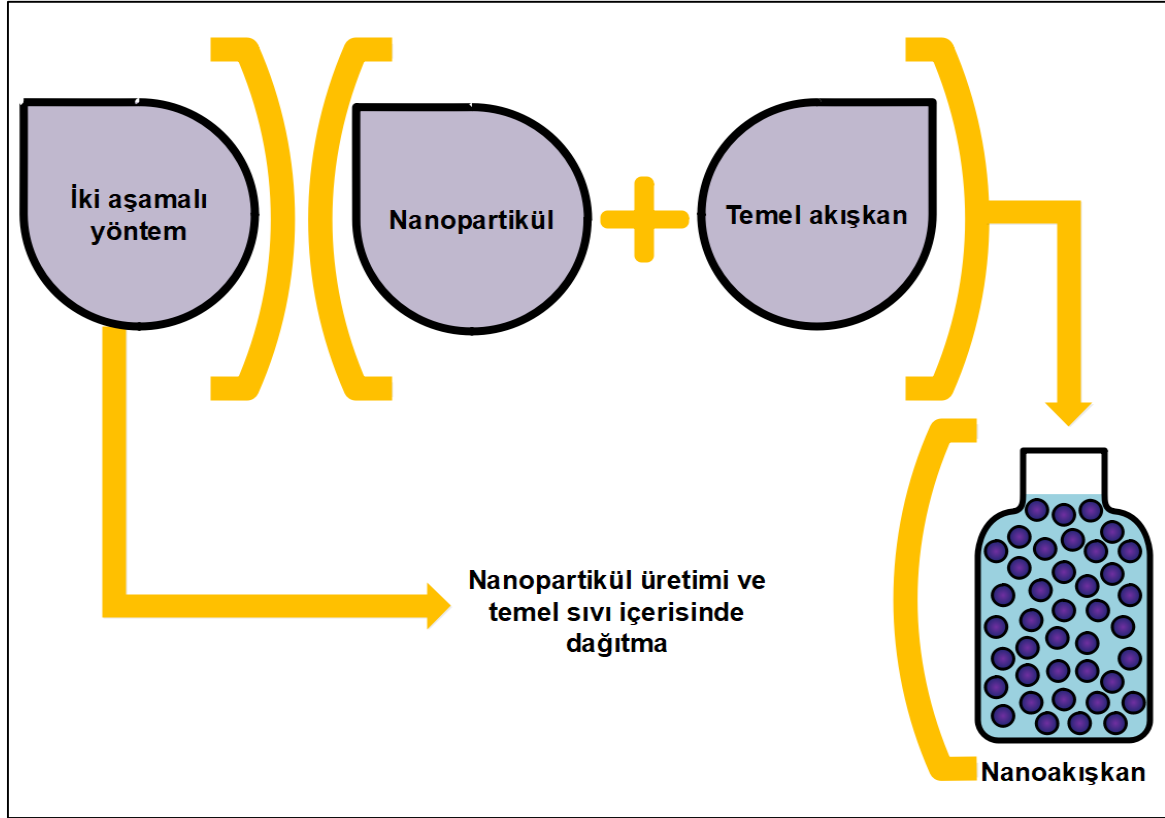
Nanoakışkanların hazırlanmasında tek aşamalı yöntem ve iki aşamalı yöntem olmak üzere iki teknik bulunmaktadır. Tek aşamalı yöntemde nanopartiküller temel akışkan içerisinde üretilmektedir. Bu yöntemde vakum buharlaştırma ve kimyasal ıslatma yöntemi kullanılabilir. Ek olarak, çökelme sorununu ortadan kaldırmak ve nanoakışkan kararlılığını sağlamak için depolama, kurutma ve damıtma gibi teknikler de kullanılabilir [22]. Genel olarak metal nanopartiküllerin kullanıldığı tek adım yönteminde, kümeleşme ve topaklanma gibi olumsuzluklara iki aşamalı yöntemle göre daha az rastlanmaktadır. Ancak bu yöntem iki aşamalı yöntemle göre daha maliyetlidir.

İki aşamalı yöntemde ise malzeme nano boyuta getirilmekte ve temel sıvıya eklenmektedir. İki aşamalı teknikte nanopartiküller fiziksel ya da kimyasal işlemler ile üretilmektedir. Nanopartiküllerin temel akışkan içerisinde homojen olarak dağıtılarak

nanoakışkan hazırlanmış olur. İki aşamalı yöntem daha kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli olduğu için tek aşamalı yönteme göre daha yaygın olarak tercih edilmektedir [23]. Kararlı bir nanoakışkan hazırlanmasında farklı işlemler tercih edilebilir. Bunlar ultrasonik banyo kullanılması, nanopartiküllerin temel akışkan içerisinde homojen olarak dağılması için yüzey aktif madde (Triton X-100 gibi) ya da dağıtıcıların eklenmesi ve karışımın pH değerinin değiştirilmesi için asit ya da baz ilave edilmesi olarak sıralanabilmektedir. Şekil 3.4'te tek aşamalı yöntemin şematik gösterimi sunulmuştur. Şekil 3.5'te ise iki aşamalı nanoakışkan hazırlama yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.4. Tek aşamalı nanoakışkan hazırlama yönteminin şematik gösterimi [24]



Şekil 3.5. İki aşamalı nanoakışkan hazırlama yönteminin şematik gösterimi [24]

3.4. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Bilindiği üzere, nanopartiküllerin temel akışkana eklenmesi ile elde edilen yeni akışkanın termofiziksel özellikleri değişmektedir. Nanoakışkanların özgül ısı kapasitesi, viskozite, yoğunluk ve ısı iletim katsayısı gibi termofiziksel özellikleri nanopartiküllerin cinsine, nanopartiküllerin boyutuna ve şekline, nanopartiküllerin karışım oranına ve temel akışkan cinsine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [21].

Isı transferi incelemelerinde, kullanılan çalışma akışkanlarının termofiziksel özellikleri ısı transfer performansın belirlenmesinde oldukça önemlidir. Bu durum, kullanılan konvansiyonel çalışma akışkanlarında olduğu gibi nanoakışkanlar için de geçerli olan bir husustur. Çalışma akışkanlarının Reynolds, Nusselt ve Prandtl sayıları gibi göstergeleri, termofiziksel özelliklerinin fonksiyonu olmakla birlikte, belirtilen boyutsuz sayılar çalışma akışkanlarının taşınım katsayılarını direkt olarak etkilemektedir. Bununla birlikte, ısı sistemlerde ısı transferi sonucu oluşan basınç düşüşü ve sistem için gereksinim duyulan pompalama güçleri de tercih edilen çalışma akışkanının Reynolds sayısına ve dolayısıyla da çalışma akışkanının termofiziksel özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Genel olarak, nanoakışkanların termofiziksel özellikleri temel akışkanın özelliklerine, nanopartiküllerin kimyasal yapısı, şekli, büyüklüğü ve temel akışkan içerisindeki konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Bu özelliklerin tümü konvansiyonel çalışma akışkanlarındaki gibi sıcaklığa da bağlı olarak değişmektedir. Bu bağlamda, nanoakışkanlarla yapılan ısıl incelemelerin doğru bir biçimde yapılabilmesi için ilgili çalışma akışkanlarının termofiziksel özelliklerini etkileyen parametrelerin ve akışkanların özelliklerinin nasıl etkilendiğinin bilinmesi oldukça önemli bir husustur.

3.4.1. Özgül ısı kapasitesi

Temel akışkana nanopartiküllerin eklenmesi ile akışkanın özgül ısı değeri değişmektedir. Özgül ısı ifadesi, bir maddenin birim kütlesinin sıcaklığını birim miktar arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi miktarı olarak tanımlanmakta ve ısı transferi uygulamaları için oldukça önemli bir ifade olarak bilinmektedir. Bilindiği üzere, metallerin özgül ısıları sıvıların özgül ısılarına göre daha düşük seviyelerdedir [25]. Bu nedenle nanoakışkanların özgül ısılarının temel akışkana oranla daha düşük seviyelerde olması beklenmekte ve eklenen partikülün hacimsel konsantrasyonunun artması ile özgül ısılarının azalacağı söylenebilir [26]. Literatürde yapılan bazı çalışmalar, partikül şekli ve boyutunun özgül ısı değerine etkisini incelemiş olup, özgül ısı ifadesinin nanoakışkan içerisinde dağıtılmış olan partikülün şekline ve boyutuna bağlı olmadığı sonucuna varmışlardır [27, 28].

3.4.2. Viskozite

Viskozite, akışkanın akmaya karşı olan direnci şeklinde tanımlanmaktadır. Diğer bir ifade ile kayma geriliminin kayma hızına oranıdır. Akışkan viskozitesinin, ısı transferi uygulamalarındaki kanal aşınmaları, basınç düşüşü ve pompalama gücü gibi durumlar ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle ısıl uygulamalarda kullanılan çalışma akışkanının viskozitesi oldukça önemli bir değişkendir. Bu ifade, akışkanın ısı transferi davranışının incelenmesi adına oldukça önemlidir.

Nanoakışkanın viskozite değeri, temel akışkanın cinsine, sıcaklığına, nanopartikül konsantrasyonuna, nanopartikül cinsine, boyutuna-şekline ve yüzey aktif madde cinsine bağlı olarak değişmektedir [21]. Yapılan bilimsel çalışmalarda, nanopartikül konsantrasyonunun artması ile viskozite değerinin arttığı tespit edilmiştir [29, 30]. Ek

olarak nanopartikül boyutunun artması ile viskozitenin artışına neden olduğu da farklı bir çalışmada rapor edilmiştir [31].

3.4.3. Yoğunluk

Nanoakışkanların yoğunluk değeri, kullanılan nanopartiküllerin ve temel akışkanın konsantrasyonuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kullanılan nanopartikülün yoğunluğunun fazla olmasından dolayı, genellikle nanoakışkan yoğunluğunda bir artış gözlenmektedir [26, 32]. Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar da bunu destekler niteliktedir [33, 34].

3.4.4. Isı iletim katsayısı

Nanoakışkanların ısı sistemlerde kullanılmasının en büyük amacı, çalışma akışkanının ısı iletim katsayısını arttırmaktır. Yüksek ısıl iletkenliğe sahip nanopartiküllerin temel akışkan içerisinde kullanılması, oluşturulan yeni akışkanın da ısı iletim katsayısını arttırmaktadır. Bunun sebebi, katı nanopartiküllerin yüzey kısmına yakın nanotabakaların oluşması ile katı ve sıvı arasında ısı köprüsü meydana getirmesidir. Nanoakışkanın ısı iletim katsayısı değerini pek çok farklı faktör etkilemektedir. Bunlar temel akışkan türü, nanopartikül cinsi, konsantrasyon değeri ve nanopartiküllerin boyutları olarak sıralanabilmektedir [21].

Nanoakışkanların ısıl iletkenliğini en çok etki eden parametre kullanılan nanopartiküllerin ısıl iletkenlik değeridir. Metal nanopartiküllerin kullanıldığı nanoakışkanların, metal oksit nanopartiküllerin kullanıldığı akışkanlara göre daha yüksek ısıl iletkenlik değerine sahip olduğu bilinmektedir [35]. Aynı zamanda küçük parçacık boyutuna sahip nanopartiküllerin kullanıldığı nanoakışkanların ısıl iletkenlik değerinin daha yüksek olduğu, yapılan bilimsel çalışmalar ile rapor edilmiştir [36, 37].

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Isı değıştirciler performans artışı açısından büyük bir geliştirme potansiyelin sahiptir. Bilindiğı üzere, ısı değıştirciler ısıl kapasite, akışkan cinsi ve hacim gibi değışkenlere göre seçilmeli ve ilgili performans arttırıcı yöntemler bu parametreler göz önünde bulundurularak uygulanmalıdır.

Literatürdeki bilimsel çalışmalara bakıldığında, ısı değıştircileri kapsayan akademik çalışmalar genel olarak ısı değıştirici performansının artırılmasına ve çalışma akışkan özelliklerinin iyileştirilmesine dayanmaktadır [38, 39]. Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, helisel borulu ısı değıştircilerin diğ er tip ısı değıştircilere göre olumlu yönleri göze çarpmaktadır. Helisel borulu ısı değıştircilerin kompakt yapıya sahip olmaları ve yüksek sıcaklık uygulamalarında çalışabilmeleri, diğ er ısı değıştirici tiplerine üstünlük sağlayan avantajlarından bazılarıdır.

Akademik literatürde helisel borulu ısı değıştircileri inceleyen pek çok çalışma bulunmaktadır [40, 41]. Jamshidi vd. (2013) tarafından yapılan deneysel çalışmada, helisel borulu bir ısı değıştirici incelenmiş ve ısı transfer oranı iyileştirilmeye çalışılmıştır [42]. Laminar akış rejiminde gerçekleştirilen deneylerde, helisel borulu ısı değıştircilerde helis adımı ve helis ç apı gibi geometrik faktörler incelenmiştir ve bu faktörlerin ısıl performansa etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmada gövde ve boru tarafındaki debiler 1-4 litre/dakika aralığında ayarlanmıştır. Ek olarak, Taguchi yöntemi yardımıyla çeşitli parametreler için optimum çalışma koşulları ve konfigürasyonlar bulunmuştur. Taguchi yöntemi ile elde edilen bulgulara göre, helisel borulu ısı değıştircilerde gövde tarafı akışkan debisi, helis ç apı, helisel boru tarafı akışkan debisi ve helis adımının en önemli tasarım parametreleri olduğu belirtilmiştir.

Hardik vd. (2015) tarafından yapılan farklı bir akademik çalışmada, boru kavisinin ısı transferi ve akış davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir [43]. Çalışmada, basınç düşüşü ve ısı transferi için kapsamlı bir literatür araştırması sunulmuştur. Sürtünme faktörü ve genel Nusselt sayısının deneysel sonuçları, literatürdeki çalışmalardaki mevcut korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Test edilen geometri, iç ç apı 5,4 ila 7,5 mm arasında değış en, 0,2 ve 0,25 mm kalınlığında ince duvarlı paslanmaz ç elik (SS 304) borulardan yapılmıştır. Helis ç apının boru ç apına oranı 13,1 ile 67 arasında değışmektedir ve helis

adımı 50 mm olarak seçilmiştir. Yerel sıcaklık dağılımı, termal kızılötesi görüntüleme kullanılarak ölçülmüştür. Helisel bir borunun iç tarafı, dış tarafı ve toplam yüzeyi (iç taraf ve dış taraf) için genel ortalama ve yerel Nusselt sayısı için korelasyonlar önerilmiştir.

Sadighi Dizaji vd. (2015), geometrik parametrelerin helisel borulu ısı değiştirici ısı performansına etkisini ekserji yaklaşımıyla analiz etmiştir [44]. Helisel borulu ısı değiştiricideki toplam ekserji kaybı ve boyutsuz ekserji kaybı bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, gövde ve helisel boru tarafındaki debinin artmasıyla ekserji kaybının arttığı tespit edilmiştir. Ek olarak, ekserji kaybının helisel boru tarafı giriş sıcaklığının artması ve gövde tarafı giriş sıcaklığının azalması ile arttığı belirtilmiştir.

Andrzejczyk ve Muszynski (2018) tarafından yapılan çalışmada helisel borulu bir ısı değiştiricide kanatçık kullanımının ısı transferine etkisi araştırılmıştır [45]. Deneysel çalışma 100-1 200 W güç ve 0,01-0,025 kg/s kütleli debi aralığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında soğutma suyunun kütleli debisi, giriş ve çıkıştaki suyun sıcaklığı ile helisel boru duvar sıcaklığı helisel boru çevresinde 6 noktada ve ısı değiştirici ceketindeki su sıcaklığı gövde uzunluğu boyunca 10 noktada ölçülmüştür. Çalışmada tasarlanan kanatçık tasarımı da sürekli bölmeli forma sahiptir. Deneysel sonuçlara göre uygulanan kanatçık modifikasyonunun ısı transferini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, giriş/çıkış konfigürasyonunun ısı değiştirici gövdesindeki sıcaklık dağılımının yanı sıra akışkan akışı üzerinde önemli etkileri olduğu da kaydedilmiştir. Isı değiştiricinin gövde tarafı için yeni deneysel Nusselt sayıları korelasyonu sunulmuştur.

Deneysel bir çalışmada, Khorasani vd. (2019) helisel borulu ısı değiştiriciye hava enjeksiyonunun ısı verim üzerine etkilerini araştırmıştır [46]. Geliştirilen sistem için önemli kriterler olan entropi üretimi ve Witte-Shamsundar verimliliği analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, helisel boru tarafına hava kabarcığı enjeksiyonunun, ısı değiştiricinin ısı performansını arttırmıştır. Ek olarak, ikinci yasa analizine göre, sıvı debisi yüksek olan ısı değiştiricileri için helisel boru tarafına hava kabarcıklarının enjeksiyonunun daha etkili bir yöntem olduğu rapor edilmiştir. İncelenen çalışmada, helisel borulu ısı değiştirici performansının enjekte edilen hava debisinin belli miktarda artması ile iyileştiği rapor edilmiştir.

Andrzejczyk vd. (2018) helisel borulu ısı değiştiricilerin performansını farklı geometrik modifikasyonlar ile deneysel olarak incelemiştir [47]. Yapılan çalışmada suyun kütlesel debisinin ve ısı akısının ısı transfer katsayısına etkisi incelenmiştir. Çalışma 200-1 200 W arasındaki güç ve 0,01-0,03 kg/s arasındaki debi değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Testlerdeki karışık konveksiyonun varlığından dolayı, doğal konveksiyonun Reynolds sayılarının küçük değerleri ve Richardson sayısının büyük değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen veriler, çalışma kapsamında geliştirilen korelasyonlar ve literatürden seçilen korelasyonlar ile karşılaştırılmıştır.

Miansari vd. (2020) enerji ve ekserji metodolojisini kullanarak helisel borulu ısı değiştiricileri analiz etmiştir [48]. İncelenen helisel borulu ısı değiştiricinin gövde tarafı oluklu bir biçimde tasarlanmıştır. Oluk geometrik özelliklerinin ısı değiştiricinin hidrotermal performansı üzerindeki etkisi 3 boyutlu sayısal çalışma ile incelenmiştir. Taguchi deney tasarımı ve ekserji analizi, ısı değiştiricinin soğuk akışkan sıcaklığı, soğuk akışkan debisi ve oluk yüksekliği (pürüzlülük değeri) sistem performansını incelemek için kullanılmıştır. Sonuçlara göre, gövde üzerinde dairesel olukların kullanılmasının ısı transferinin %5'e kadar arttığını ve basınç düşüşünün önemli ölçüde değişmediği görülmüştür. Çalışma sonuçlarına göre, ısı değiştiricinin ısı veriminin çeşitli koşullarda %23 ile %49 arasında değiştiği ve hem akış hızının hem de giriş sıcaklığının ekserji kayıpları üzerinde aynı etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Ek olarak, optimum oluk yüksekliği 10 mm olarak belirlenmiştir.

Solanki ve Kumar (2018), alışma akışkanı olarak R134a kullanılan helisel borulu bir ısı değiştiriciyi deneysel olarak incelemiş, ısı transferi davranışını ve basınç düşüşü değerlerini karşılaştırmıştır [49]. Deneyler 35-45 °C aralığındaki doyma sıcaklığında ve 75-191 kg/m².s kütle akısı değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Yüzey modifikasyonu olarak çukurlu bir yapı tasarlanmıştır. Farklı akış rejimleri arasındaki geçişler de çalışma kapsamında tartışılmıştır. Ayrıca, R-134a'nın kütle akısı, buhar kalitesi ve doyma sıcaklığının ısı transfer katsayıları ve basınç düşüşleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ek olarak, konvansiyonel ve genişletilmiş ısı transfer yüzey alanına sahip helisel boruların incelendiği çalışmada yüzey modifikasyonunun ısı transferini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir.

Khorasani ve Dadvand (2017) tarafından yapılan deneysel çalışmada, helisel borulu ısı bir değiştiriciye hava kabarcığı enjeksiyonun ısıl performansa etkisi incelenmiştir [50]. Yapılan çalışmada, helisel borulu ısı değiştirici yatay olarak konumlandırılmıştır. Hava kabarcıkları helisel borulu ısı değiştiricinin gövde tarafına enjekte edilmiştir. Milimetre altı boyuta sahip bir hava kabarcığı enjeksiyon sisteminin tasarlandığı, imal edildiği ve kullanıldığı çalışmada, helisel borulu ısı değiştiricinin hem paralel hem de zıt akış konfigürasyonları test edilmiştir. Kabarcıkların karıştırma etkisi ve ısıl sınır tabaka etkileşimlerinin helisel borulu ısı değiştiricinin gövde tarafındaki akışı iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ek olarak, hava kabarcığı enjeksiyonunun helisel borulu ısı değiştiricinin etkinlik katsayısı değerini önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur.

Diğer bir bilimsel araştırmada, Rahimi vd. (2019) helisel borulu ısı değiştirici sistemini detaylı şekilde incelemiştir [51]. Çalışmada, helis çapındaki değişimin performansa etkisi analiz edilmiştir. Helisel borulu ısı değiştirici sistemine faz değiştiren malzeme entegrasyonu yapılarak malzemenin erime davranışı incelenmiştir. RT-35 tipi parafin, helisel borulu ısı değiştiricide faz değiştiren malzeme olarak kullanılmıştır. 5, 7 ve 9 cm helis çaplarında ve 0,43, 0,45 ve 0,53 değerlerindeki Stefan sayılarında gerçekleştirilen analizlerde, Stefan sayısındaki artışın helisel borulu ısı değiştirici içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime sürecini hızlandırdığı rapor edilmiştir. Ek olarak, ısı değiştiricinin helis çapının artırılması da faz değiştiren malzemenin toplam erime süresini kısaltmış ve sistem içerisindeki faz değiştiren malzeme sıcaklığını önemli ölçüde arttırmıştır.

Alimoradi ve Veysi (2017) tarafından yapılan farklı bir çalışmada, helisel borulu ısı değiştiricilerindeki optimal ve kritik geometrik parametreler belirlenmiştir [52]. Çalışmada kullanılan helisel borulu ısı değiştirici konvansiyonel yapıya sahip olup, farklı geometrik parametrelerde değişiklikler yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırma kapsamında, helisel borulu ısı değiştirici sistemindeki helisel borunun çapı, helis çapı, gövde çapı, gövde akışkan giriş çapı, helisel boru uzunluğu, helisel borulu ısı değiştirici gövde uzunluğu ve helis adımı gibi parametrelerin ısıl performansa etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan araştırmada, maksimum ısı aktarımına ve minimum entropi üretim hızına sahip ısı değiştiricilerin tasarımı ve analizi için kullanılan tasarım katsayısı (COD) parametresi de geometrik değişkenlere bağlı olarak incelenmiştir.

Bazı çalışmalarda ise, farklı tipteki kanatçıklar kullanılarak ısı transferi yüzey alanının artırılması ve böylelikle ısı değiştiricilerinin performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Kanatçıklar, türbülatorler ve engeller gibi genişletilmiş ısı transferi yüzey alanı pek çok ısıl sistemde performans arttırıcı modifikasyonlar olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, kanatçık gibi geometrik modifikasyonların ısı değiştiricilere eklenmesinin türbülans yoğunluğunu arttırdığı söylenebilir [53,54]. Bunun yanında, metalik köpükler [55-57] gibi gözenekli yapıların da ısı değiştiricideki kanatçıklara entegre edilerek test edildiği ve ısı transferinin arttırımını hedefleyen çalışmalar da akademik literatürde mevcuttur [58-60]. Araştırmacılar, ısı değiştiricinin helisel borusu içerisindeki ısı transfer katsayısındaki iyileştirmenin genel olarak akışkan hızının arttırılması, helis çapının azaltılması ve helis adımının arttırılmasına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [61-64].

Literatürde deneysel çalışmalara ek olarak, farklı ısı değiştirici tiplerini araştırmak için sayısal yöntemlerin kullanıldığı birçok araştırma mevcuttur [65-68]. Bilindiği üzere, deneysel çalışmalar yüksek maliyetli ve zaman alıcıdır. Bu nedenle, deney düzeneği kurulmaksızın çeşitli faktörlerin ısı değiştiricilerin performansı üzerindeki etkilerini analiz etmek için sayısal yöntemler kullanılabilmektedir. Bu yöntem, deneysel çalışmalar gibi maliyetli olmamakla birlikte, ısı değiştiriciler üzerindeki farklı konfigürasyonların daha hızlı biçimde sistematik bir biçimde incelenmesine olanak tanımaktadır.

Mirgolbabaie (2018) tarafından yapılan bir araştırmada, gövde tarafındaki farklı kütleli debi değerlerinin ve çeşitli geometrik konfigürasyonlar uygulanarak helisel borulu bir ısı değiştirici ANSYS Fluent programı yardımıyla sayısal olarak incelenmiştir [69]. Sayısal olarak incelenen helisel borulu ısı değiştirici dikey olarak konumlandırılmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak sabit duvar sıcaklığı veya helisel boru yüzeyindeki sabit ısı akısı gibi ısıl koşullara odaklanılmamış ve çalışmada helisel borulu ısı değiştirici sistemi için boru duvarı sıvıdan sıvıya ısı transfer mekanizması için bir eşlenik ısıl sınır koşulu göz önünde bulundurulmuştur. Helisel borulu ısı değiştiricinin ısıl performansının değerlendirilmesi, kontrol hacmi yöntemine dayalı sayısal çözüm kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan hesaplamalar, kararlı hal koşulları ve üç boyutlu sistem için yapılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarına göre, helisel borulu ısı değiştiricinin helis adımının arttırılması, sistemin gövde tarafındaki ısı transfer katsayısını arttırmaktadır.

Cancan vd. (2017) tarafından yapılan sayısal çalışmada, helisel borulu ısı değiştiricide küresel türbülatorler eklenmesinin ısı performansına etkisi araştırılmıştır [70]. Simülasyon sonuçlarına göre, santrifüj kuvveti tarafından uyarılan ikincil akışın, ısı transfer hızını arttırmada önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtilmiştir. Bunun yanında, türbülator yapısının sağladığı girdapın, akış sınır tabakasını etkisizleştirerek akışın türbülans yoğunluğunu arttırdığı ve ısı transfer sürecini güçlendirdiği tespit edilmiştir. Türbülatorlerin yerleşim adımının artmasıyla ısı transferindeki artış %37-66 aralığında bulunmuştur. Isı değiştiricinin helisel boruları üzerine yerleştirilen küresel yapılar sayesinde ısı transferi önemli ölçüde arttırılmıştır. Ek olarak, küresel türbülator yüksekliğinin arttırılması ile ısı performans %5-%70 aralığında iyileştirilmiştir. Türbülator entegre edilmiş sistemin genel ısı transfer performansı aynı koşullardaki konvansiyonel sistemden daha iyi bulunmuştur. Sonuçlara göre, performans değerlendirme kriterinin (PEC) değeri 1,56 seviyesine kadar çıkmıştır.

Omidi vd. (2018), çeşitli faktörlerin etkisini belirlemek için farklı kesit geometrilerine sahip helisel borulu ısı değiştiricileri sayısal olarak analiz etmiştir [71]. Çalışmada, helisel boru geometrisi farklı kısımlar ayrılmıştır. Yuvarlatılmış çok loblu helisel boruların performansları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Analizlerdeki akış laminar olup, Reynolds sayısı 1 300-2 500 aralığında değişmektedir. Ek olarak, helisel boru duvar sıcaklığı analizler boyunca 373 K'lik sabit sıcaklığı sahiptir. Sayısal analiz sonuçlarına göre, alümina/su nanoakışkanının kullanımı saf suya göre %28 oranında Nusselt sayısını arttırmıştır. Ancak sürtünme faktörü nanoakışkan kullanımıyla kayda değer şekilde değişmemiştir. Ayrıca, daha yüksek hacim konsantrasyonlarının daha yüksek ısı transfer oranları ile sonuçlandığı belirtilmiştir. Çalışma kapsamında, Nusselt sayısını tahmin etmek için sayısal verilere dayalı bir korelasyon da sunulmuştur.

Etghani ve Hosseini Baboli (2017) tarafından yapılan araştırmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak helisel borulu bir ısı değiştirici incelenmiştir [72]. Çalışmada, ısı transfer katsayısını ve ekserji kaybını değerlendirmek için helisel borulu bir ısı değiştiricinin sayısal modeli incelenmiştir. Helis adımı, boru çapı ve debi gibi faktörlerin helisel borulu ısı değiştirici performansına etkileri analiz edilmiştir. İncelenen tasarım faktörlerinin optimum değerlerini bulmak için Taguchi tekniği kullanılmıştır. Farklı tasarım parametrelerine sahip 16 konfigürasyon sayısal olarak modellenerek analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, boru çapının ve soğuk taraf debisinin sırasıyla ısı transferi ve

ekserji kaybının en önemli tasarım parametreleri olduğunu belirlenmiştir. Isı transfer katsayısı için optimum parametreler, helis adımı için 13 mm, boru çapı için 12 mm, soğuk ve sıcak taraf debileri için 4 litre/dakika olarak bulunmuştur. Ekserji kaybı için optimum parametreler ise helis adımı için 13 mm, boru çapı için 12 mm, soğuk ve sıcak taraf debileri için 1 litre/dakika olarak hesaplanmıştır.

Chen vd. (2020) tarafından yapılan sayısal çalışmada, helisel borulu ısı değiştiricinin performansının helisel boruya kanatçıklar arttırılması amaçlanmıştır [73]. Çalışmada, Joule-Thomson (J-T) kriyo-soğutucularının performansını iyileştirmek için yeni bir izometrik olmayan helisel borulu bir ısı değiştirici önerilmiştir. Bu yeni izometrik olmayan helisel borulu ısı değiştiricinin fiziksel ve analiz modelleri geliştirilmiştir. Helisel boruya eklenen halka şeklindeki türbülatorler ile ısı transferi arttırılmaya çalışılmıştır. Çalışmada, yüzey yanıt yöntemi yardımıyla optimizasyon çalışması da gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, optimum reküperatörün toplam ekserji yıkımının %8 ve malzeme tüketiminin %4 azaldığını göstermektedir. Ayrıca, soğutma kapasitesi %9 oranında arttırılarak yeni tasarlanan izometrik olmayan helisel borulu ısı değiştiricinin ısı transfer performansı ve malzeme tüketimindeki potansiyeli araştırılmıştır.

Wang vd. (2020) helisel borulu bir ısı değiştiricinin termohidrolik performansının arttırılması için bükülmüş-helis geometrik modifikasyonunu önermiş ve yeni modifikasyonun performansı önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir [74]. Modifiye edilmiş helisel boruların kullanıldığı sistemdeki Nusselt sayısı artışı %19-31 aralığında hesaplanmıştır.

Wu vd. (2016) magnezyum bazlı metal hibrit reaktöründe kullanılmak üzere helisel borulu ısı değiştirici önermiştir [75]. Çalışmada tasarlanan helisel borulu ısı değiştirici, hidrojen absorpsiyon/desorpsiyon döngüleri sırasında ortaya çıkan büyük miktarda reaksiyon ısısının ısı ve kütle transferini olumsuz etkilemesinin önlenmesi amaçlanmıştır. Magnezyum esaslı reaktörün basınç ve sıcaklık özellikleri ve hidrojen desorpsiyon kinetiği ile ilgili modeller öncelikle deneyler yoluyla simülasyon çalışması için oluşturulmuştur. Konvansiyonel düz borulu, kanatlı borulu ve yeni tip helisel borulu ısı değiştiricileri içeren reaktörler için hidrojen desorpsiyon performanslarının karşılaştırması, sayısal simülasyona dayalı olarak yapılmıştır. Reaktöre helisel borulu ısı değiştirici eklenmesi hidrojen desorpsiyon performansının iyileştirilmesine olanak sağlamıştır. Çalışma sonuçlarına göre,

helisel borulu ısı değiştirici içeren reaktör diğer tip reaktörlere göre daha iyi ısı ve kütle transferi performansı sergilemiştir.

Mangrulkar vd. (2019), eliptik tüplerin kullanıldığı çapraz akışlı bir ısı değiştiricinin performansını değerlendirmiştir [76]. Çalışmada hem sayısal hem de deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. İncelenen geometrilerin performans testleri 5 000-21 000 aralığındaki Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler SST k-omega türbölans modeli ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, eliptik tüpün tüm Reynolds sayısı değerlerinde gerçekleştirilen analizler için sürtünme faktöründe önemli bir azalma ile daha yüksek ısı transferi hızı göstermiştir. Eliptik tüpün daha yüksek performans göstermesi, genel olarak geometrinin aerodinamik kesit profilinden kaynaklanmıştır. 1,25'lik bir adım oranında ve 0,50'lik açıklık oranına sahip eliptik tüpün daha iyi ısı performans gösterdiği belirtilmiştir.

Su, hava ve yağ gibi çalışma akışkanları geleneksel olarak termal sistemlerde kullanılmaktadır. Ancak bu geleneksel çalışma akışkanları ısı iletkenlik açısından istenilen sonuçları vermemektedir. Bu olumsuzluk araştırmacıları çalışma akışkanı olarak kullanılmak üzere yeni tip akışkanları araştırmaya yönlendirmektedir [77]. Nanoakışkanların kullanıldığı uygulamalara son yıllarda mühendisliğin her alanında rastlanmaktadır. Yüksek ısı iletkenliğe sahip nanopartiküllerin temel akışkana eklenmesi ve homojen olarak dağıtılması ile meydana gelen yeni akışkanın yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip olmasını sağlamaktadır.

Literatürde nanoakışkanların kullanıldığı helisel borulu ısı değiştiriciler ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır. Kumar vd. (2012), bir helisel borulu ısı değiştiricinin ısı transfer katsayısını araştırmıştır [78]. Çalışma, deneysel analizler ile gerçekleştirilmiştir. Testler, laminar akış koşulu ve zıt akış konfigürasyonu altında, Dean sayısı ve Reynolds sayısı için sırasıyla 1 600-2 700 ve 5 200-8 600 aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Al_2O_3 /su nanoakışkanı deneylerde kullanılmak için hazırlanmış ve nanopartiküller çalışma kapsamında X-ışını kırınımı ile karakterize edilmiştir. Araştırmada, alışma akışkanı olarak kullanılan Al_2O_3 /su nanoakışkanının çeşitli partikül hacim konsantrasyonları (%0,1, %0,4 ve %0,8) denenmiştir. Nanoakışkanın hazırlanmasında iki aşamalı yöntem kullanılmış ve elde edilen Al_2O_3 /su nanoakışkanı taramalı elektron mikroskobu ile karakterize edilmiştir. Al_2O_3 /su nanoakışkanının %0,1, %0,4 ve %0,8 konsantrasyonları

kullanılarak toplam ısı transfer katsayısının su kullanımına göre artışı sırasıyla %7, %16,9 ve %24,2 olarak bulunmuştur. Sabit Dean sayısındaki su ile karşılaştırıldığında, Al_2O_3 /su nanoakışkanın %0,1, %0,4 ve %0,8 partikül hacim konsantrasyonlarında boru tarafı deneysel Nusselt sayısının artışı sırasıyla %17, %22,9 ve %28 olarak bulunmuştur. Bu geliştirmeler, nanoakışkanın daha yüksek termal iletkenliği ile partikül hacmi konsantrasyonunu ve nanopartiküllerin Brownian hareketini arttırması ile açıklanmıştır.

Akbarinia ve Behzadmehr (2007), yatay kavisli bir tüpte su ve Al_2O_3 nanopartiküllerden oluşan bir nanoakışkanın tam gelişmiş laminar karışık konveksiyonunu sayısal olarak incelemiştir. [79]. Sayısal analizlerde üç boyutlu eliptik korunum denklemleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, kaldırma kuvveti, santrifüj kuvveti ve nanoparçacık konsantrasyonunun eşzamanlı etkileri sunulmuş ve tartışılmıştır. Çalışmada, nanopartikül hacimsel konsantrasyonunun çalışma akışkanı sıcaklığına önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Ashrafi ve Bashirzadeh (2014), yüzme havuzları için kullanılacak ısı değiştiricilerinde nanoakışkanların kullanılmasının etkilerini değerlendirmiştir [80]. Nanoakışkanların kullanımıyla halka açık yüzme havuzlarındaki ısı transferinin arttırılmasını amaçlayan çalışmada üç farklı konsantrasyona (%0,1, %0,5 ve %1) sahip nanoakışkanlar analiz edilmiştir. Çalışma akışkanı 20 mm ortalama çapa sahip TiO_2 nanopartiküller kullanılarak hazırlanmıştır. Deneyler laminar akış koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde farklı noktalardan akışkan hızı ve sıcaklığı ölçülmüştür. Çalışmada temel olarak nanoakışkan konsantrasyonunun ve Peclet sayısının konvektif ısı transfer katsayısı üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, konvektif ısı transfer katsayısının nanopartikül konsantrasyonunun ve Peclet sayısının artmasıyla arttığını göstermiştir. Ek olarak, kütlece %0,1, %0,5 ve %1 konsantrasyonlarındaki nanoakışkanların kullanımının ortalama konvektif ısı transfer katsayısını sırasıyla %1,1, %15,9 ve %31,6 olarak arttırdığı gözlemlenmiştir. Isı transfer katsayısının yüksek Peclet sayılarında artış eğiliminde olduğu da belirtilmiştir. Çalışmada incelenen ısı değiştiricinin verimliliği farklı senaryolar için değerlendirilmiş ve sonuçları rapor edilmiştir.

Naik ve Vinod (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, helisel borulu bir ısı değiştirici incelenmiştir [81]. Çalışmada üç farklı nanopartikül (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CuO) Newtonyen olmayan nanoakışkan elde edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Sulu karboksimetil selüloz

bazlı akışkan ile termal performans artışı incelenmiştir. Konvansiyonel temel akışkan yerine sulu karboksimetil selüloz bazlı akışkan kullanımının performansa etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, kütlece %0,2-1,0 konsantrasyon aralığında değişen nanopartiküller içeren Newtonyen olmayan nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Nanoakışkan ve su sırasıyla gövde tarafında ve helisel boru tarafında kullanılmıştır. Analizler 0,5-5 litre/dakika arasında değişen debi değerlerinde, 50-60 °C aralığındaki gövde tarafı sıcaklığı ve 500-1 500 rpm arasında değişen karıştırıcı hızlarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Nusselt sayısının artan nanoakışkan konsantrasyonu, gövde tarafı akışkan sıcaklığı, Dean sayısı ve karıştırıcı hızları ile arttığını göstermektedir. CuO/sulu karboksimetil selüloz bazlı akışkanın diğer iki akışkan tipine daha iyi ısı performans gösterdiği tespit edilmiştir. Newtonyen olmayan nanoakışkanların ısı transfer performansı, daha yüksek nanoakışkan konsantrasyonlarında, gövde tarafı sıcaklıklarında, karıştırıcı hızlarında ve Dean sayılarında önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

Maghrabie vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, farklı nanoakışkanların helisel borulu ısı değiştirici performansına etkisi incelenmiştir [82]. Deneylerde Al_2O_3 /su ve SiO_2 /su nanoakışkanları kullanılmıştır. Nanoakışkanlar hacimce %0,1, %0,2 ve %0,3 oranındaki konsantrasyon değerlerine hazırlanmış ve analizler 6 000-15 000 arasındaki Reynolds sayılarında yapılmıştır. Ek olarak, deneyler 0°, 30°, 60° ve 90°'lik eğim açılarında gerçekleştirilmiştir. Eğim açısı yatay eksenden ölçülmüştür. Sonuçlara göre, helisel borulu ısı değiştirici eğim açısının artırılması ile Nusselt sayısı ve verimin artırıldığı gözlemlenmiştir. Çoklu regresyon analizi kullanılarak, Reynolds sayısı, eğim açısı ve konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak Al_2O_3 /su ve SiO_2 /su nanoakışkanları için helisel borudaki Nusselt sayısını tahmin etmek için ampirik korelasyonlar önerilmiştir.

Niwalkar vd. (2019) SiO_2 kullanılan nanoakışkanın çalışma akışkanı olarak seçiminin ısı transfer katsayısı, sürtünme faktörü ve basınç düşüşü gibi farklı parametrelere etkisini incelemiştir [83]. Soğuk taraf debisi 50 litre/saat değerinde sabit tutulurken, sıcak taraf debisi ise 30, 40 ve 50 litre/saat değerlerinde test edilmiştir. 50 litre/saat debisindeki deneylerde elde edilen ısı transferi katsayısının 30 ve 40 litre/saat değerlerinde gerçekleştirilen deneylere göre sırasıyla %65,81 ve %82,46 yüksek olduğu bildirilmiştir.

Kulkarni vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, gümüş nanopartiküllerin kullanıldığı çalışma akışkanının helisel borulu ısı değiştirici performansına etkisini incelemiştir [84].

Deneyler gövde tarafında 1 000-3 000 arasında değişen Dean sayılarında ve helisel boru tarafında Reynolds sayısı 5 780'de sabit tutularak yapılmıştır. Çalışmada sıcaklık, debi, toplam ısı transfer katsayısı gibi çeşitli parametreler dikkate alınarak termal analiz yapılmıştır. Nanopartiküllerin kullanımı, konvansiyonel akışkana kıyasla ısı transfer katsayısında %32'lik bir artış göstermiştir.

Srinivas ve Venu Vinod (2015) tarafından yapılan çalışmada, helisel borulu bir ısı değiştiricide CuO/su nanoakışkan kullanımı farklı Dean sayılarında incelenmiştir [85]. Çalışmada, farklı konsantrasyonlarda (%0,3, %0,6, %1, %1,5, %2) CuO/su nanoakışkan test edilmiştir. Ayrıca, helisel borulu ısı değiştiricinin gövde tarafına karıştırıcı aparat eklenmiş olup, karıştırıcı 500, 1 000, 1 500 rpm hızlarında çalıştırılmıştır. Bunun yanında, gövde tarafı sıcaklığı 40 °C, 45 °C ve 50 °C değerlerine getirilerek, gövde tarafı sıcaklığının helisel borulu ısı değiştirici performansına etkisi incelenmiştir. Nanoakışkanların sistem performansı üzerindeki olumlu etkisi, farklı koşullara göre ısı transfer hızı karşılaştırılarak kanıtlanmıştır. Sonuçlara göre nanoakışkan kullanımının karıştırıcı kullanımına göre ısı transferinde daha büyük etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır. Bunun yanında, en yüksek ısı transferi iyileştirmesi CuO/su nanoakışkanın %2 değerindeki konsantrasyon oranında kullanıldığı deneylerde gözlemlenmiştir.

Srinivas ve Venu Vinod (2016) tarafından yapılan başka bir çalışmada, Al₂O₃/su, CuO/su ve TiO₂/su nanoakışkanları helisel borulu ısı değiştiricide farklı konsantrasyonlarda test edilmiştir [86]. İncelemeler farklı nanoakışkan konsantrasyonlarında, nanoakışkan sıcaklıklarında, karıştırıcı hızlarında ve helisel boru tarafı akışkan debilerinde gerçekleştirilmiştir. Stabilizatör olarak setiltrimetil amonyum bromür kullanılmıştır. Sistemin gövde tarafında nanoakışkan ve helisel boru tarafında ise akışkan olarak su kullanılmıştır. Nanoakışkan konsantrasyonunun artmasıyla ısı transfer hızının arttığı bulunmuştur. Daha yüksek nanoakışkan konsantrasyonu değerleri, karıştırıcı hızı ve gövde tarafı akışkan sıcaklığı, ısı değiştiricinin daha yüksek etkinlilik katsayısı değeri ile sonuçlanmıştır. Al₂O₃/su, CuO/su ve TiO₂/su kullanılan deneylerde etkinlik katsayısı artışı değeri saf su kullanılan deneye göre sırasıyla %30,37, %32,7 ve %26,8 olarak bulunmuştur.

Çok duvarlı karbon nanotüp/su nanoakışkan çözeltisinin çeşitli hacimsel konsantrasyonlarda çift helisel borulu ısı değiştiricide kullanıldığı deneysel ve sayısal

çalışma Kumar ve Chandrasekar (2019) tarafından yapılmıştır [87]. Sayısal çalışma ANSYS Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çalışma, laminar akış koşullarında ve 1 300-2 200 aralığındaki Dean sayılarında yapılmıştır. Çok duvarlı karbon nanotüp/su nanoakışkan %0,2, %0,4, %0,6 değerlerindeki hacimsel konsantrasyonlarda test edilmiştir. Nanoakışkanların hacim konsantrasyonları ve Dean Sayısı gibi faktörleri, ısı transfer hızı ve basınç düşüşünü tahmin etmek için dikkate alınmıştır. Simülasyon verileri deneysel verilerle karşılaştırılmış ve çalışmada deneysel ve sayısal veriler arasındaki uyum doğrulanmıştır. Çok duvarlı karbon nanotüp/su nanoakışkanlarının hacim konsantrasyonlarının artmasıyla ısı transfer hızının ve basınç düşüşünün arttığı araştırılmıştır. Nusselt sayısı ve basınç düşüşü değerlerinin sayısal ve deneysel sonuçları arasında sırasıyla ortalama %7,2 ve %8,5'lik fark bulunmuştur.

Palanisamy ve Kumar (2019), çok duvarlı karbon nanotüp/su nanoakışkanının konik helisel ısı değiştiricide denendiği bir çalışma gerçekleştirmiştir [88]. Çalışmada, ısı değiştiricideki ısı transferi ve basınç düşüşü araştırılmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, çok duvarlı karbon nanotüp/su nanoakışkanının sistemdeki zamana bağlı sedimentasyon ve erozyon miktarı konik helisel ısı değiştirici için araştırılmıştır. Çok duvarlı karbon nanotüp/su %0,1, %0,3 ve %0,5 değerlerindeki hacimsel konsantrasyon değerlerinde hazırlanmıştır. Hazırlama sürecinde iki aşamalı yöntem tercih edilmiştir. Bunun yanında nanoakışkanlara yüzey aktif madde ilavesi yapılmıştır. Deneysel incelemeler 2 200-4 200 aralığındaki Dean sayısı aralığında ve türbülanslı akış koşullarında gerçekleştirilmiştir. %0,1, %0,3 ve %0,5 değerlerindeki hacimsel konsantrasyon değerlerinde yapılan deneylerde Nusselt sayısındaki artış değerleri saf suya göre sırasıyla %28, %52 ve %68 olarak bulunmuştur. Bunun yanında, çok duvarlı karbon nanotüp/su akışkanının %0,1, %0,3 ve %0,5 değerlerindeki hacimsel konsantrasyonlarda kullanımı saf suya göre basınç düşüşünü sırasıyla %16, %30 ve %42 arttırmıştır. Hazırlanan çok duvarlı karbon nanotüp/su nanoakışkanlarının hazırlıktan 45 gün sonra bile iyi stabilite gösterdiği ve ısı değiştirici sistemine ait boru iç duvarında önemli miktarda nanomalzeme birikimi olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çok duvarlı karbon nanotüp/su kullanımının test çalışmasından sonra helisel boru iç duvar yüzeyinde önemli bir aşınmaya neden olmadığı bulunmuştur. Çok duvarlı karbon nanotüp/su nanoakışkanlarının ısı transferini iyileştirmek için konik helisel borulu ısı değiştiricide geleneksel akışkanlara alternatif olabileceği belirtilmiştir.

Bhanvase vd. (2018), su bazlı polianilin nanoakışkanları kullanarak dikey helisel borulu ısı değiştiricinin ısı transfer davranışını araştırmıştır [89]. İlk olarak, ultrason destekli emülsiyon polimerizasyon yöntemi kullanılarak polianilin nanolifleri hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan polianilin nanofiberleri, sonikasyon varlığında homojen olarak dağılmış polianilin nanoakışkanı elde etmek için değişen konsantrasyonlarda (hacimce %0,1-0,5 arasında değişen değerlerde) temel sıvı içinde dağıtılmıştır. Helisel borulu ısı değiştiricide polianilin nanolif kullanımının, nanolif konsantrasyonunun ve Reynolds sayısının ısı transfer katsayısına etkisi araştırılmıştır. Nanoakışkan içindeki polianilin nanoliflerinin hacimel yüzdesi ve Reynolds sayısı arttıkça ortalama ısı transfer katsayısının arttığı tespit edilmiştir. Temel akışkan yani saf suyun ısı transfer katsayısı $304 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ olarak bulunurken, nanolif kullanımı ile $515,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ 'ye yükseltildiği tespit edilmiştir. Nanoakışkan içerisinde %0,1 ve %0,5 hacimde nanolif kullanıldığında ısı transfer katsayısındaki artış sırasıyla %10,5 ve %69,62 olarak elde edilmiştir.

Başka bir çalışmada, Ag/su ve SiO_2 /su nanoakışkanları kullanılarak helisel borularda türbülanslı akış ve ısı transferi türleri araştırılmıştır [90]. Çalışma, türbülanslı akış koşullarında gerçekleştirilmiştir. Farklı helisel boru tiplerinin geometrik değişkenleri çalışma kapsamında araştırılmıştır. Nanoakışkanların viskozitesi ve ısı iletkenliği, farklı hacim oranlarında ve sıcaklıklarda deneysel olarak belirlenmiştir. 8 900-11 970 aralığındaki Reynolds sayısı değerlerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Ek olarak helisel boru geometrisi düz boru ile de karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, helisel borularda nanoakışkanların kullanılmasının ısı transfer oranını iyileştirmede düzlemsel boruya göre daha etkili olabileceğini göstermiştir. Nusselt sayısı ve türbülanslı nanoakışkanların helisel borulardan akışının sürtünme faktörünü tahmin etmek amacıyla deneysel verilere dayalı ampirik korelasyonlar elde edilmiştir.

Başka bir sayısal ve deneysel çalışmada, Rakhsha vd. (2015) CuO /su nanoakışkanı kullanarak helisel borularda sürtünme faktörünü ve Nusselt sayısını araştırmıştır [91]. Sayısal analizler için korunum denklemleri OpenFOAM ile çözülmüştür. CuO /su nanoakışkanının kullanımı su kullanımı ile karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar incelendiğinde ısı transferinde %6-7 arasında bir artış gözlenirken, nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel sonuçlarda bu artış %16-17 olarak görülmüştür. Ayrıca, diğer çalışmalara benzer şekilde, sürtünme faktörü katsayısı ve Nu için korelasyonlar türetilmiştir.

Rasheed vd. (2021), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ ve ZnO/su nanoakışkanlarının farklı hacim konsantrasyonlarını üç tip helisel borulu sistemde test etmiştir [92]. Çalışmada kullanılan helisel borular daire, oval ve eliptik biçimdedir. Her iki nanoakışkan için kullanılan hacimsel konsantrasyonlar ise %1,0, %1,5 ve %2'dir. Al_2O_3 nanoparçacıklarının kullanılmasının ZnO nanoparçacıklarının sonuçlarına göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, yüksek Reynolds sayılarında yapılan analizlerin daha yüksek ısı performans gösterdiği belirtilmiştir. En yüksek ısı performansın %2 hacimsel konsantrasyonda $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ akışkanının dairesel boruda test edildiği deneyde bulunduğu rapor edilmiştir.

Abu-Hamdeh ve Almitani (2016) gövde borulu ısı değiştiricilerinde Al_2O_3 , Fe_3O_4 ve ZnO katkılı nanoakışkanları test etmiştir [93]. Çalışmada ısı transfer katsayılarına ek olarak toplam ve yıllık maliyetler de hesaplanmıştır. Al_2O_3 , Fe_3O_4 ve ZnO içeren nanoakışkanların %0,01-0,04 aralığındaki hacimsel konsantrasyonlarda kullanımıyla konvektif ısı transfer katsayısı sırasıyla %7,20-14,40, %6,20-12,30 ve %5,50-9,01 aralığında iyileştirilmiştir.

Said vd. (2019) farklı hacim konsantrasyonlarında (%0,05, %0,1, %0,3) CuO/su nanoakışkanının kullanıldığı gövde borulu bir ısı değiştiricide toplam yaşam döngüsü maliyetlerini hesaplamıştır [94]. Sonuçlar, nanoakışkan ile çalışma durumunda elde edilen konvektif ısı transfer katsayısının, aynı akışkan giriş sıcaklıkları ve kütle akış hızları için saf suya oranla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlara göre, nanoakışkanlar kullanımı ısı transferini önemli ölçüde geliştirmiştir. Nanoakışkan kullanımıyla toplam ısı transfer katsayısı %7 ve konvektif ısı transferi %11,39 arttırılmıştır.

Mahmoudi vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, TiO_2 nanopartikül katkılı akışkan helisel borulu sistemde sayısal ve deneysel olarak test edilmiştir [95]. Çalışmada %0,1, %0,2, %0,5 konsantrasyon değerlerinde üç TiO_2/su sistem içerisinde denenmiştir. Ek olarak, deneyler 3 000-18 000 aralığındaki Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, eğim açısının performansa etkisinin araştırılması için beş farklı eğim açısı da deneylerde uygulanmıştır. Belirtilen çalışmada, helisel borularda fiziksel ve geometrik özelliklerin ısı transferi artışı ve basınç düşüşü üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sayısal simülasyonlarda, çalışma sıvısının termofiziksel özelliklerinin

nanoakışkan sıcaklığı ve konsantrasyonunun bir fonksiyonu olduğu varsayılmıştır. Türbülanslı akış özelliklerini simüle etmek için standart $k - \epsilon$ modeli kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar deneysel verilerle iyi bir uyum içindeydi. Sonuçlar, saf su yerine nanoakışkan kullanımının Nusselt sayısında %30'a varan bir artışa yol açtığını göstermiştir. Ayrıca, hem laminar hem de türbülanslı akış rejimleri için sabit duvar sıcaklığı koşullarında helisel borularda ortalama Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünü elde etmek için dört formül sunulmuştur.

Fule vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, helisel borulu bir ısı değiştiricinin ısıl etkinliğinin artırılması amaçlanmıştır. İncelenen ısı değiştiricide CuO/su tekli nanoakışkan kullanılmıştır. Analizler 812-1 895 Reynolds sayısı aralığında ve iki farklı partikül oranında gerçekleştirilmiştir [96]. Sonuçlara göre nanoakışkandaki CuO nanoparçacıklarının hacimce %0,1 konsantrasyonunda ısı transfer katsayısındaki artış saf suya oranla %37,3 iken, hacimce %0,5 konsantrasyonunda artış değeri %77,7 olarak bulunmuştur. Ayrıca nanoakışkanının debisindeki artışla birlikte ısı transfer katsayısında önemli bir artış gözlenmiştir.

Ali vd. (2018) TiO₂ bazlı nanoakışkanlar için farklı hazırlama tekniklerini araştırmış ve karışımın fiziksel özelliklerini ve stabilitesini iyileştirmek için bazı yöntemler önermiştir [97]. Yapılan kapsamlı derleme çalışmasında ısıl iletkenlik ve viskozite parametrelerinin nanoakışkan performansına etkileri vurgulanmıştır. Gelişmiş ısıl ve elektriksel özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılan titanyum dioksit katkılı nanoakışkanların hazırlanması ile ilgili literatürde bulunan tek aşamalı ve iki aşamalı yöntemler detaylı biçimde incelenmiştir. Ek olarak, titanyum dioksitin doğada bulunan üç farklı kristal formu da sunulmuş ve bu kristal formlara sahip nanoakışkanların hazırlama süreçleri ve kullanılan temel akışkanlı detaylı biçimde tartışılmıştır. Yağ, su, parafin yağı ve etilen glikol gibi temel akışkanların özellikleri ve kullanımlarındaki avantajları sunulmuştur. Çalışmada, buhar biriktirme tekniği gibi nanoakışkan hazırlama teknikleri de verilmiştir. Bunun yanında, kararlı ve uygun maliyetli nanoakışkanların üretimi için dikkat edilmesi gerek kriterler de çalışma kapsamında incelenmiştir. Farklı uygulamalar için titanyum dioksit nanoakışkanlarının hazırlanması sırasında göz önünde bulundurulması gereken sentez teknikleri ve fiziksel özellikler tartışılmıştır.

He vd. (2009), düz bir borudan akan nanoakışkanı laminar akış koşullarında incelemiştir [98]. Araştırmada hem tek faz yöntemi hem de birleşik Euler ve Lagrange yöntemi kullanılarak sayısal bir çalışma yapılmıştır. Nanopartikül konsantrasyonunun, Reynolds sayısının ve çeşitli nanopartikül boyutlarının akış ve konvektif ısı transferi davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, özellikle giriş bölgesinde nanoakışkanların ısı transferini önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Sayısal sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve aralarındaki farkın makul seviyede olduğu tespit edilmiştir.

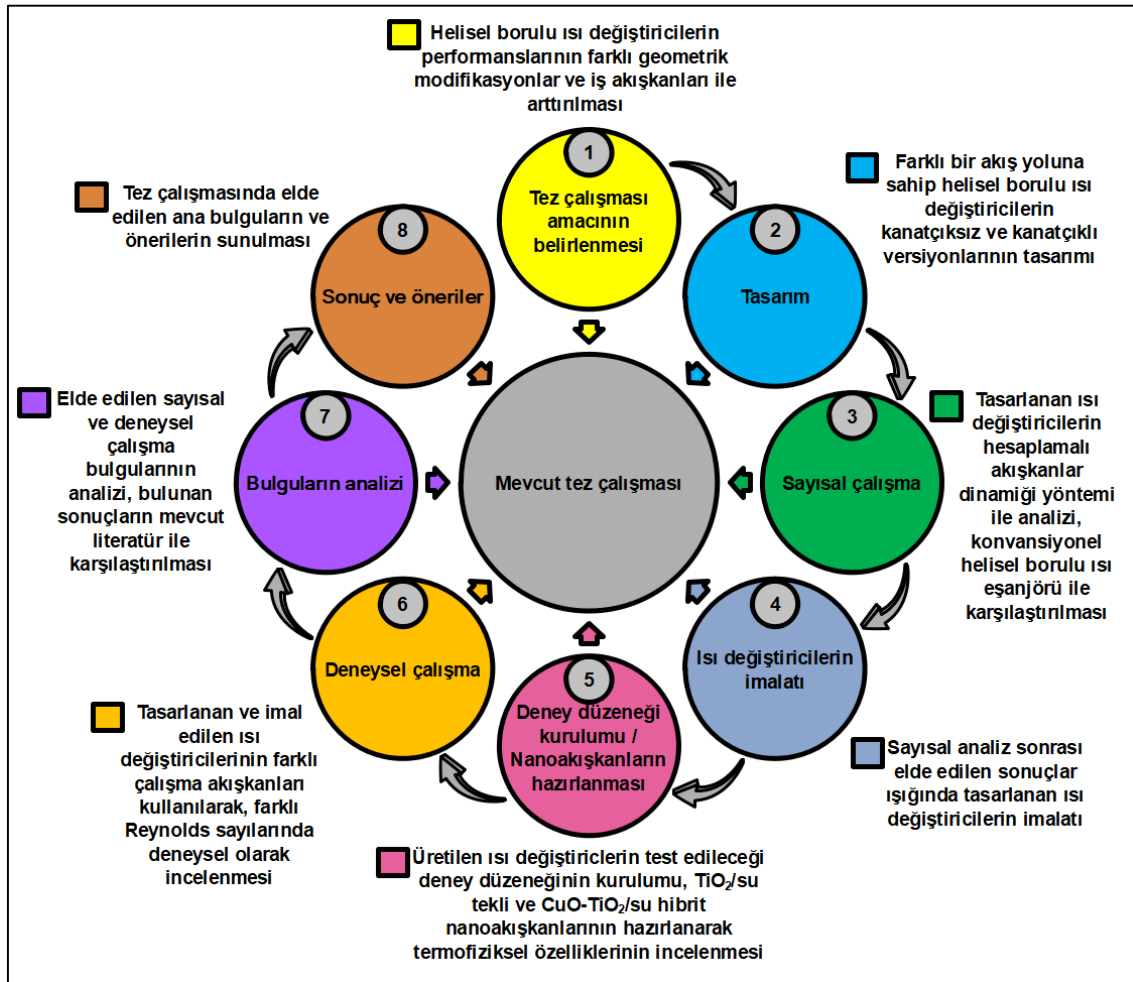
Rao ve Sankar (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, CuO içeren nanoakışkanının çift borulu bir ısı değiştiricideki ısı transferini iyileştirme potansiyeli detaylı olarak araştırılmıştır [99]. Çalışma kapsamında incelenen ısı değiştirici U-borulu yapıdadır. İncelenen ısı değiştiricide nanoakışkan, 8, 10, 12 ve 14 litre/dakika debi değerlerinde deneysel olarak test edilmiştir. Diğer çevrimdeki su ise 8 litre/dakikalık sabit debiye ayarlanmıştır. Ek olarak, Partikül konsantrasyonu ve Reynolds sayısının artması ile Nusselt sayısında iyileşme sağlandığı belirtilmiştir. %0,06 hacim konsantrasyonunda nanoakışkan kullanımı, Nusselt sayısını temel akışkan ile karşılaştırıldığında yaklaşık %18,6 olarak arttırmıştır.

Elmnefi ve Abdullah (2021) gövde borulu bir ısı değiştiricinin ısı performansını yükseltmek için titanyum dioksit ve alümina içeren su bazlı nanoakışkanlar hazırlamış ve hazırlanan bu akışkanları deneysel olarak sistem içerisinde test etmiştir. [100]. Çalışmada, nanoakışkanlara ek olarak su da iş akışkanı olarak test edilmiştir. Deneyler 5, 5,5, 6, 6,5 ve 7 litre/dakika değerlerindeki akışkan debilerinde gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında her bir nanoakışkan için %0,1, 0,2 ve %0,3'lük hacimsel konsantrasyonlarda analizler yapılmıştır. Isı transferi, ısı transfer katsayısı, toplam ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısı parametreleri, çalışma kapsamında incelenmiştir. Sonuçlara göre, hacimsel konsantrasyon değerindeki artış, ısı transferini iyileştirmiştir. Alümina kullanılan nanoakışkandaki performans artışının daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Ek olarak, yüksek nanoakışkan konsantrasyon değerlerinde Nusselt sayısının da maksimum değerini aldığı belirtilmiştir. Nusselt sayısının en yüksek değeri titanyum dioksit/su nanoakışkanın kullanıldığı, %0,3'lük hacimsel konsantrasyon ve 7 litre/dakika değerlerinde gerçekleştirilen deneyde 34,37 olarak bulunmuştur.

Çalışma akışkanı olarak kullanılacak nanoakışkanların performansı iki ya da daha fazla nano boyutta partikül kullanılarak arttırılabilir. Bu tip nanoakışkanlara hibrit nanoakışkan denmektedir. Bilindiği üzere, tekli olarak kullanılan nanopartiküller akışkanın gereksinim duyduğu bütün özellikleri sağlayamamaktadır. Bu nedenle, hibrit tip nanoakışkanlar, sinerjik etkileri nedeniyle gelişmiş ısı özellikler sağlayabildiklerinden ısı değiştiricilerde kullanılmak üzere tercih edilebilir [101,102]. Hibrit tip nanoakışkanların tekli nanoakışkanlardan daha iyi ısı performans sergilediğini gösteren bazı araştırmacılar bilimsel literatürde mevcuttur [103-105].

5. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Şekil 5.1’de tez çalışmasının adımları sunulmuştur. Buna göre, ilk olarak tez çalışmasının hedefleri belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında helisel borulu ısı değiştiricilerin performanslarının farklı geometrik modifikasyonlar ve çalışma akışkanları kullanılarak artırılması amaçlanmıştır. Farklı bir akış yoluna sahip helisel borulu ısı değiştiriciler tasarlanmış ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile sayısal olarak analiz edilmiştir. Sonrasında, ısı değiştiriciler imal edilmiş ve testler için bir deney düzeneği kurulmuştur. Bunun yanında, helisel borulu ısı değiştiricilerin sıcak tarafında kullanılacak nanoakışkanlar hazırlanmış ve nanoakışkanların termofiziksel özellikleri araştırılmıştır. Deneyler sonrasında elde edilen bulgular analiz edilmiş ve literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, tez çalışması elde edilen ana bulguların tartışılması ve öneriler ile tamamlanmıştır.



Şekil 5.1. Mevcut tez çalışmasının adımları

5.1. Sayısal Analiz

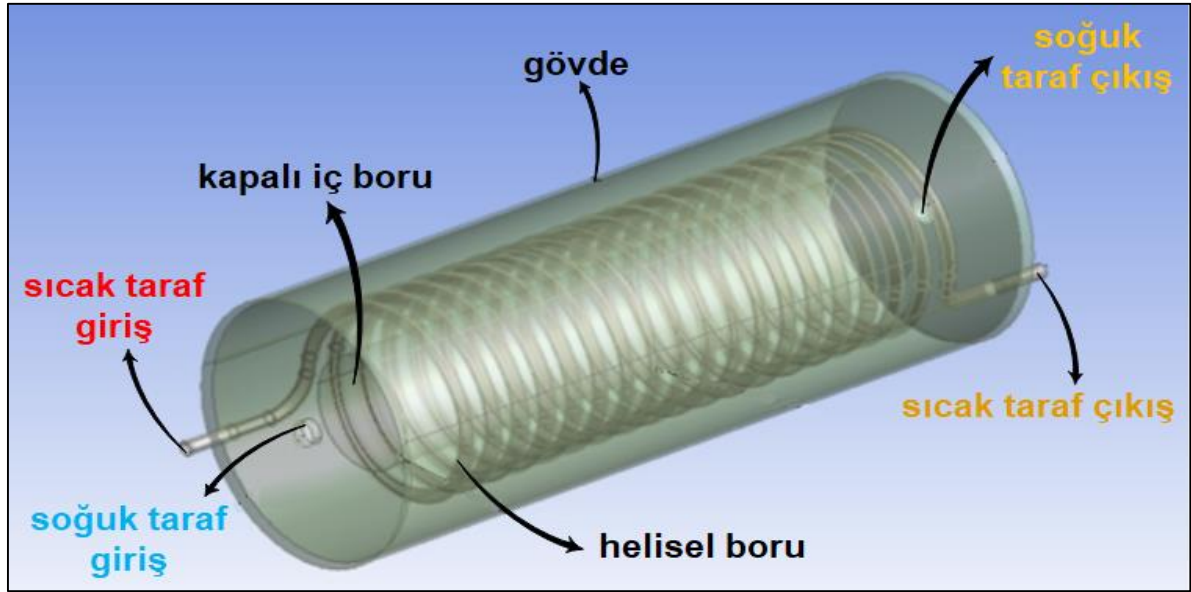
Tez çalışmasının bu kısmında, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle tasarlanan helisel borulu ısı değiştiriciler analiz edilmiştir. Simülasyon çalışmasının temel amacı yüksek ısıl performansa sahip ısı değiştirici konfigürasyonunun seçilmesidir. Sayısal analiz ANSYS Fluent 18.2 programında gerçekleştirilmiştir.

5.1.1. Isı değiştirici modellerinin oluşturulması

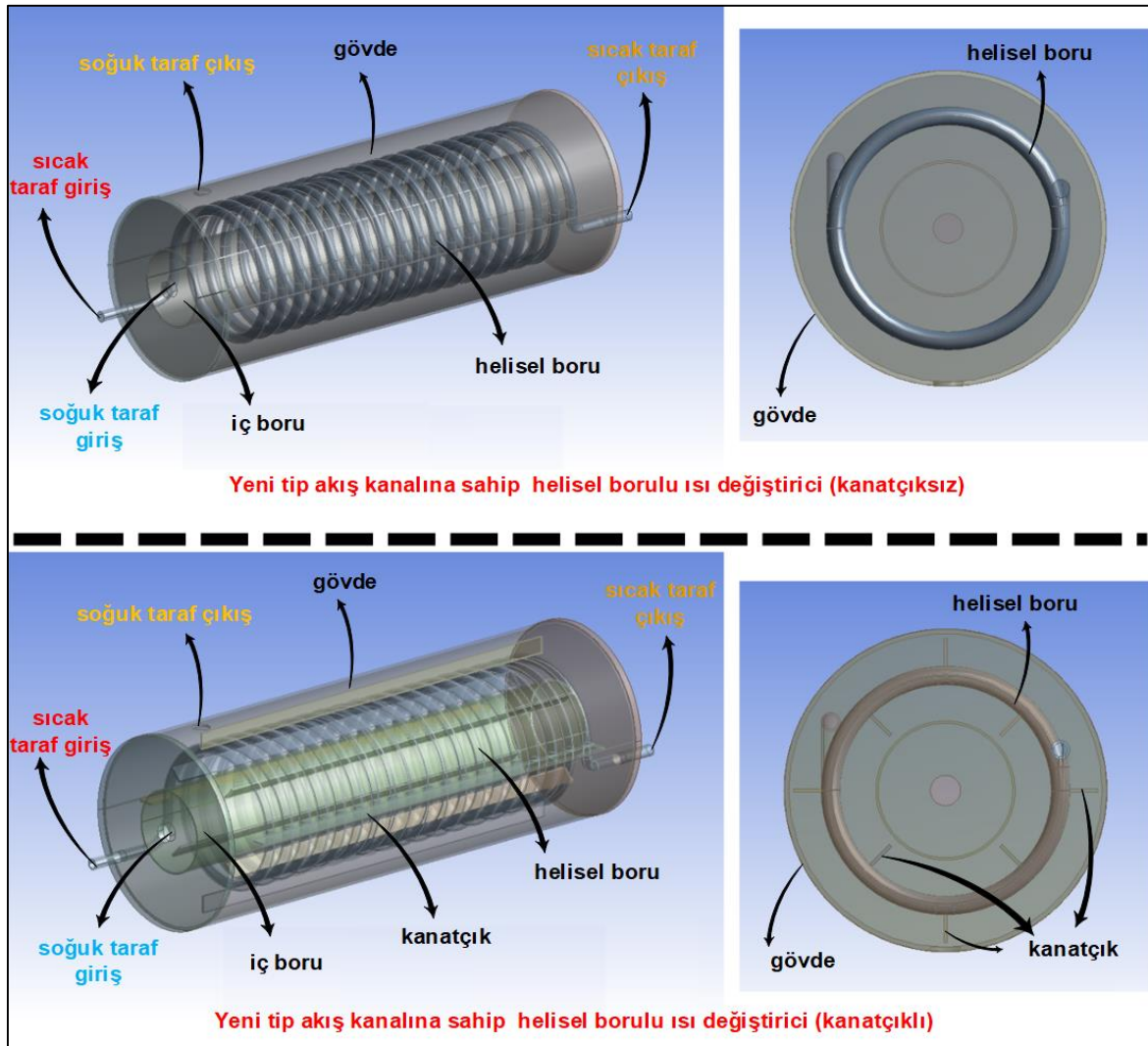
Bilgisayar destekli sayısal incelemenin yapılabilmesi için analiz geometrisinin doğru bir biçimde oluşturulması gerekmektedir. Tasarlanan helisel borulu ısı değiştiricilerin üç boyutlu geometrileri CATIA V5 R18 ile oluşturulmuştur. Oluşturulan geometriler sonrasında ANSYS Fluent 18.2 programına aktarılmıştır.

Sayısal çalışmanın ilk adımında, tez kapsamında geliştirilen yeni akış kanalı konvansiyonel helisel borulu ısı değiştirici ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak, incelenen tüm ısı değiştiricilerin boyutlarının aynı olduğu belirtilmelidir. Bunun yanında helis adımı, helis çapı ve sarım sayıları da her bir ısı değiştirici için aynıdır. Şekil 5.2’de incelenen konvansiyonel ısı değiştirici geometrisi gösterilmiştir. Şekilde verilen ısı değiştirici, konvansiyonel nitelikte olup gövde kısmının ortasında kapalı bir boru bulunmaktadır. İçerisinde kapalı bir boru bulunmasının nedeni ise akışı regüle etmesi ve gövde tarafındaki soğuk akışkanın daha fazla enerji kazanmasını sağlamaktır. Soğuk akışkan gövdeye yan taraftan girmekte ve gövdenin üst kısmından sistemi terk etmektedir.

Şekil 5.3’te tasarlanan ve incelenen yeni tip ısı değiştiricilerin geometrileri verilmiştir. Verilen şekilde üstteki resimden görülebileceği gibi modifiye edilen helisel borulu ısı değiştiricinin içerisinde bir iç boru bulunmaktadır. Soğuk akışkan gövde tarafına bu boru içerisinden girerek ısı değiştiricinin tüm uzunluğunu katederek iç borunun sonundan dış boruya (gövdeye) ulaşmakta ve gövdeden akarak ısı değiştiriciyi terk etmektedir. Bu modifikasyon ile gövde tarafındaki akışın regüle edilmesi ve ısı değiştiricinin ısıl performansının artırılması amaçlanmıştır. Bunun yanında, aynı şekildeki alt resimde ise geliştirilen yeni akış yoluna sahip helisel borulu ısı değiştiricinin kanatçıklı versiyonu bulunmaktadır.

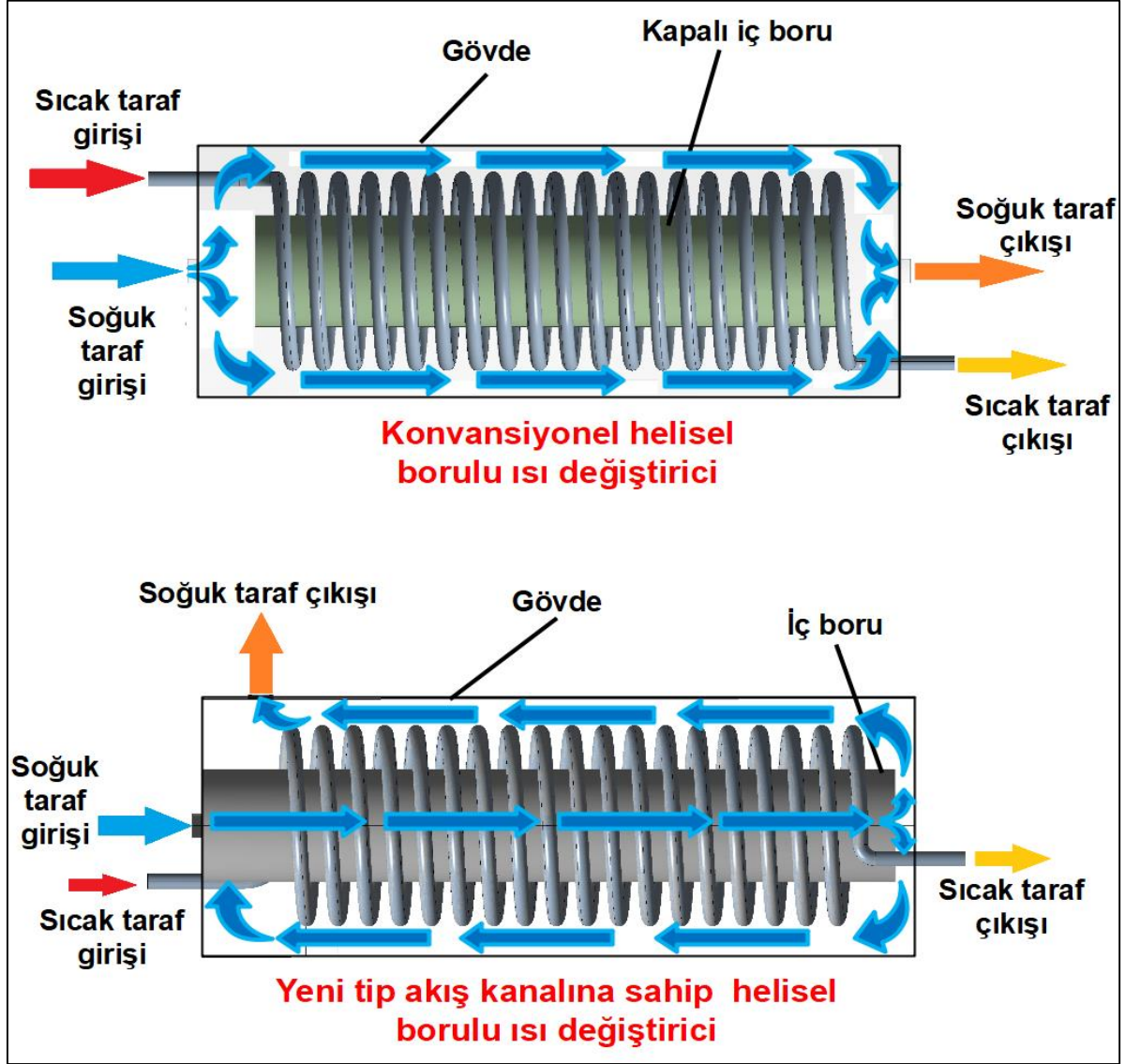


Şekil 5.2. İncelen konvansiyonel ısı değiştirici geometrisi



Şekil 5.3. İncelen ısı yeni tip ısı değiştiricilerin geometrileri

Tasarlanan ve sayısal olarak analiz edilen yeni akış kanalına sahip ısı değiştiricinin helisel borularına 8 adet kanatçık eklenmesi ile ısı transfer alanı yaklaşık olarak 635 cm^2 arttırılmıştır. Şekil 5.4'te verilen yan görünüşten gövde tarafındaki akış daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 5.4. Sayısal olarak analiz edilen ısı değiştiricilerin yan görünüşleri

Ek olarak Çizelge 5.1'de hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile sayısal olarak incelenen helisel borulu ısı değiştiricilere ait ölçüler verilmiştir. Verilen değerler konvansiyonel, yeni tip kanatçıksız ve yeni tip kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiricileri kapsamaktadır. Verilen ölçüler, yeni tip helisel borulu ısı değiştiricilerin imalat aşamasında da dikkate alınmış ve geliştirilen yeni akış kanalına sahip helisel borulu ısı değiştiriciler bu ölçülerde imal edilmiştir.

Çizelge 5.1. İncelenen ısı değıştircilerin ölçüleri

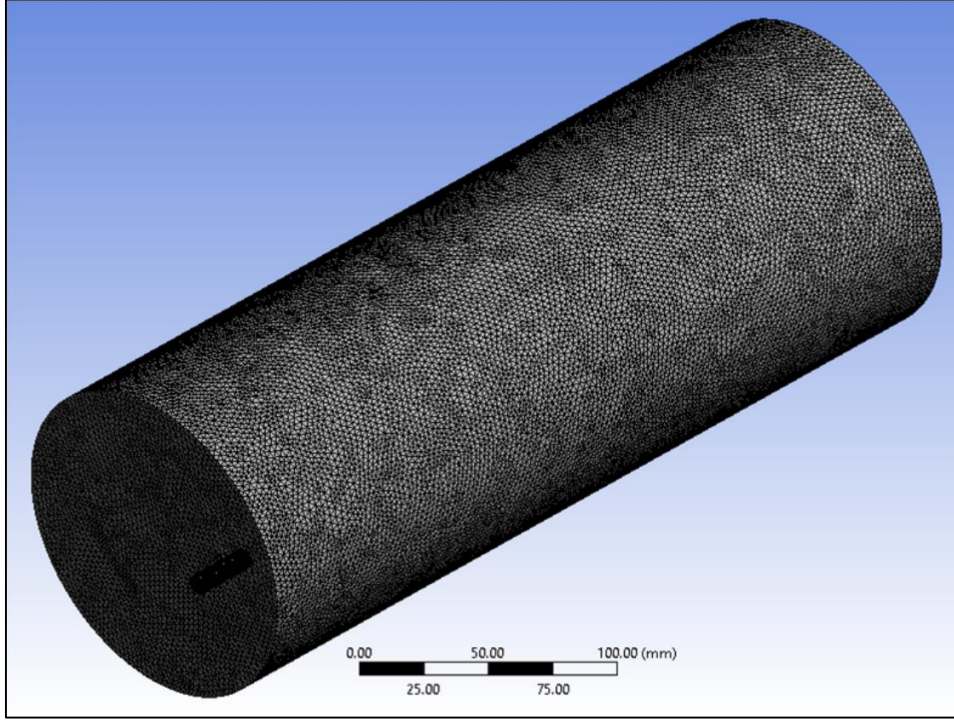
Geometrik parametreler	Helisel borulu ısı değıştirci tipi		
	Konvansiyonel	Yeni tip (kanatçksız)	Yeni tip (kanatçıklı)
	Değer	Değer	Değer
Helisel borunun iç çapı	0,006 m	0,006 m	0,006 m
Helisel borunun dış çapı	0,008 m	0,008 m	0,008 m
Helis çapı	0,1 m	0,1 m	0,1 m
Helis adımı	0,016 m	0,016 m	0,016 m
Sarım sayısı	18	18	18
Gövde çapı	0,14 m	0,14 m	0,14 m
Gövde uzunluğu	0,375 m	0,375 m	0,375 m
İç boru çapı	0,060 m	0,060 m	0,060 m
İç boru uzunluğu	0,305 m	0,325 m	0,325 m
Kanatçık sayısı	-	-	8
Kanatçık uzunluğu	-	-	0,310 m
Kanatçık genişliği	-	-	0,012 m
Kanatçık kalınlığı	-	-	0,0015 m

5.1.2. Isı değıştircilerin ağ yapısının oluşturulması

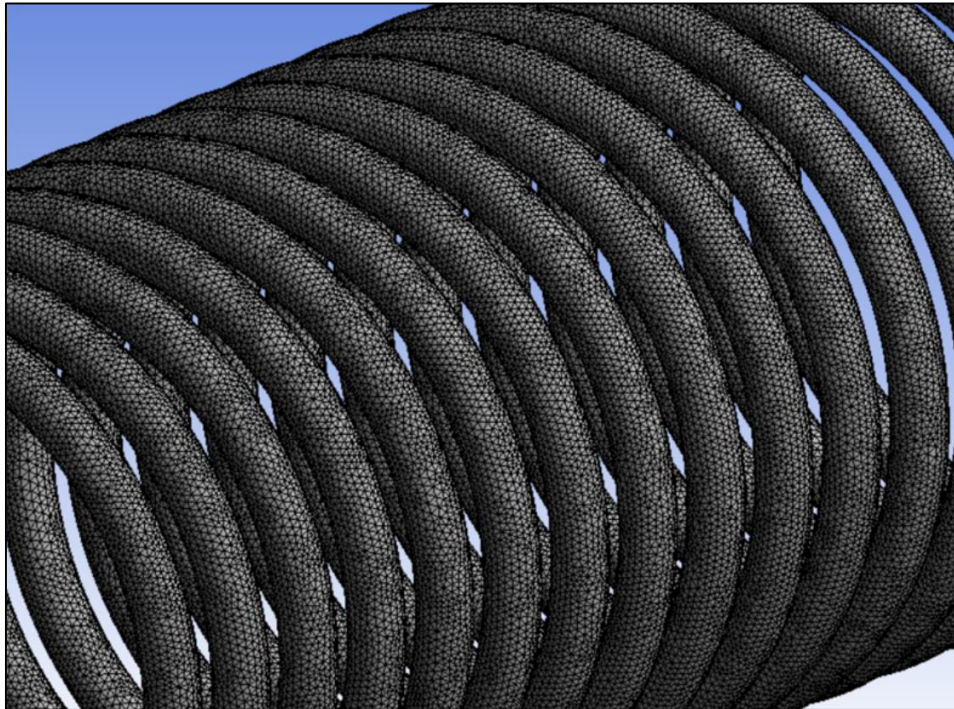
Tasarlanan ve geometrisi oluşturulan üç farklı helisel borulu ısı değıştircinin sayısal analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için ağ (mesh) yapısının oluşturulmasına ihtiyaç vardır. Sayısal ağın oluşturulması, ANSYS Fluent'in Meshing modülü kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 5.5'te tüm geometri için oluşturulan ağ yapısı gösterilmektedir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de ise sırasıyla helisel boru ve kanatçık için ağ yapıları sunulmuştur. Gövde kısmındaki kanatçıklar, helisel borular ve helisel boruya yakın bölgeler için daha ince ağ yapısının uygulandığı görülebilmektedir. Eğrilik (skewness) değeri ağ yapısı kalitesinin değerlendirilmesi için kullanılan bir parametredir. Analiz edilen konvansiyonel helisel borulu ısı değıştirci için maksimum ve ortalama eğrilik değeri sırasıyla 0,80 ve 0,12'dir. Kanatçık içermeyen yeni tip akış kanalına sahip helisel borulu ısı değıştirci ve kanatçık içeren yeni tip akış kanalına sahip helisel borulu ısı değıştirci için maksimum eğrilik

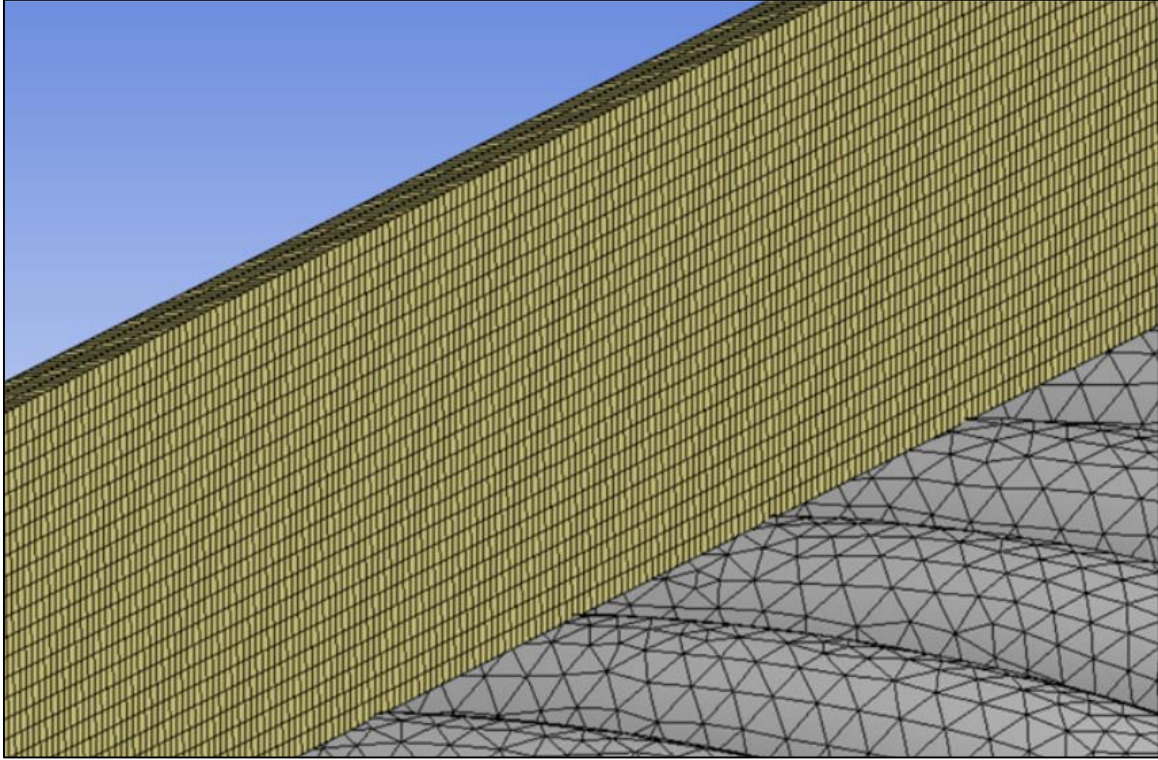
değerleri sırasıyla 0,84 ve 0,86'dır. Ortalama eğrilik değerleri ise yeni tip kanatçıksız ve kanatçık içeren helisel borulu ısı değiştiriciler için sırası ile 0,15 ve 0,18 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. Tüm geometriye ait ağ yapısı



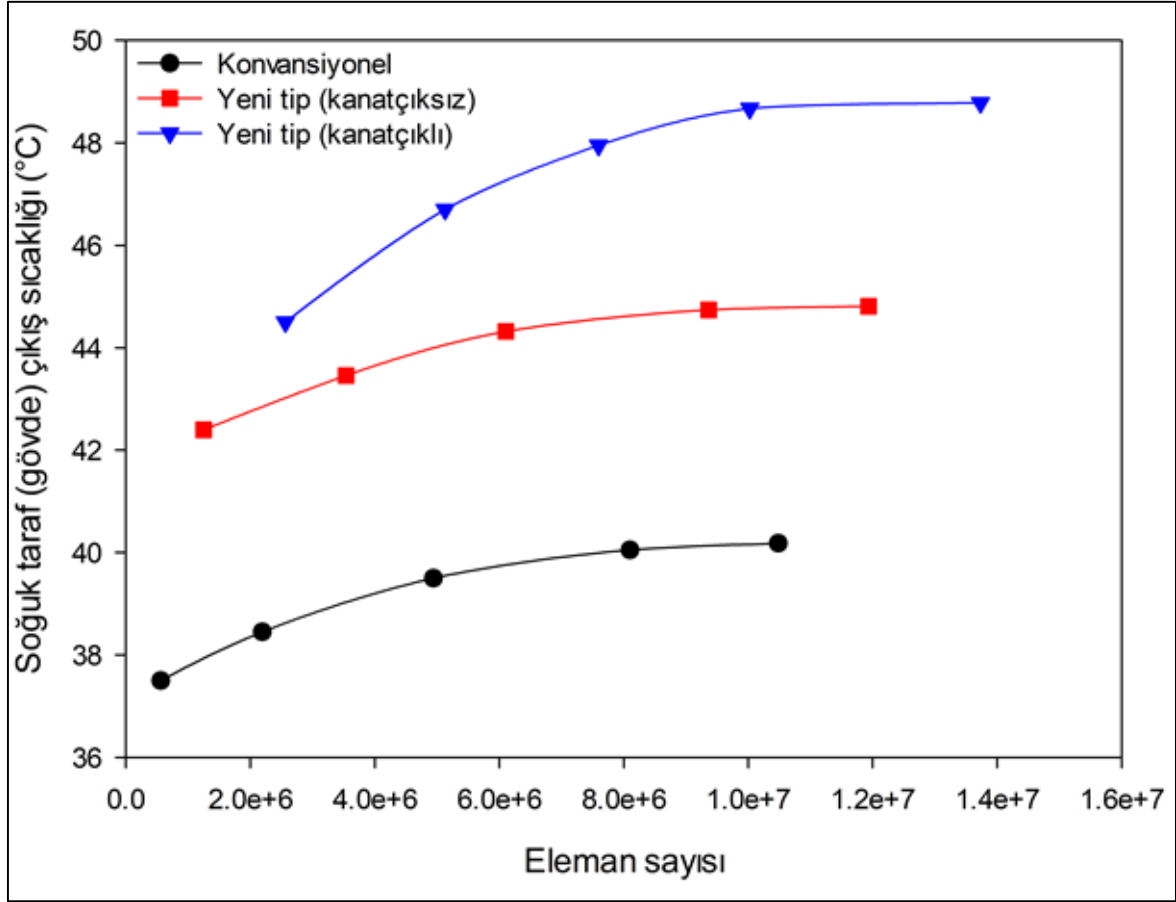
Şekil 5.6. Helisel boru ağ yapısı



Şekil 5.7. Kanatçığa ait ağ yapısı

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak yapılan sayısal analizlerde oluşturulan ağ yapısı oldukça önemlidir. Ağ yapısının doğru oluşturulmadığı durumlarda yapılan analizlerin doğru sonuç vermeyeceği söylenebilir. Bu tez çalışması kapsamında üç farklı helisel borulu ısı değiştirici sayısal olarak incelenmiştir. İncelenen her bir ısı değiştirici için 5 ayrı ağ yapısı oluşturulmuş ve ön analizler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede elde edilecek sonuçların ağdan bağımsızlığı değerlendirilmiştir.

Şekil 5.8’de incelenen helisel borulu ısı değiştiricilere ait ağ bağımsızlığı grafiği verilmiştir. Verilen grafik soğuk taraf çıkış sıcaklığına göre ağ elemanı sayısını göstermektedir. Farklı ağ sayıları ile yapılan sayısal analizler sonucunda, konvansiyonel helisel borulu ısı değiştirici için ağ sayısı 10 484 487 olarak seçilmiştir. Ek olarak, hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu ile yapılan sayısal inceleme sürecindeki ağ bağımsızlık analizi sonucunda kanatçık içermeyen yeni tip akış kanalına sahip helisel borulu ısı değiştirici ve kanatçık içeren yeni tip akış kanalına sahip helisel borulu ısı değiştirici için ağ sayıları sırasıyla 11 934 741 ve 13 733 409 olarak seçilmiştir.



Şekil 5.8. Ağ bağımsızlığı grafiği

5.1.3. Sayısal analiz işlemleri

Sayısal analizlerde, süreklilik, momentum ve enerji korunumu eşitliklerinde bazı varsayımlar göz önünde bulundurularak uygulanmıştır. Bunlar, sistemde kararlı durumda olduğu, akışın daimi ve sıkıştırılamaz olduğu, çalışma akışkanlarının fiziksel özelliklerinin sabit olduğu ve yerçekimi etkisinin ihmal edildiğidir. Sayısal analizlerde literatürde ısı değiştiricilerin analizinde sıklıkla kullanılan türbülans modelleri denenmiştir [106, 107]. Sonuç olarak, konvansiyonel ve yeni tip kanatçıksız ve kanatçıklı ısı değiştiricilerin sayısal analizinde kullanılmak üzere geliştirilmiş duvar fonksiyonları eklenerek k- ϵ (RNG) türbülans modeli tercih edilmiştir.

Sayısal analizlerde kullanılan kütle korunumu denklemi Eş 5.1’de sunulmuştur:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.1)$$

Helisel borulu ısı değiştiricilerin incelendiği çalışmada kullanılan momentum korunumu denklemleri ise Eş 5.2’de verilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5.2)$$

Kullanılan enerji korunumu denklemi ise Eş 5.3’te gösterilmektedir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + [\nabla \cdot (\vec{v} \cdot (\rho E + p))] = \nabla \cdot [k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \vec{v})] + S_h \quad (5.3)$$

Daha önce de belirtildiği gibi k-ε (RNG) türbülans modeli sayısal çalışma için seçilmiştir. Kullanılan k-ε (RNG) denklemleri aşağıdaki gibidir [108]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (5.5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.6)$$

5.2. Deneysel Çalışma

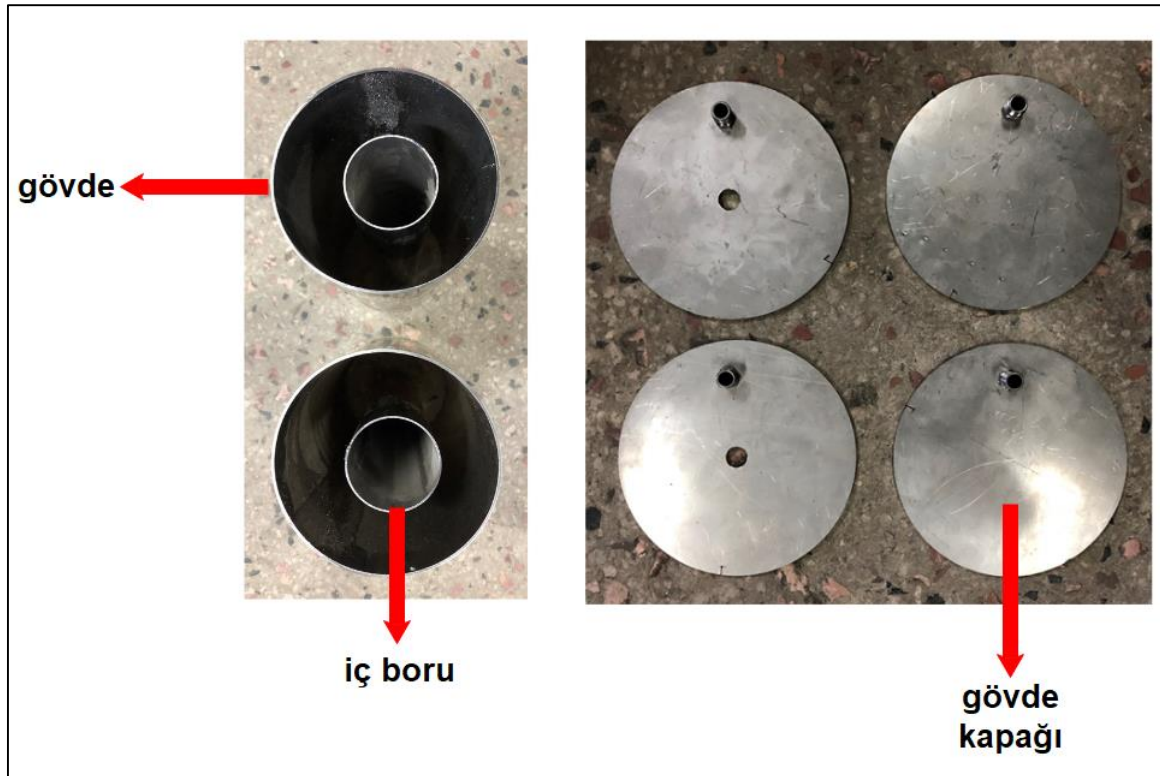
Bu kısımda, tez kapsamında tasarlanan ve sayısal analizler sonucunda imal edilen yeni tip helisel borulu ısı değiştiriciler sunulmuştur. Ek olarak, testler sırasında kullanılan deney düzeneği ve nanoakışkanların hazırlama süreçleri de detaylı olarak verilmiştir.

5.2.1. Helisel borulu ısı değiştiricilerin imalatı

Tez kapsamında, sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda iki adet helisel borulu ısı değiştirici imal edilmiştir. İmal edilen ısı değiştiricilerinin ölçüleri bir önceki sayısal analiz kısmında verilmiştir. Helisel borulu ısı değiştiricilerin ikisi de yeni tip gövde

tarafı akış yoluna sahiptir. Buna göre ilk helisel borulu ısı değıştirci kanatçksız helisel boru geometrisine sahiptir. Helisel boru et kalınlıkları her iki ısı değıştirci için de 1 mm'dir. İkinci helisel borulu ısı değıştirci, sisteme kanatçık eklenmesinin ısıl performansa etkisini deneysel olarak incelemek amacıyla imal edilmiştir. İmal edilen ikinci ısı değıştircisine 8 adet bakır kanatçık eklenmiştir. Kanatçıkların ölçüleri 310x12x1,5 mm'dir. Kanatçıklar helisel borulara bakır kaynağı ile sabitlenmiştir. Daha önce de belirtildiğı üzere, her iki helisel borulu ısı değıştircisinde de ısıl performansı arttırmak amacıyla bir iç boru eklenmiş ve soğuk alışkanın girişı bu iç borudan verilmiştir.

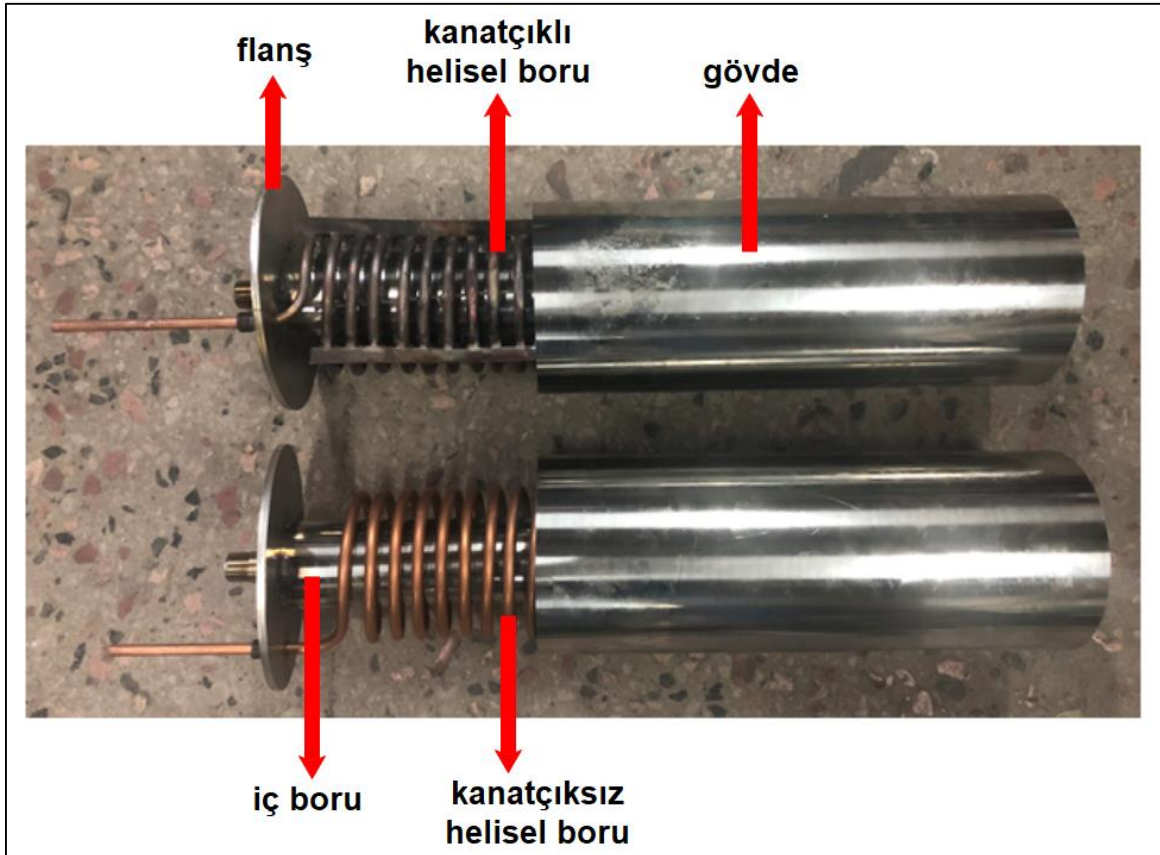
Her iki helisel borusu için, fittings malzemeleri, gövde kapakları, gövdeler ve iç borular için paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Birleştirme esnasında argon kaynağı kullanılmış olup, sızdırmazlık için üretilen helisel borulu ısı değıştirciler basınç testlerine tabii tutulmuştur. Resim 5.1'de helisel borulu ısı değıştircilerin gövde, iç boru ve flanşlarının fotoğrafları sunulmuştur. Resim 5.2'de ise kanatçksız ve kanatçıklı helisel boru görselleri bulunmaktadır. Resim 5.3'te ve Resim 5.4'te ise sırasıyla helisel boruların gövdeye yerleştirilmesi ve kaynaklama işlemi ile birleştirmeye ait fotoğraflar verilmiştir.



Resim 5.1. Gövde, iç boru ve gövde kapaklarına ait fotoğraflar



Resim 5.2. Kanatçiksız ve kanatçıklı helisel boru görselleri



Resim 5.3. Helisel boruların gövdelere yerleştirilmesi



Resim 5.4. Kaynak işlemi ile ısı değiştiricilerin birleştirilmesi

5.2.2. Deney düzeneği

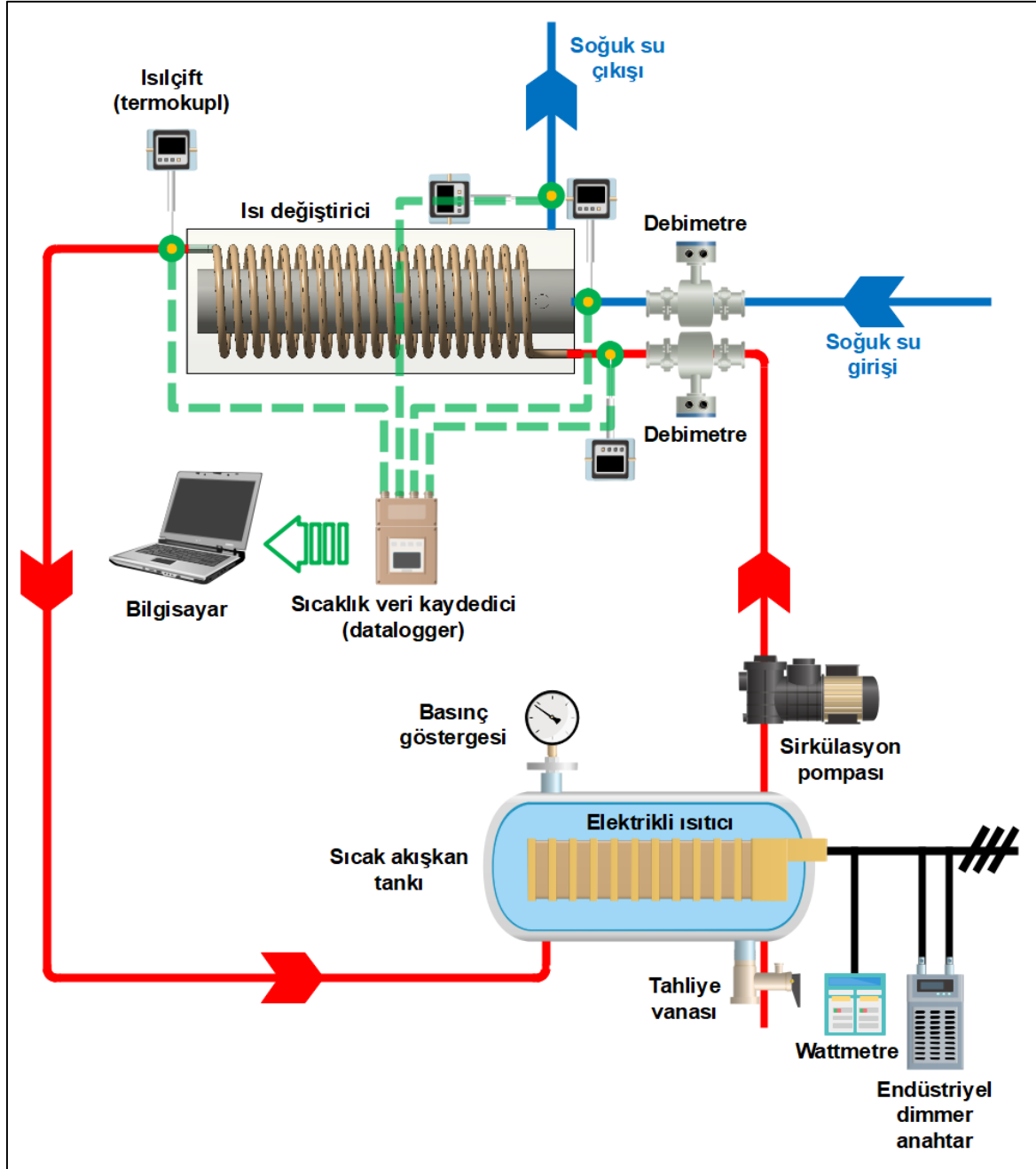
Tez çalışması kapsamında imal edilen yeni tip helisel borulu ısı değiştiricilerin testleri için bir deney düzeneği hazırlanmıştır. İmal edilen kanatçıksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiriciler, kurulan deney düzeneğinde farklı koşullar altında deneysel olarak analiz edilmiştir.

Öncelikle, imal edilen ısı değiştiricileri ısı kayıplarının önlenmesi adına ısı yalıtılmıştır. Bu amaçla, her iki helisel borulu ısı değiştiricide de 0,034 W/m.K ısı iletkenliğe ve 2,5 cm kalınlığa sahip elastomerik köpük yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Ek olarak, sistem üzerisindeki akışkanların geçtiği bağlantı hortumları da ısı yalıtılmıştır. Soğuk tarafı için şebeke suyu kullanılan sistemde, sıcak taraftaki akışkanın ısıtılması için deney düzeneğine elektrikli ısıtıcı içeren bir sıcak akışkan tankı

yerleştirilmiştir. Sıcak akışkan tankına da ısı değiştiriciler ile aynı şekilde ısı yalıtım uygulanmıştır. Sıcak akışkanın sistem üzerinde dolaştırılması için sistemin sıcak tarafına bir sirkülasyon pompası eklenmiştir. Ek olarak, hem sıcak hem de soğuk tarafa birer hava purjörü yerleştirilerek sistem içerisindeki havanın tahliye edilmesi sağlanmıştır. Sıcak akışkan tankına eklenen basınç göstergesi ile sistemlerin sıcak taraflarına tulumba yardımıyla akışkan eklenirken basınç kontrol edilmiştir. Sıcak akışkan tankının alt kısmında bulunan vana sıcak akışkanın helisel borulu ısı değiştirici sisteminin sıcak tarafına hem şarjı hem dedeşarjı için kullanılmıştır.

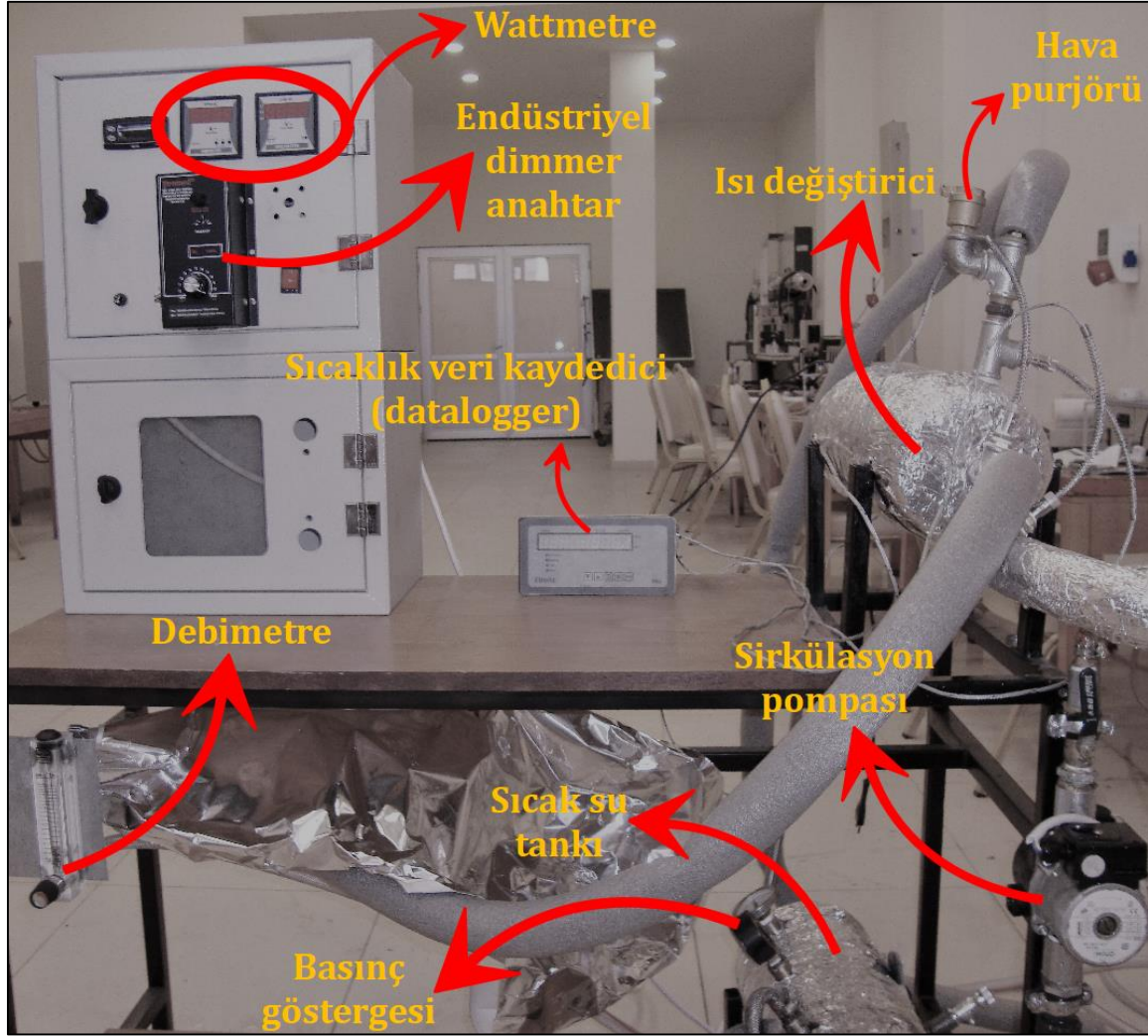
Soğuk ve sıcak akışkanların debilerini ölçmek ve ayarlayabilmek için deney düzeneğinin hem sıcak hem de soğuk taraflarına $\pm 5\%$ hassasiyete sahip birer debimetre yerleştirilmiştir. Bunun yanında, helisel borulu ısı değiştirici sistemlerindeki sıcaklıklar $\pm 0,5$ °C hassasiyete sahip Elimko marka K tipi ısılıçiftler (termokupl) yardımıyla ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümleri için dört adet ısılıçift kullanılmıştır. Doğru sıcaklık verileri elde edilebilmesi için ısılıçiftlerin helisel borulu ısı değiştiricilerin giriş ve çıkışlarına (sıcak ve soğuk taraf) daldırıldığı ve akışkanlar üzerinden doğrudan ölçüm alındığı belirtilmelidir. Sıcaklık veri kaydedici olarak Elimko marka E-680 model sıcaklık veri kaydedici (datalogger) kullanılmıştır. Kullanılan elektrikli ısıtıcıya (rezistans) ait elektriksel gücü doğrulamak için helisel borulu ısı değiştirici deney düzeneğine bir adet endüstriyel dimmer anahtar ve wattmetre yerleştirilmiştir.

Şekil 5.9’da helisel borulu ısı değiştirici deney düzeneğinin şematik gösterimi sunulmuştur. İmal edilen yeni tip helisel borulu ısı değiştiricilerin ikisi de aynı deney düzeneği kullanılarak denenmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, helisel borulu taraf sıcak çevrim olarak seçilmiştir. Bu kısım kapalı çevrim şeklinde tasarlanmış olup, sıcak akışkan tankında istenilen sıcaklık değerine gelmesi sağlanan akışkanın helisel borulu ısı değiştiriciye gönderilmesi sağlanmıştır. Sıcak akışkanın bir sirkülasyon pompası yardımı ile çevrimde dolaştırıldığı helisel borulu ısı değiştirici deney düzeneğinde, soğuk (gövde) taraf için şebeke suyu kullanılmış ve şebeke suyunun sistem içerisinde dolaştırılması için şebeke basıncından faydalanılmıştır.



Şekil 5.9.Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Tasarlanan ve imal edilen yeni tip kanatçiksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiricileri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda deneysel olarak incelenmiştir. Resim 5.5'te kurulmuş olan deney düzeneğine ait fotoğraf yer almaktadır. Resmin sağ alt kısımda sıcak su tankı ve sağ üst kısımda ise ısı değiştirici görülebilmektedir. Deneylerde farklı iki tip ısı değiştirici denenmiş olup, her bir deneyde ilgili ısı değiştirici sisteme montajlanarak sızdırmazlıkları testlerden önce kontrol edilmiştir.



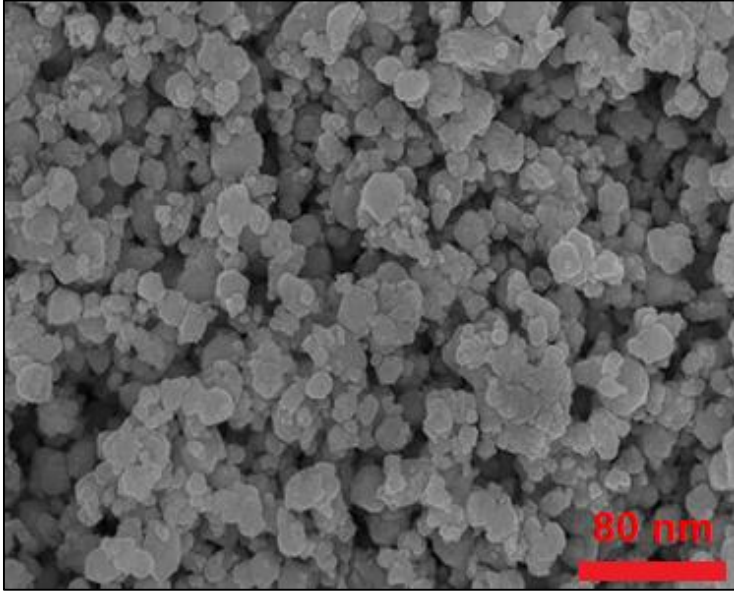
Resim 5.5. Deney düzeneği fotoğrafı

5.2.3. Nanoakışkanların hazırlanması

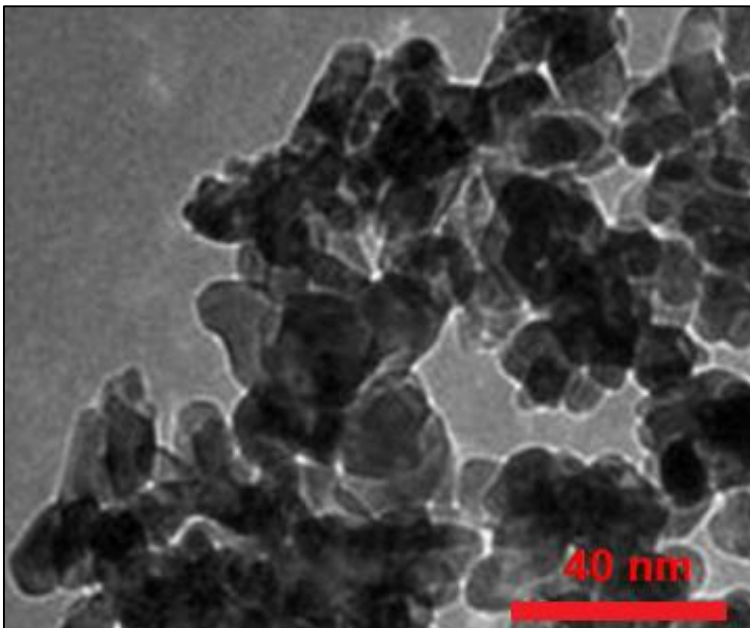
Daha önce de bahsedildiği üzere, bu tez çalışmasında tasarlanan ısı değıştiricilerin sıcak tarafında kullanılmak üzere üç farklı akışkan seçilmiştir. Bunlardan ilki su (saf su) olup, kullanılan diğer iki akışkan ise TiO_2 /su tekli ve CuO-TiO_2 /su hibrit nanoakışkanlarıdır.

Nanoakışkanların hazırlanmasında, literatürde de sıklıkla kullanılan iki adım yöntemi kullanılmıştır. Sürecin ilk aşamasında, ilgili parçacıklar 8 saat boyunca bilyalı öğütme işlemine tabii tutulmuştur [109]. Parçacık boyutunun azaltılması ve homojen boyutta nanopartiküller hazırlanması amacıyla Spex-8000M bilyalı öğütücü kullanılmıştır. Hazırlanan CuO ve TiO_2 nanopartiküllere ait taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri sırasıyla Resim 5.6 ve Resim 5.7’de gösterilmektedir. Hazırlanan CuO ve TiO_2 nanopartiküllerin ortalama tanecik boyutu sırasıyla 38 nm ve 18 nm’dir. Ek olarak CuO ve

TiO₂ nanopart llerin saflık değerleri sırasıyla %99,90 ve %99,55'dir. Hazırlama sürecinin ikinci aşamasında, nanoparçacıklar temel sıvı (saf su) ile kütlece %1 oranında karıştırılmıştır. Bu işlem için bir hassas terazi kullanılmıştır. Karıştırma işleminin ilk aşaması mekanik bir karıştırıcı yardımıyla yapılmıştır. Hem tekli hem de hibrit nanoakışkanlar %1 kütlece karışım oranına sahiptir. Ek olarak, hazırlanan CuO-TiO₂/su hibrit nanoakışkanında kullanılan CuO ve TiO₂ nanopartikülleri de kütlece %50'lik karışım oranına sahiptir.

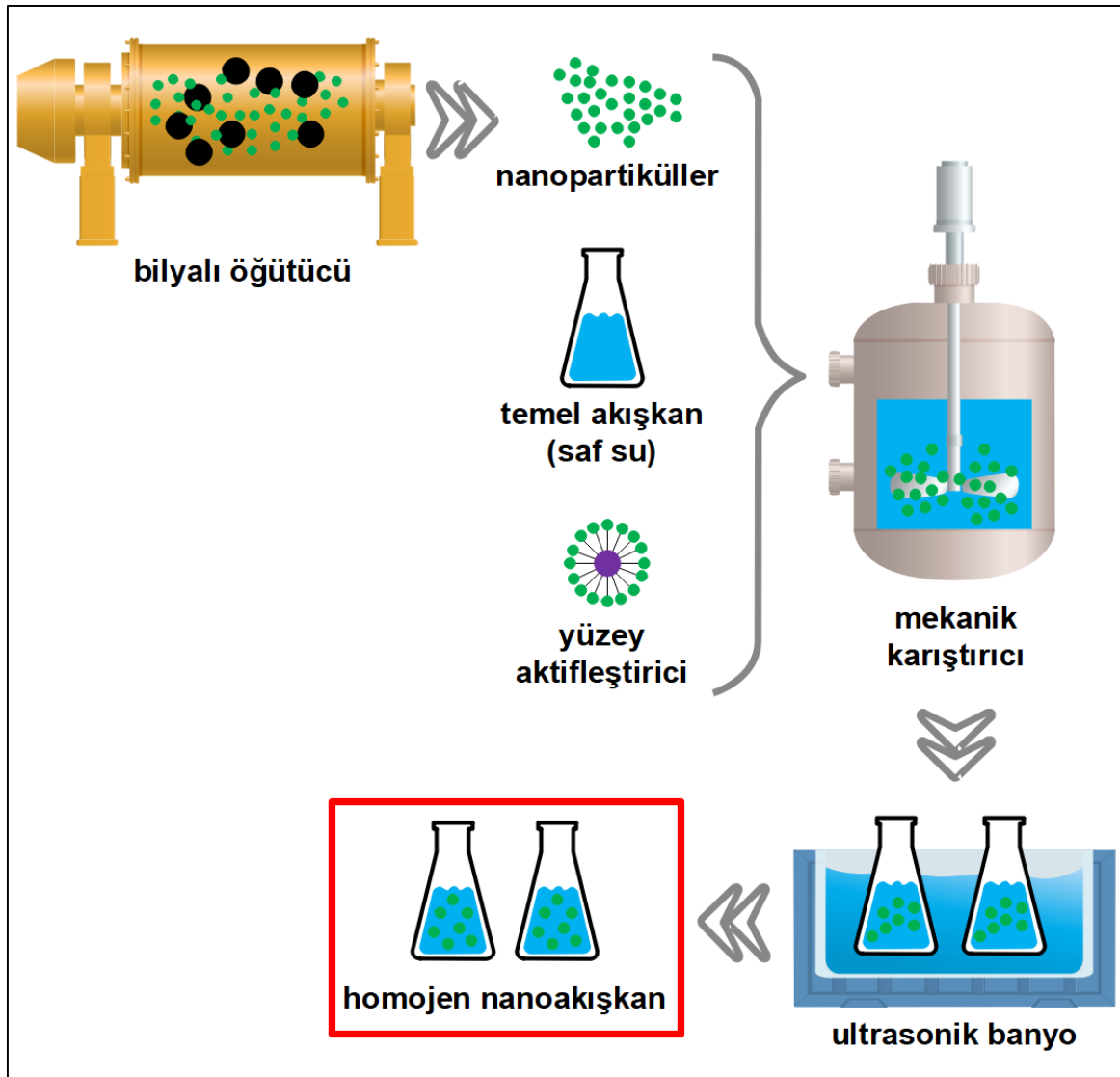


Resim 5.6. Hazırlanan CuO nanopartiküllere ait SEM görüntüsü



Resim 5.7. Hazırlanan TiO₂ nanopartiküllere ait SEM görüntüsü

Nanoakışkanların hazırlanmasında kütlece %0,2 oranında Triton X-100 yüzey aktif madde kullanılmıştır. Yüzey aktif çözelti kullanımının nedeni ise Van de Waals kuvvetlerinin ve nanopartiküllerin yüzey alanı boyutu nedeniyle topaklaşma ve çökelme meydana gelmesini engellemektir. Yüzey aktif madde kullanımı nanoakışkanın ıslanabilirlik özelliğini arttırmakta ve yüzey gerilimini azaltmaktadır. Mekanik karıştırma işlemine ek olarak daha kararlı nanoakışkanlar elde edilmesi amacıyla hazırlanan karışımlar ultrasonik banyoya da tabii tutulmuştur. Ultrasonikasyon işleminin uygulanması, nanoakışkan kararlılığını önemli ölçüde arttırmaktadır [110]. Hazırlanan CuO-TiO₂/su ve TiO₂/su nanoakışkanları 5 saatlik ultrasonik banyo işlemine tabii tutulmuştur [111, 112]. Şekil 5.10'da nanoakışkanların hazırlanma sürecine ait şematik gösterim sunulmuştur.



Şekil 5.10. Nanoakışkanların hazırlanma aşamaları

Çalışma akışkanının kararlılığını (stabilitesini) arttırmanın yanı sıra, deneysel aşamada kullanılacak olan tekli ve hibrit nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi de oldukça önemli bir husustur. Bu kapsamda belirli hacimdeki nanoakışkanların kütleleri hassas terazi (doğruluk: $\pm 0,01$ g) ile ölçülerek kullanılan nanoakışkanların yoğunlukları belirlenmiştir. TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ nanoakışkanlarının viskozite ölçümleri AND SV-10 viskozimetre cihazı yardımıyla yapılmıştır. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Hazırlanan TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ çözeltilerinin özgül ısı kapasiteleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Bu bağlamda TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ akışkanlarının ısı kapasitelerini elde etmek için Perkin Elmer Diamond DSC cihazı kullanılmıştır. Cihaza ait teknik özellikler Çizelge 5.3’te sunulmuştur. Hazırlanan tekli ve hibrit nanoakışkanların ısı iletkenlikleri, sıcak disk tekniğini uygulayan TPS 500S ısı iletkenlik ölçüm cihazı (doğruluk: %5) kullanılarak elde edilmiştir. Çizelge 5.4’te saf su, TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ akışkanlarının 40 °C’deki termofiziksel özellikleri gösterilmiştir. Ek olarak, Resim 5.8’de nanopartiküllerin ve nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan cihazlara ait görseller sunulmuştur.

Çizelge 5.2. AND SV-10 viskozimetre cihazının teknik özellikleri

Özellik	Değer
Viskozite ölçüm aralığı	0,3 mPa.s - 10 Pa.s
Sıcaklık aralığı	0-160 °C
Ölçüm birimi	cP , P, mPa.s , Pa.s
Titreşim frekansı	30 Hz
Doğruluk	$\pm 0,1$

Çizelge 5.3. Diamond DSC cihazı teknik özellikleri

Özellik	Değer
Güç	100-240 Volt, 50/60 Hz
Kalorimetre çözünürlüğü	$< \pm 0,1$
Kalorimetre duyarlılığı	0,2 mW
Kalorimetre doğruluğu	$< \pm 1$
Isıtma/soğutma hızı	0,01 °C ile 500 °C/dakika
Sıcaklık aralığı	(-170)-(+550) °C
Sıcaklık çözünürlüğü	$\pm 0,01$ °C
Sıcaklık doğruluğu	$\pm 0,1$ °C

Çizelge 5.4. Kullanılan çalışma akışkanlarının termofiziksel özellikleri

Akışkan	Viskozite (mPa.s)	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı (J/kg.K)	Isıl iletkenlik (W/m.K)
Saf su	0,62	998	4 180	0,61
TiO ₂ /su	0,72	1 020	4 070	0,64
CuO-TiO ₂ /su	0,74	1 033	4 045	0,70

**Spex-8000M bilyalı öğütücü****AND SV-10 viskozimetre****TPS 500S ısı iletkenlik ölçüm cihazı****Perkin Elmer Diamond DSC cihazı**

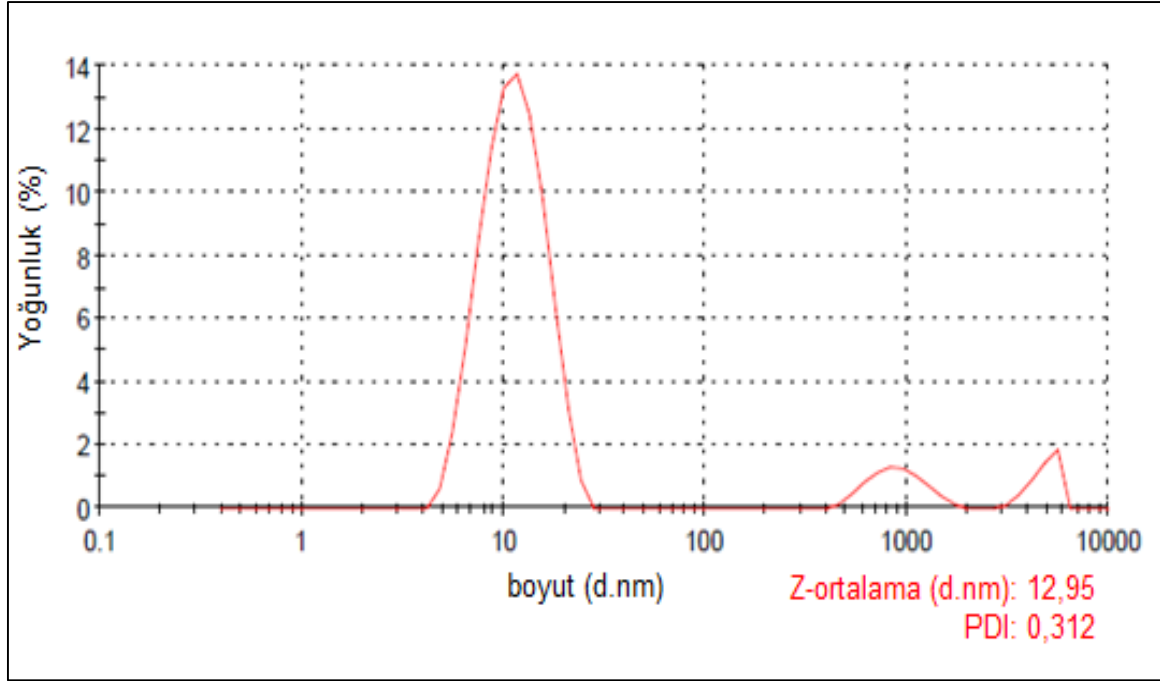
Resim 5.8. Hazırlama ve analiz sürecinde kullanılan cihazlar

Nanoakışkan hazırlama yönteminin akışkan stabilitesine önemli etkileri bulunmaktadır. Çalışma akışkanındaki homojen dağılım ve kümelenme kararlılığı belirleyen ana parametrelerdir. Zeta potansiyeli ölçümü, karışım içerisindeki dağılım veya çökme hakkında ayrıntılı bilgi sağlamaktadır. Parçacık boyutu dağılımını araştırmak ve

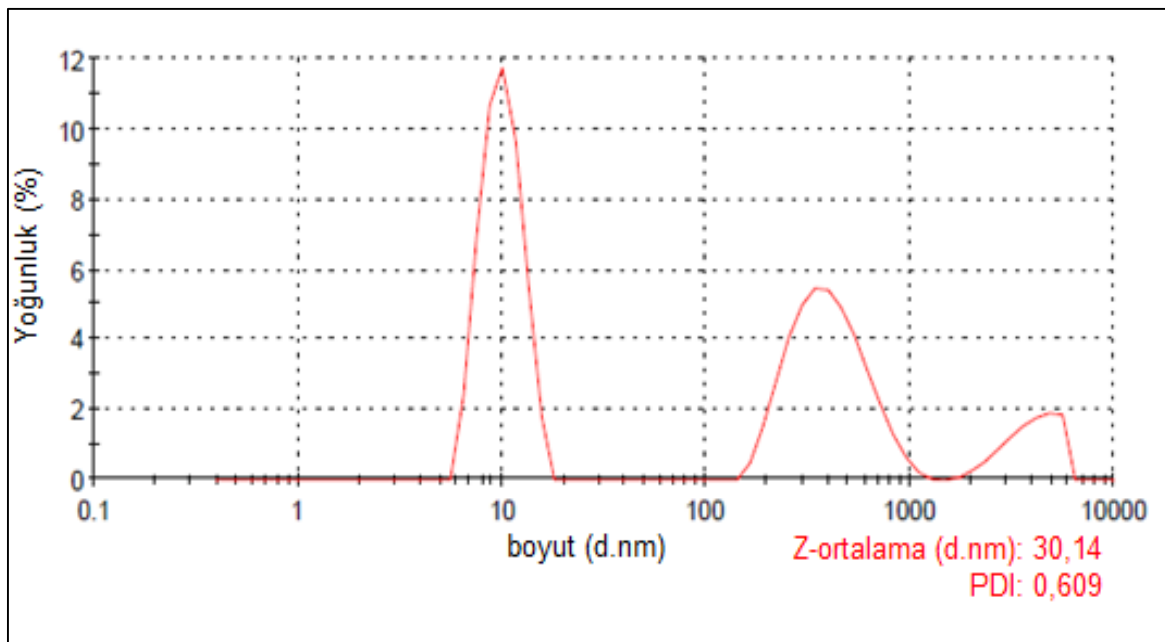
nanoakışkanın kararlılığını-homojenliğini korumak amacıyla ışık ve parçacıklar arasındaki etkileşimlere dayalı olarak çalışan, tahribatsız bir fiziksel yöntem olan dinamik ışık saçılımı (DLS) yöntemi kullanılmıştır. Ultrasonik banyo işleminden sonra elde edilen nanoakışkanlar DLS yöntemiyle test edilmiştir. DLS sonuçları, Z-ortalama boyutu (d.nm) ve genişlik parametresi (polidispersite indeksi: PDI) cinsinden gösterilmektedir [113]. PDI, kütle ağırlıklı ortalama parçacık çapının, sayı ağırlıklı ortalama parçacık çapına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Analiz sonucu elde edilen grafiğe göre, daha büyük boyutlu parçacıklar daha yoğun kırınım göstermektedir. TiO_2 /su tekli ve CuO-TiO_2 hibrit nanoakışkanlar için sırasıyla Şekil 5.11 ve Şekil 12’de gösterilen yoğunluğa göre boyut dağılımı, oda sıcaklığında Malvern Zetasizer Nano ZSP cihazı kullanılarak her iki akışkan için de elde edilmiştir. Buna göre, gösterilen spektrum logaritmik ölçekte 0,1 ila 10 000 nm arasındadır. Genel eğilimin gösterilen tüm yapılan için aynı olduğu görülebilmektedir. ISO yönergelerine [114] göre, eşit dağılımı sağlamak için 0,7’den küçük bir PDI değeri tercih edilmelidir. 0,7’den büyük PDI değerleri, nanoparçacıkların geniş ve kararsız bir dağılıma sahip olduğunu ifade etmektedir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’deki PDI değerleri 0,1 ile 0,7 arasında olup, tez çalışması kapsamında hazırlanan nanoakışkanların partikül dağılımının düzgün ve uygun olduğu söylenebilmektedir. TiO_2 tekli ve CuO-TiO_2 hibrit partiküllerin en yüksek ortalama çapı sırasıyla yaklaşık 13 nm ve 30 nm’dir. Analiz sonuçlarına göre, her iki nanoakışkanda da aglomerasyon olayı meydana gelmemiştir. Bulgular ayrıca CuO ve TiO_2 nanoparçacıklarının eşit olarak dağıldığını ve düzgün katmanlı bir CuO-TiO_2 hibrit nanoakışkan elde edildiğini göstermiştir.

Akışkanların katı bir yüzeye teması ile oluşturduğu açıya temas açısı denmektedir. Temas açısı yüzey enerjisine bağlı olup, yüzeyin ıslanma derecesini karakterize etmektedir. Bu açı, temas edilen katı yüzey ve temas sıvısına bağlı olarak değişmektedir. 0° ’lik bir temas açısı mükemmel bir ıslanma durumunu, 180° ise tamamen ıslanmama durumunu temsil etmektedir. Genelde temas açısı 90° ’den az ise sıvı katı yüzeyi ıslatmakta, sıvı hidrofilik hale gelmektedir. Temas açısı 90° ’den büyük ise katı yüzey sıvı tarafından ıslanmaz ve yüzeyin hidrofobik olduğu söylenebilir [115]. Yüzey aktifleştirici sıvı kullanımı, yüzeydeki katı-sıvı yüzey gerilimini ve temas açısını azaltmaya yardımcı olmaktadır. Aynı damlacık hacmi kullanılarak, saf su ve hazırlanan nanoakışkanlar için temas açısı ölçümleri, oda sıcaklığında Krüss DSA100 gonyometre kullanılarak yapılmıştır. Krüss DSA100 gonyometre ve Malvern Zetasizer cihazına ait görseller Resim 5.9’da sunulmuştur. Saf suyun temas açısı 58° olarak ölçülmüştür. Temas açısı TiO_2 /su

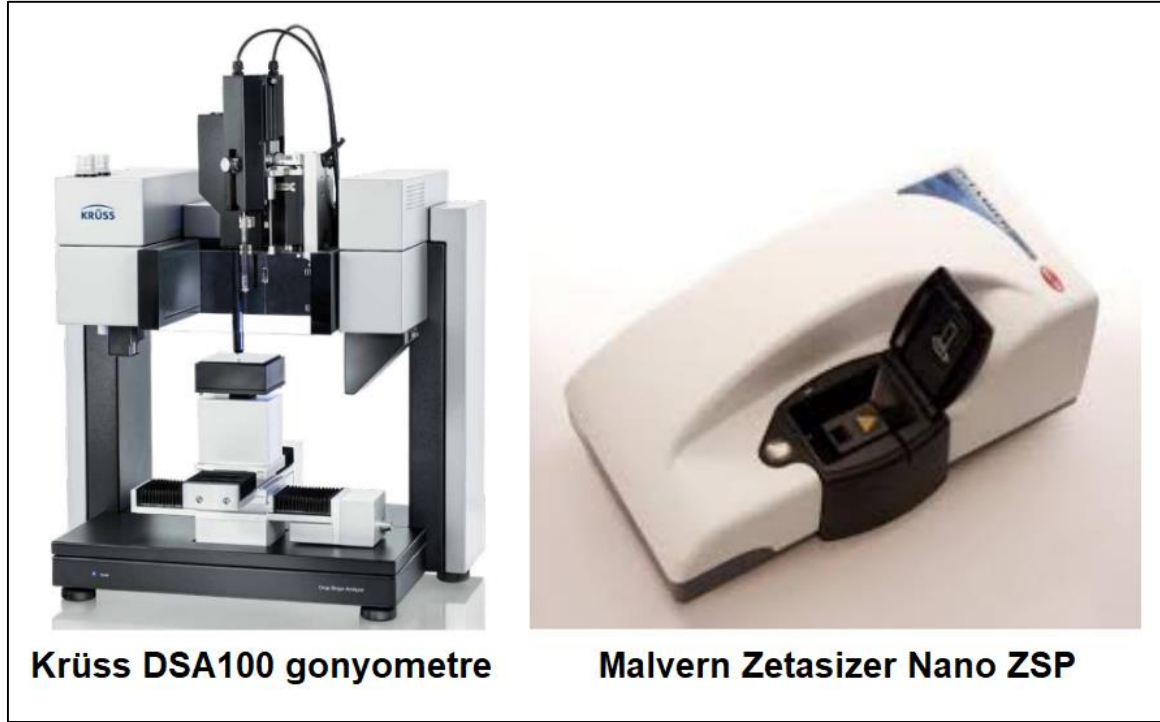
nanoakışkan için 38° , CuO-TiO₂/su hibrit nanoakışkan için 42° olarak ölçülmüştür. Kullanılan temas açlarına ait görsel Resim 5.10'da verilmiştir. Temas açısı 90° 'den az olduğu için tüm numunelerin katı-sıvı temas açılarının hidrofilik olduğunu göstermektedir. Bu, sıvının yüzeye daha iyi yayılmasını sağlayarak yüzeyin ıslanma durumunu arttırmaktadır.



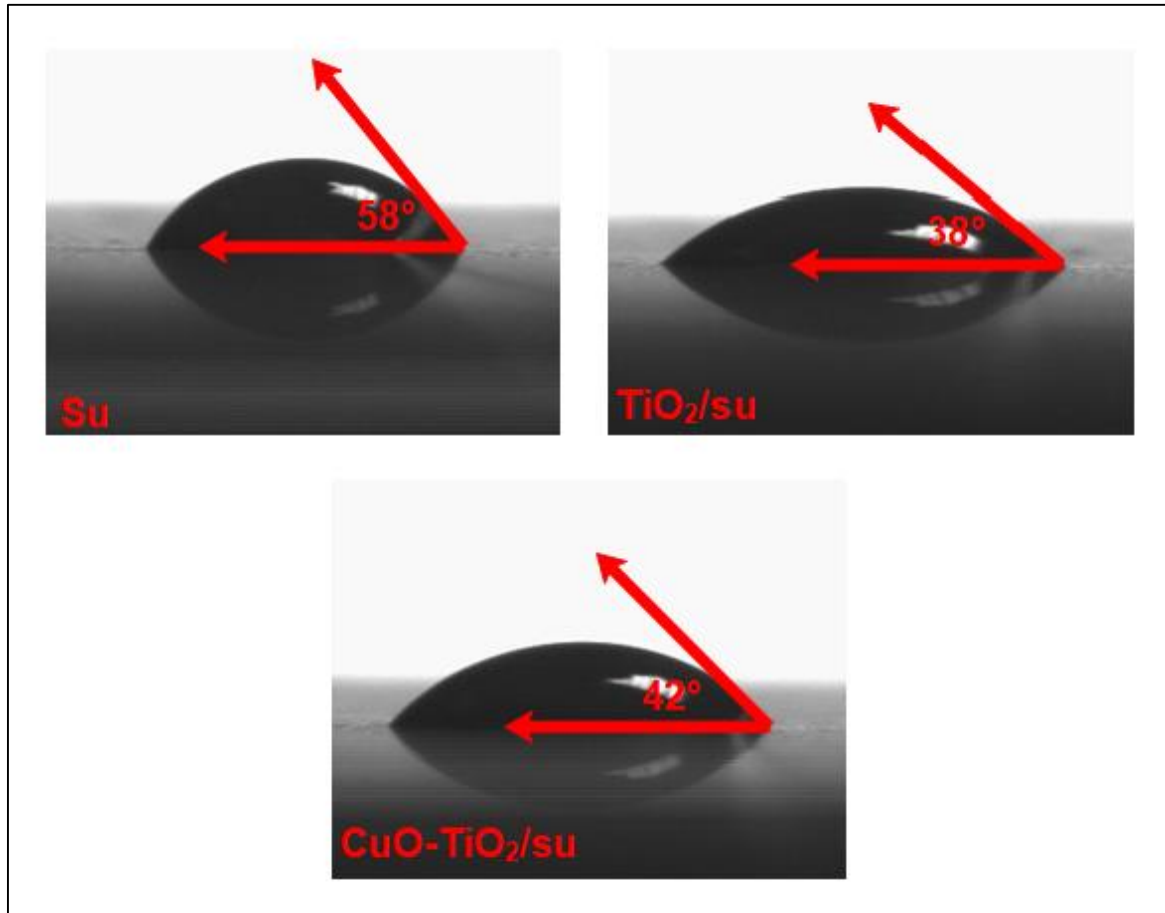
Şekil 5.11. TiO₂/su nanoakışkanına ait DLS partikül boyutu analizi



Şekil 5.12. CuO-TiO₂/su nanoakışkanına ait DLS partikül boyutu analizi



Resim 5.9. Krüss DSA100 gonyometre ve Malvern Zetasizer Nano ZSP



Resim 5.10. Kullanılan çalışma akışkanlarının temas açıları

5.2.4. Deneysel prosedür

Tasarlanan, sayısal olarak analiz edilen, imalatı yapılan ve deneysel olarak test edilen helisel borulu ısı değıştiricileri 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C ve 65 °C'lik beş farklı sıcak taraf giriş sıcaklığı değeriinde test edilmiştir. Ek olarak, deneyler üç farklı soğuk taraf debisinde yapılmıştır. Soğuk taraf debi değeri Re=630, Re=800 ve Re=1 100 değeriine tekabül etmektedir. Bunun yanında üç farklı sıcak taraf debisinde de deneyler yapılmış olup bu değeri Re=6 600, Re=11 000 ve Re=16 000 değeriine tekabül etmektedir. Deneylerde soğuk taraf akışkanı olarak şebeke suyu kullanılmış olup, sıcak tarafta saf su, TiO₂/su tekli nanoakışkan ve CuO-TiO₂/su hibrit nanoakışkan olmak üzere üç tip akışkan kullanılmıştır. Deneylerin güvenilirliğinin sağlanması adına her bir deney üç tekrürde gerçekleştirilmiştir.

6. TEORİK HESAPLAMALAR

Tez çalışması kapsamında geliştirilen ve test edilen helisel borulu ısı değiştiricilerin etkinlik katsayısı ve ısı transfer katsayısı gibi performans parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler, belirsizlik analizi ve belirsizlik analizi sonuçları bu kısımda verilmiştir.

6.1. Performans Parametrelerinin Teorik Analizi

Helisel borulu ısı değiştiricilerde sıcak akışkan tarafından atılan ısı Eş 5.7 yardımıyla hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (6.1)$$

Helisel borulu ısı değiştiricideki soğuk akışkan tarafından alınan ısı değeri Eş 5.8 kullanılarak bulunabilir:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot (T_{c,o} - T_{h,i}) \quad (6.2)$$

Yukarıdaki hesaplamalarda, akışkanların özgül ısı kapasitesilerinin ortalama değerlerinin kullanıldığı belirtilmelidir.

Helisel borulu ısı değiştiricilerde, sıcak ve soğuk taraflar arasındaki ısı transferinde belli miktarda bir kayıp olacağı bilinmektedir. Önceki kısımlarda belirtildiği gibi, ısı kayıpları azaltmak için ısı değiştiricilere ısı yalıtımı uygulanmıştır. Bu nedenle, ifadelerin basitleştirilmesi amacıyla Eş 5.9'da da görülebileceği gibi iki bölge arasındaki kayıplar ihmal edilmiştir.

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c \quad (6.3)$$

Tüm ısı sistemlerinde olduğu gibi, etkinlik katsayısı ifadesi helisel borulu ısı değiştiricilerin performanslarının analiz edilmesinde kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Etkinlik katsayısı ifadesi, sistemin belirli koşullar altında gösterdiği ısı performansın, ideal ısı

performansa oranı olarak tanımlanmaktadır [21]. Etkinlik katsayısı değeri teorik olarak 0 ile 1 değerleri arasında değişmektedir. Etkinlik katsayısı ifadesi aşağıdaki gibidir [116]:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{C_{hf}(T_{h,i}-T_{h,o})}{C_{min}(T_{h,i}-T_{c,i})} = \frac{C_{cf}(T_{c,o}-T_{c,i})}{C_{min}(T_{h,i}-T_{c,i})} \quad (6.4)$$

Etkinlik katsayısının hesaplanmasında ısıl kapasite değerleri hesaplanmalıdır. Sıcak akışkan için ısıl kapasite değeri Eş 5.11 yardımıyla bulunabilir:

$$C_{hf} = \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \quad (6.5)$$

Soğuk akışkanın ısıl kapasite değeri aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanabilir:

$$C_{cf} = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \quad (6.6)$$

Helisel borulu ısı değiştiricilerinin incelenmesinde kullanılan bir diğer ölçüt toplam ısı transfer katsayısıdır. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı, toplam ısı transfer katsayısının hesaplanması için gerekli olan bir değişkendir. Isı değiştiricilerin her kesitinde sıcaklık farkı değişkenlik gösterdiğinden, sıcak ve soğuk akışkanların ısı değiştiriciye giriş ve sıcaklıkları olarak tanımlanabilmesi logaritmik sıcaklık farkı ile yapılmaktadır. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı ifadeleri Eş 5.13'te sunulmuştur:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_o}{\ln\left(\frac{\Delta T_i}{\Delta T_o}\right)} \quad (6.7)$$

Toplam ısı transfer katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir [116]:

$$OHTC = \frac{\dot{Q}}{A(\Delta T_{LMTD})} \quad (6.8)$$

Helisel borulu ısı değiştiricinin helisel boru tarafındaki akış rejimini belirlemek için Reynolds sayısı hesaplanmalıdır. Reynolds sayısının genel eşitliği Eş 5.15'teki gibidir:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (6.9)$$

Helisel borulu ısı değıştiricinin gövde (soğuk) tarafı için Reynolds sayısı Eş 5.16 yardımıyla bulunabilir:

$$Re_{sh} = \frac{4 \dot{m}_{sh}}{\pi D_{h,sh} \mu} \quad (6.10)$$

Isı değıştiricinin helisel boru (sıcak) tarafı için Reynolds sayısı aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanabilir:

$$Re_{co} = \frac{4 \dot{m}_{co}}{\pi D_{h,co} \mu} \quad (6.11)$$

Helisel borudaki kritik Reynolds sayısı değeri Eş 5.18 ile ifade edilebilir [43, 117]:

$$Re_{co,cr} = 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{d_{in}}{D_{co}} \right)^{1/2} \right] \quad (6.12)$$

Dean sayısı helisel borudaki akışın analiz edilmesi için kullanılan diğer bir boyutsuz sayıdır. Dean sayısı Eş 5.19 ile ifade edilebilir [118]:

$$De = Re_{co} \left(\frac{d_{in}}{D_{co}} \right)^{0.5} \quad (6.13)$$

Nusselt sayısı, ısı analizlerde kullanılan önemli bir diğer boyutsuz sayıdır. Gövde tarafı için Nusselt sayısı ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$Nu_{sh} = \frac{h_{sh} D_{h,sh}}{k} \quad (6.14)$$

Helisel borulu ısı değıştiricinin sıcak tarafı (helisel boru) için Nusselt sayısı Eş 5.21 yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$Nu_{co} = \frac{h_{in} d_{in}}{k} \quad (6.15)$$

Helisel boru ya da gövde tarafındaki Nusselt sayısının bulunabilmesi için hidrolik çap ifadesinin doğru olarak hesaplanmalıdır. Eş 5.22’de gövde tarafı için hidrolik çap ifadesi verilmiştir:

$$D_{h,sh} = \frac{4 \times \text{gövde tarafı hacmi}}{\text{Sıvı ile temas alanı}} \quad (6.16)$$

6.2. Belirsizlik Analizi

Belirsizlik, bir değişkenin ölçümüyle elde edilecek gerçek değeri de içerisine alan değerler aralığını tanımlamakta ve tahmini bir değer olarak açıklanabilmektedir. Belirsizlik analizi, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların hassasiyeti hakkında yöntemsel bir yaklaşım sunmaktadır. Belirsizlik analizi ile olası hatalar için bir aralık belirlenmektedir. Diğer bir ifade ile yapılan deneysel ölçümlerin güvenilirliğini sorgulama işlemidir. Bilindiği üzere, ölçme prosesi bilimsel bir çalışma olmakla birlikte, yapılan ölçüm işlemlerinin güvenilirliği deneysel belirsizlik analizi ile birlikte ifade edilebildiği kadar açıklanabilmektedir. Bu sebeple, ölçüme etki eden tüm faktörler belirlenmeli ölçüm belirsizliği tespit edilmelidir. Ölçümler sırasındaki belirsizlikler, cihaz seçimlerinden, cihazların kalibrasyonundan, deney koşullarından, ölçüm problemlerinin cinsinden, okuma hatalarından ve bağlantı noktalarından kaynaklı olabilir [21]. Toplam deneysel belirsizlik ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [119, 120]:

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.17)$$

Eş 5.23'teki R ifadesi bağımsız değişkenler olan $x_1, x_2, \dots, x_n$ cinsinden verilen bir fonksiyondur. Ek olarak W_R ifadesi toplam belirsizliği ifade etmektedir. Burada verilen $w_1, w_2, \dots, w_n$ de bağımsız değişkenlerdeki belirsizlikleri göstermektedir [121].

Deneysel belirsizlik ifadeleri, ısı transferi, toplam ısı transfer katsayısı, logaritmik ortalama sıcaklık farkı ve ısı transfer katsayısı için sırasıyla Eş 5.24, Eş 5.25, Eş 5.26 ve Eş 5.27'de sunulmuştur:

$$W_Q = \left[\left(\frac{\partial Q}{\partial Q_c} w_{Q_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial Q_h} w_{Q_h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.18)$$

$$W_{OHTC} = \left[\left(\frac{\partial OHTC}{\partial Q} w_Q \right)^2 + \left(\frac{\partial OHTC}{\partial \Delta T_{LMTD}} w_{\Delta T_{LMTD}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.19)$$

$$W_{\Delta T_{LMTD}} = \left[\left(\frac{\partial \Delta T_{LMTD}}{\partial T_{c,i}} w_{T_{c,i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{LMTD}}{\partial T_{c,o}} w_{T_{c,o}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{LMTD}}{\partial T_{h,i}} w_{T_{h,i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{LMTD}}{\partial T_{h,o}} w_{T_{h,o}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.20)$$

$$W_{HTC_c} = \left[\left(\frac{\partial HTC_c}{\partial OHTC} w_{OHTC} \right)^2 + \left(\frac{\partial HTC_c}{\partial HTC_h} w_{HTC_h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.21)$$

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda yeni geliştirilen helisel borulu ısı değiştiricilerine ait sayısal ve deneysel analiz bulguları sunulmuştur. Ek olarak, elde edilen bulgular detaylı olarak tartışılmış ve literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

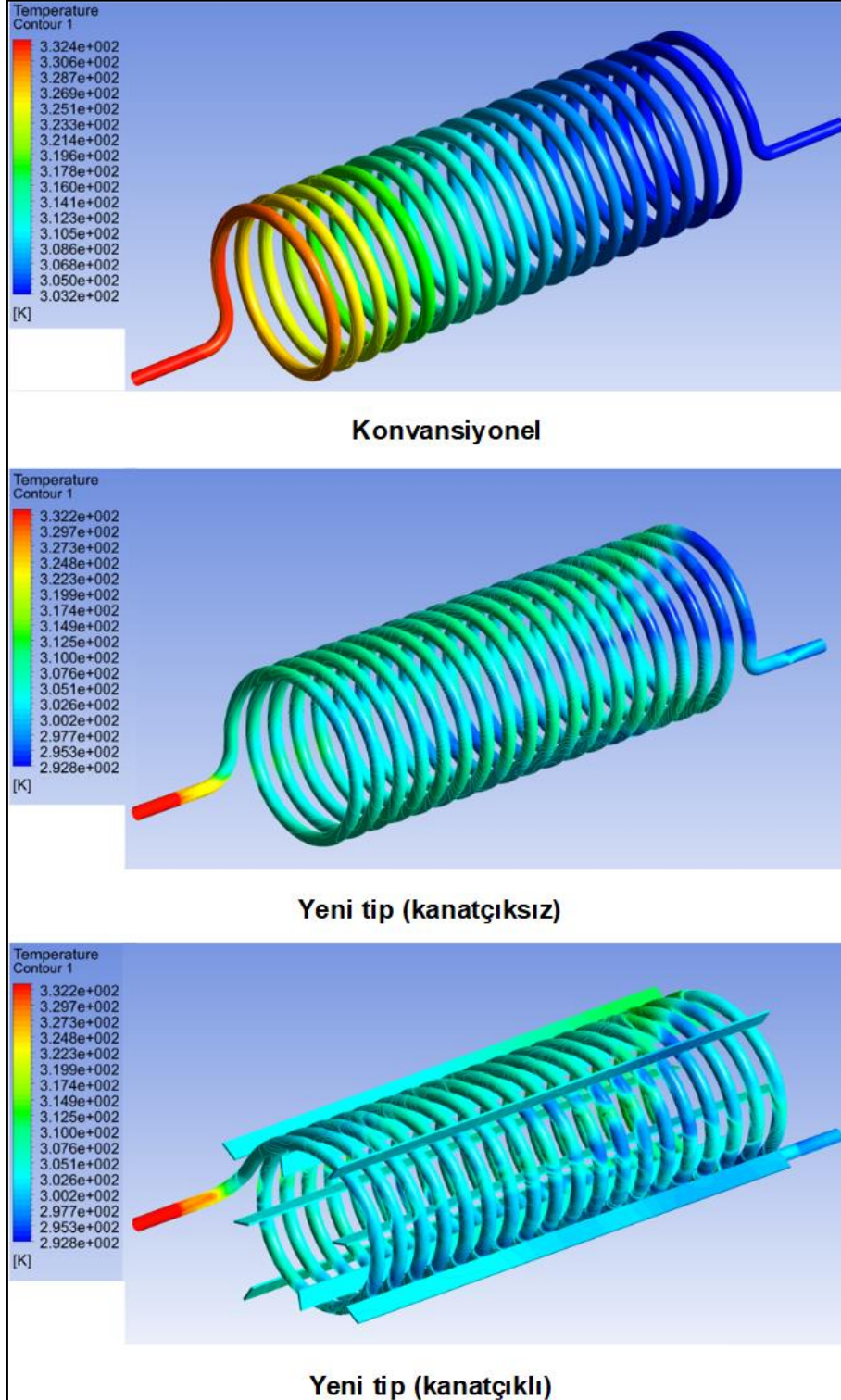
7.1. Sayısal Bulgular

Helisel borulu üç farklı ısı değiştiricinin sayısal analizi, en iyi ısı değiştirici geometrisinin tespit edilmesi amacıyla yapılmıştır. Bu bağlamda, incelenen tüm helisel borulu ısı değiştirici sistemlerin sıcak tarafında saf su kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanlar kullanılan yapılan performans analizleri ise deneysel çalışmanın kapsamındadır.

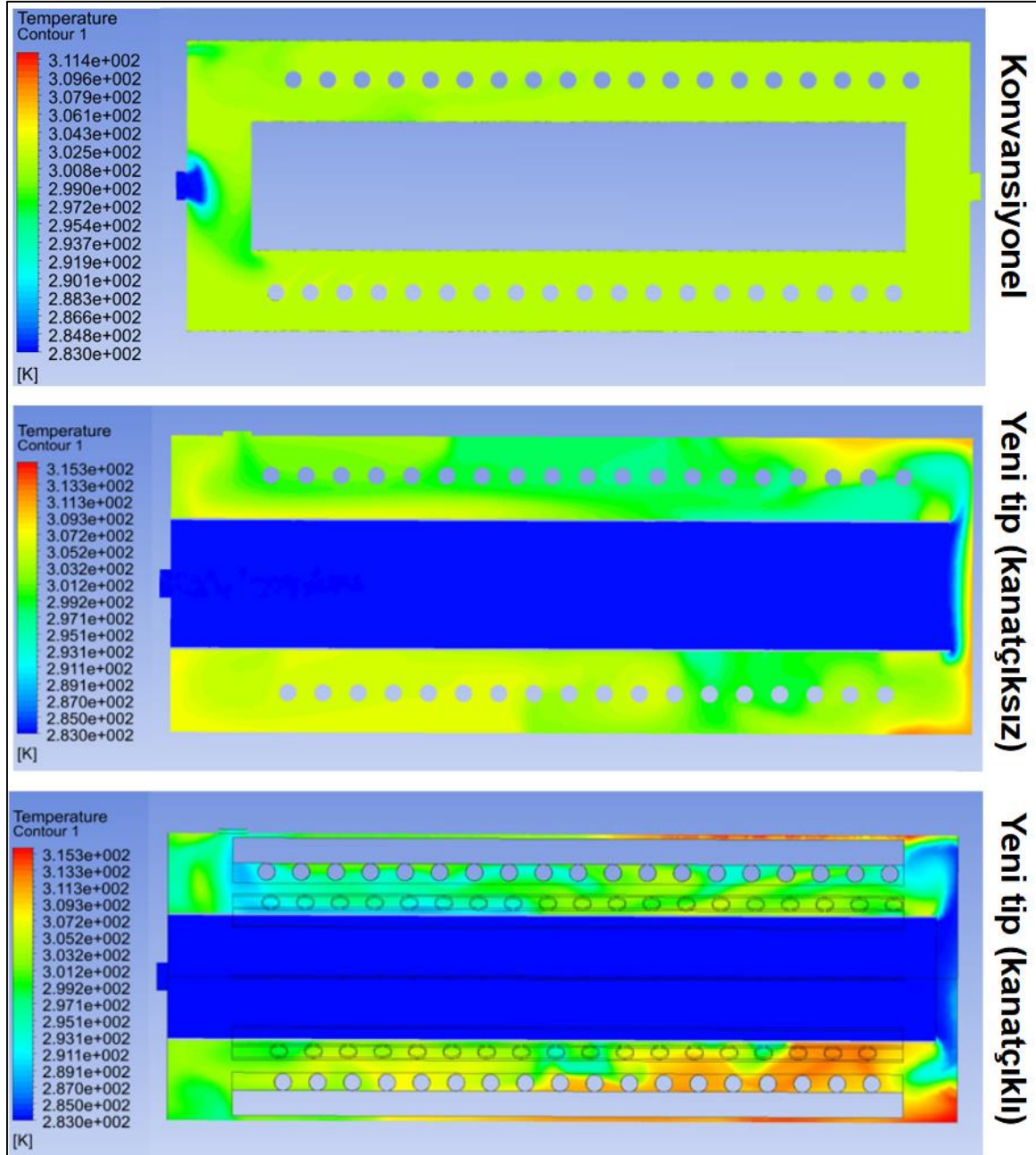
Daha önce de bahsedildiği üzere, geliştirilen yeni tip helisel borulu ısı değiştiricileri konvansiyonel helisel borulu ısı değiştirici ile sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 7.1’de üç farklı ısı değiştiriciye ait helisel borular üzerindeki sıcaklık dağılımı sunulmuştur. Şekilden de görüleceği üzere, geliştirilen yeni tip akış kanalına sahip ısı değiştiricilerin helisel borularındaki sıcaklık dağılımı konvansiyonel ısı değiştiricinin helisel borularına göre daha homojendir. Başka bir deyişle, yeni tip ısı değiştiricilerde helisel borunun farklı bölgeleri üzerindeki sıcaklıklar benzerdir. Burada, sisteme yeni olarak ilave edilen iç borunun etkisi açık biçimde görülebilir. Yeni geliştirilen akış kanalına sahip ısı değiştiricisine kanatçıkların eklenmesi ise ısı transferi yüzey alanını ve türbülans yoğunluğunu arttırarak ısı transferini iyileştirmiştir.

Şekil 7.2’de konvansiyonel ve yeni tip ısı değiştiricileri için yan görünümünden gövde tarafındaki sıcaklık dağılımı göstermektedir. Şekil 7.2. soğuk suyun ısı değiştiricilere nasıl girdiğini, ısındığını ve sistemden nasıl ayrıldığını göstermektedir. Açıkça görüldüğü gibi, modifiye edilmiş ısı değiştiricilerde soğuk su, konvansiyonel olana göre daha fazla enerji kazanmıştır. Modifiye edilmiş ısı değiştiricilerde soğuk su ile daha fazla enerji elde edilmesinin temel nedeni, yeni bir tasarım kullanılarak akış dağılımının düzenlenmesidir. Bunun yanında, helisel boru üzerine uzunlamasına kanatçıkların entegre edilmesinin, şekilde açıkça görülemeyen, soğuk suyun ortalama çıkış sıcaklığını iyileştirdiği belirtilmelidir. Helisel boru üzerine kanatçıkların entegre edilmesi, ısı transfer alanının

artmasını ve gövde tarafında daha homojen bir akış elde edilmesini sağlamıştır. Ancak bazı bölgelerde kanatçıklı ısı değiştiricide istenilen akışkan akışı elde edilememiştir. Bu da bazı sıcak bölgelerin oluşmasına neden olmuştur. Bunun nedeni ise kanatçıklara yakın bazı bölgelerde görülen homojen olmayan akıştır.



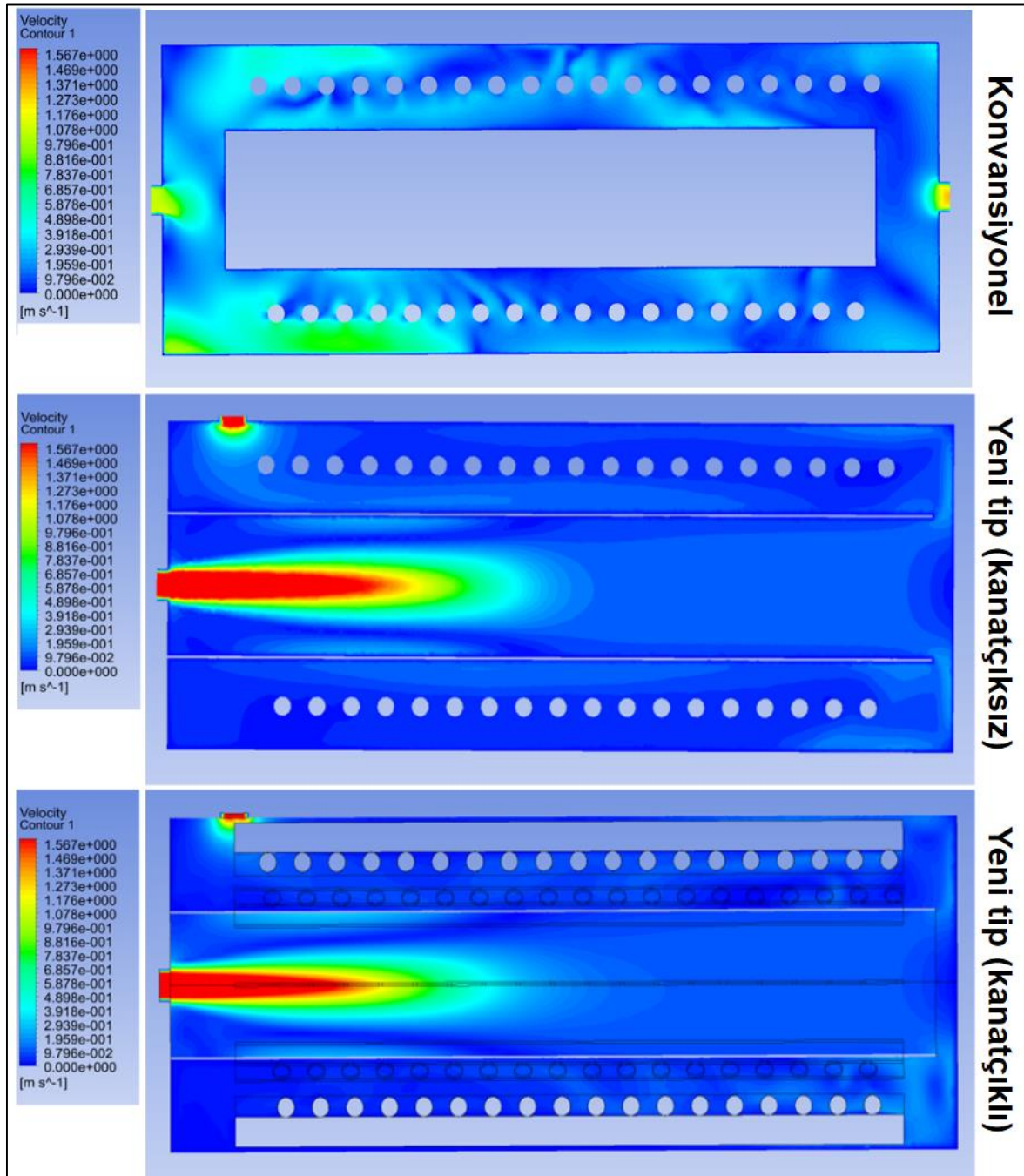
Şekil 7.1. Helisel borular üzerindeki sıcaklık dağılımları



Şekil 7.2. Soğuk tarafa (gövde) ait sıcaklık dağılımları

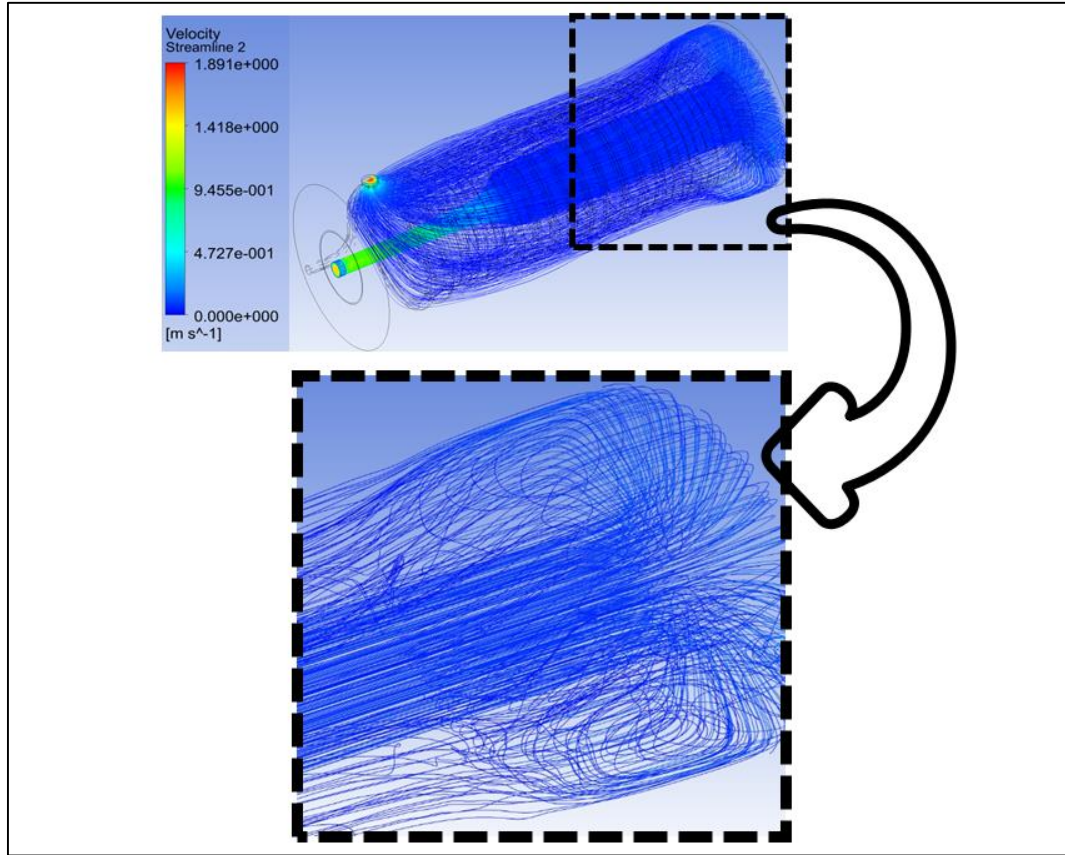
Şekil 7.3'te helisel borulu ısı değiştiricilerin yan görünümünden gövde tarafındaki hız dağılımı verilmiştir. Modifiye edilmiş ısı değiştiricilerin gövde tarafında helisel boruya yakın bölgelerdeki suyun hızı, diğer bölgelere göre nispeten düşüktür ve bu da ısı değiştiricilerdeki artan ısı transferi oranının ana nedenidir. Yeni tip akış kanalına sahip ısı değiştiricilerde, gövde tarafındaki akışkan sisteme entegre edilen iç borudan giriş yapmaktadır. Şekil 7.3'ten açıkça görülebileceği gibi, soğuk akışkan yeni tip sistemlerin gövde tarafına entegre içi boş bir boru boyunca ısı değiştiricilere girmektedir. Bu ilave içi boş borunun kullanılması, konvansiyonel tipe kıyasla daha homojen bir akış dağılımı elde

edilmesini sağlamıştır. Bu da modifiye edilmiş tip ısı değıştircilerde ısı transferinin iyileşmesini sağlamıştır. Bu modifikasyonun kullanılması, gövde tarafındaki sıvı akışını düzenlemiş ve ısı değıştiricinin termal verimliliğini iyileştirmiştir. Bunun yanında yeni tip ısı değıştiriciye kanatçık eklenmesi hız dağılımını da önemli ölçüde etkilemiştir. Helisel boruya kanatçıkların entegre edilmesi, türbülans yoğunluğunun artmasına neden olmuştur. Ek olarak yapılan bu modifikasyonla helisel boruya yakın bölgelerdeki akışkan hızı iyileştirilmiştir.

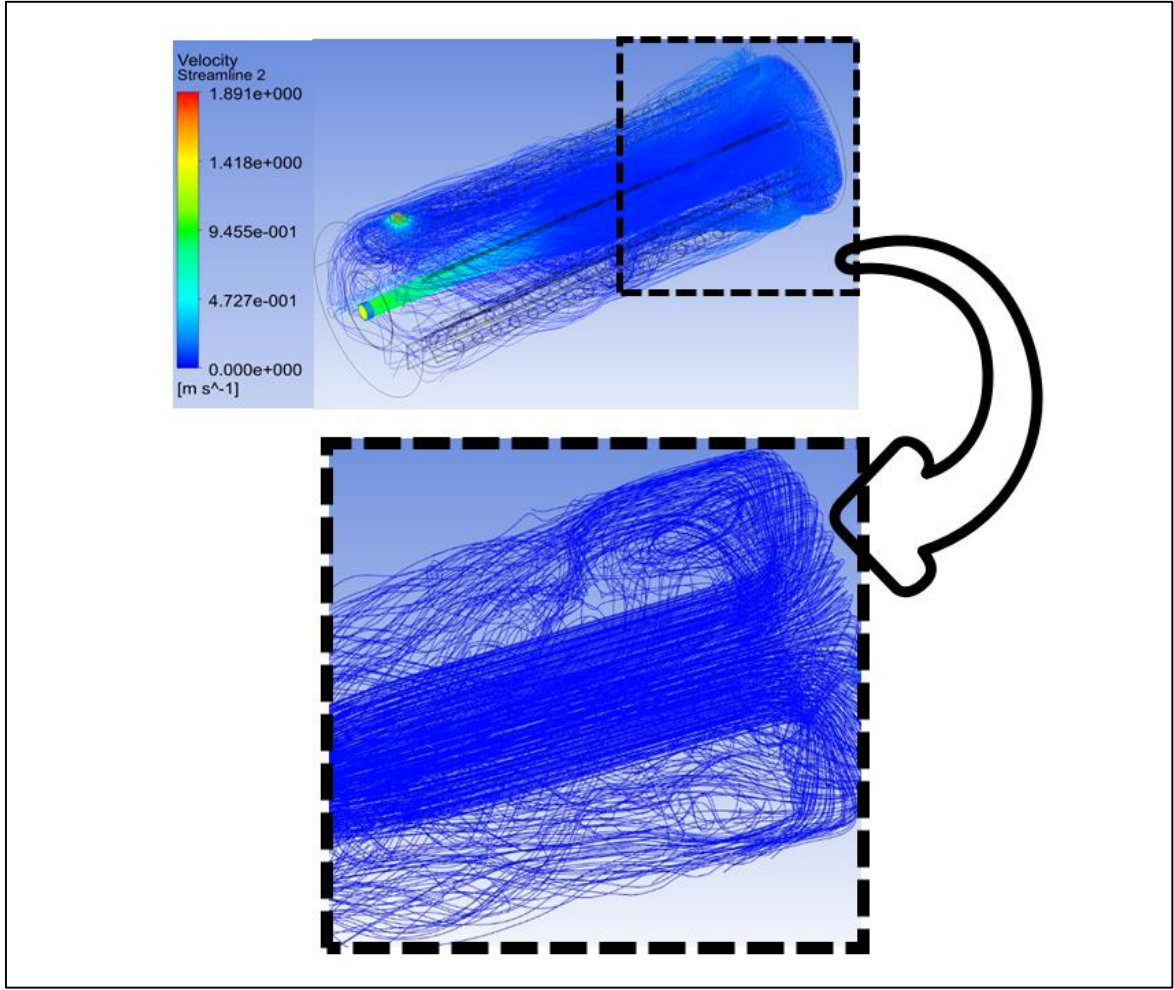


Şekil 7.3. Soğuk devredeki (gövde) hız dağılımları

Analiz edilen ısı değıştirciler içerisindeki akış çizgilerinin sunulması, ısı değıştircilerindeki akış özelliklerini değerlendirmek için oldukça faydalıdır. Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te sırasıyla geliştirilen kanatçiksız ve kanatçıklı ısı değıştircilerin gövde tarafındaki akış çizgileri gösterilmektedir. Ek olarak şekillerin alt kısımlarında ise akış çizgilerinin büyütölmüş görünümleri sunulmuştur. Yakınlaştırılmış görsellerden helisel boruya kanatçıkların eklenmesinin etkisi daha net biçimde görölebilir. Şekil 7.5'ten göröleceğı üzere, eklenen kanatçıklar gövde tarafındaki türbölansı geliştirmiştir. Türbölanslı akış oluşturulması, ısı transferini arttırmakta ve ısı değıştircinin ısıl performansını iyileştirmektedir. Ek olarak, yeni tip ısı değıştircilerin kanatçık içermeyen versiyonunda ısı transferini azaltabilecek bazı ölü bölgeler mevcuttur. Kanatçık eklenmiş ısı değıştircide daha az ölü bölge bulunmakla birlikte, akışkanın gövde tarafının tüm bölgeleri üzerinden aktığı söylenebilir. Bu durum, kanatçık içeren ısı değıştircinin kanatsız olana göre daha yüksek performans göstermesinin başka bir nedeni olarak gösterilebilir.

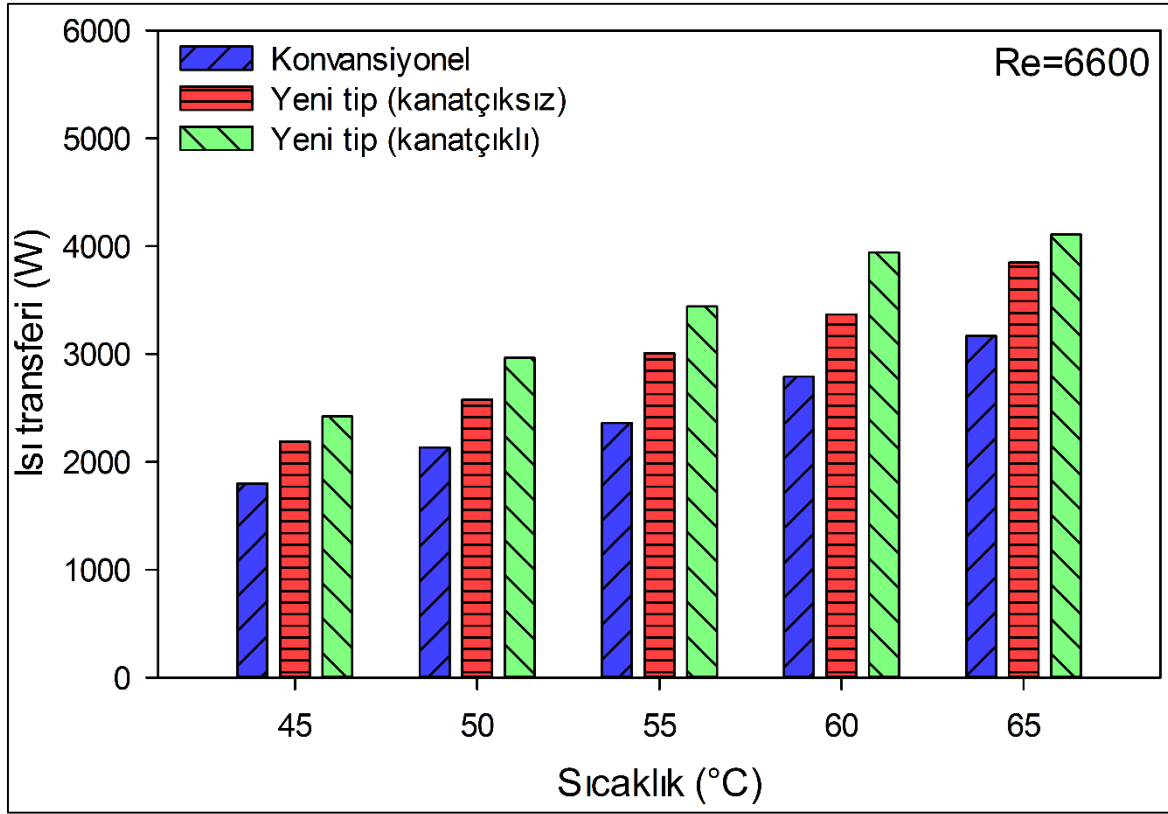


Şekil 7.4. Yeni tip kanatçiksız ısı değıştirciye ait akış çizgileri

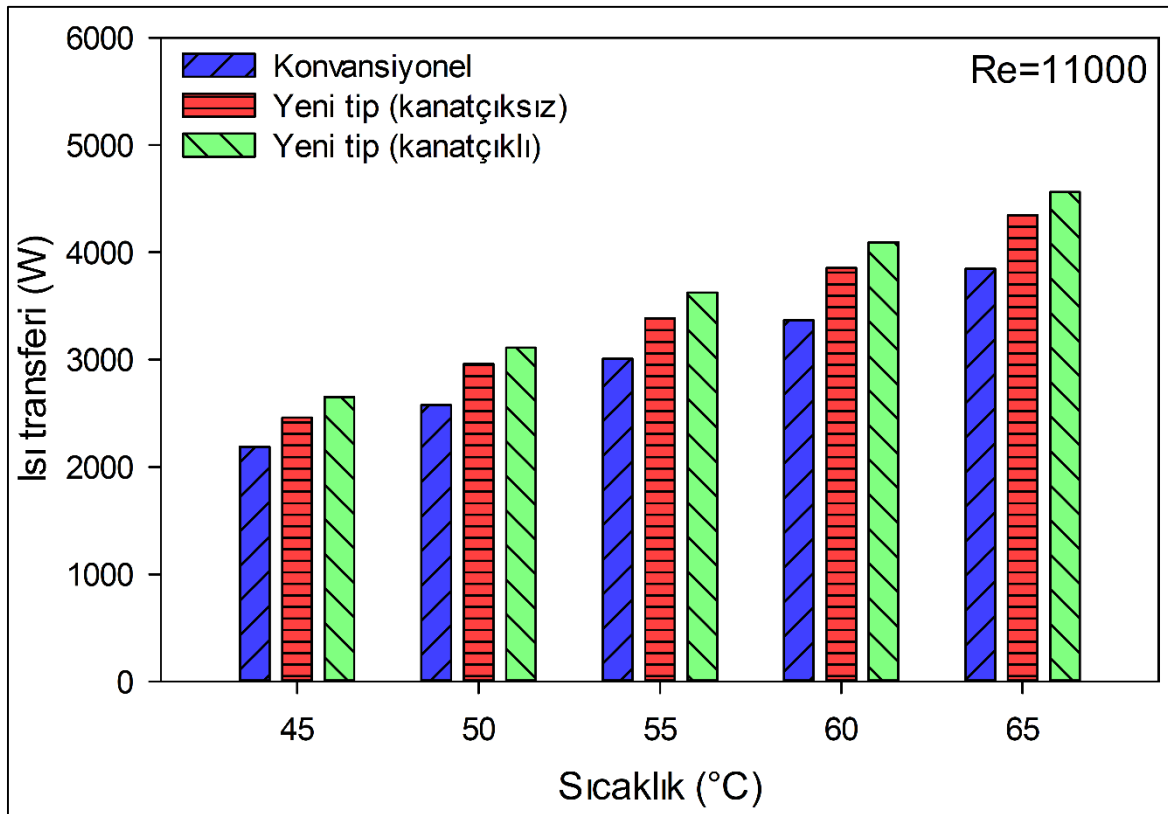


Şekil 7.5. Yeni tip kanatçıklı ısı değıştirciye ait akış çizgileri

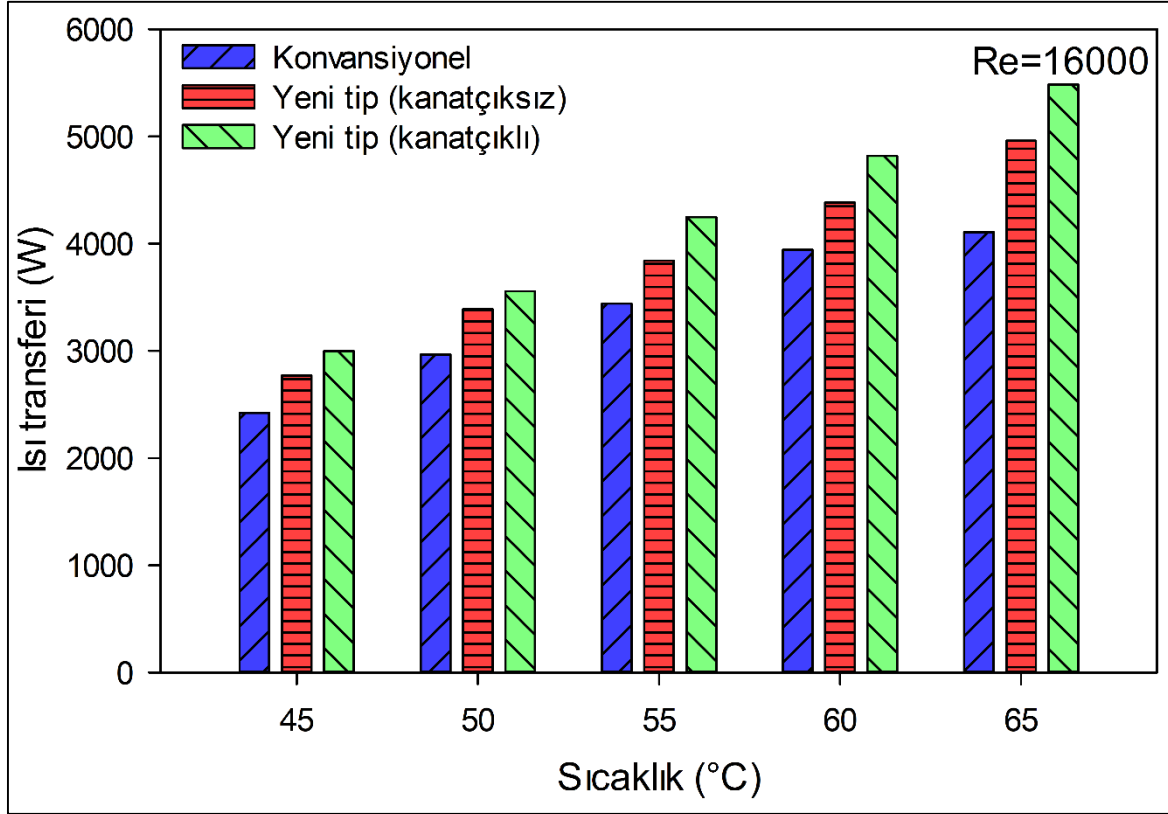
Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de sırasıyla $Re=6\ 600$, $Re=11\ 000$ ve $Re=16\ 000$ için sayısal olarak incelenen helisel borulu ısı değıştircilerin sıcak taraf giriş sıcaklığına bağı ısı transferi değeri sunulmuştur. Verilen şekillerden görülebileceğı üzere, tüm sıcaklık ve Reynolds sayısı değeriinde yeni tip kanatçıklı helisel borulu değıştirciye ait ısı transferi bulguları diğeri iki sistemden daha yüksektir. Sayısal analizler sonucu hesaplanan ortalama ısı transferi değeri konvansiyonel, yeni tip kanatçiksız ve yeni tip kanatçıklı helisel borulu ısı değıştirciler için sırasıyla 1 798-4 109 W, 2 040-4 962 W ve 2 179-5485 W aralığındadır.



Şekil 7.6. Re=6 600 için sayısal olarak elde edilen ısı transferi değerleri



Şekil 7.7. Re=11 000 için sayısal olarak elde edilen ısı transferi değerleri



Şekil 7.8. $Re=16\ 000$ için sayısal olarak elde edilen ısı transferi değerleri

7.2. Deneysel Bulgular

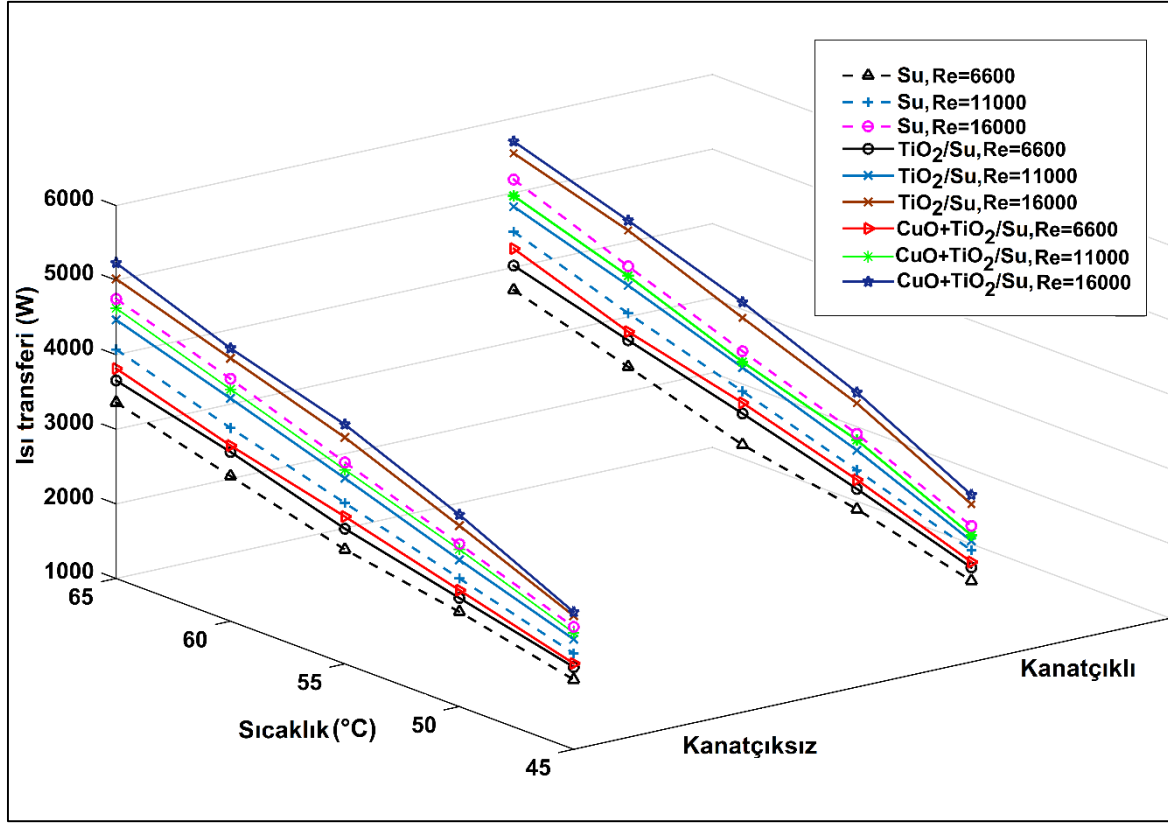
Tez çalışmasının bu kısmında, imal edilen iki yeni tip helisel borulu ısı değiştiricisinin su, TiO_2/su ve $CuO-TiO_2/su$ akışkanları ile yapılan testlerine ait sonuçlar sunulmuş ve detaylı olarak tartışılmıştır. Helisel borulu ısı değiştiriciler 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C ve 65 °C'lik beş farklı sıcak taraf giriş sıcaklığında denenmiş ve diğer sıcaklık değerleri sistem kararlı haldeyken kaydedilmiştir. Deneyler 1,5-3,5 litre/dakika aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu değerler, literatürde helisel borulu ısı değiştiricilerin incelendiği benzer çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir [66,67-69].

7.2.1. Deneysel ısı transferi bulguları

Şekil 7.9'da test edilen iki yeni tip ısı değiştiricinin farklı çalışma akışkanları, sıcak taraf giriş sıcaklıkları ve sıcak taraf Reynolds sayısı değerlerine göre ısı transferinin değişimi sunulmuştur. Şekil 7.9'dan da açık biçimde görüleceği üzere, tüm Reynolds sayılarında gerçekleştirilen testlerde helisel borulu ısı değiştiricilerde transfer edilen ısı, sıcak taraf giriş sıcaklığının artması ile artış göstermiştir. Ek olarak, helisel borulu ısı değiştiriciye

kanatçık eklenmesinin olumlu etkileri de bu şekildeki aynı Reynolds sayılarında ve sıcaklıklarda gerçekleştirilen test sonuçlarından açık biçimde görülebilir. Sıcak tarafta TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ nanoakışkanlarının kullanılması her iki helisel borulu ısı değiştiricinin de ısı transferi miktarını arttırmıştır. Kullanılan nanopartiküllerin yüksek ısıl iletkenlik değerleri, nanoakışkanların da ısı iletim katsayısını yükseltmiş ve transfer edilen ısı miktarını iyileştirmiştir. Genel olarak, Reynolds sayısının yükseltilmesi ile ısı transferinde kazanılan artışın arttırıldığı gözlenmiştir. Başka bir ifade ile, yüksek Reynolds sayılarında TiO_2/su tekli ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkanlarının kullanımının etkisinin, düşük Reynolds sayılarına kıyasla yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Reynolds sayısı arttırıldığında, türbülans yoğunluğu yükselmekte ve bu durum ısı transfer oranında daha fazla iyileşme elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasının sonuçları, yüksek Reynolds sayılarına sahip nanoakışkanların kullanılmasının, düşük Reynolds sayılarına kıyasla daha fazla ısıl iyileştirme sağlayabileceğini göstermiştir. Ayrıca, $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkan kullanımı, helisel borulu ısı değiştiricilerde tekli nanoakışkan kullanımına göre daha iyi bir ısıl performans göstermiştir. Helisel borulu ısı değiştiricilerinin ısı transferi değerleri için elde edilen deneysel sonuçlar, hibrit tip nanoakışkan kullanımının, hibrit tip çalışma akışkanının yüksek ısıl iletkenliğinden kaynaklanan daha iyi ısı transferi sağlayabileceğini göstermiştir. TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ nanoakışkanlarının kanatçıksız ısı değiştiricide kullanılması, ısı transferinde sırasıyla %9 ve %13 oranında ortalama iyileşme sağlamıştır. Kanatçıklı ısı değiştiricide TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ nanoakışkanlarının kullanılması ısı transferini sırasıyla %9,6 ve %13,8 oranında arttırmıştır. Afshari vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ hibrit ve TiO_2/su tekli nanoakışkanları farklı plaka sayısına sahip lehimli plakalı ısı değiştiricilerde test edilmiştir [119]. 1 600-3 800 aralığındaki Reynolds sayılarında gerçekleştirilen deneysel çalışmada, nanoakışkanların kullanımıyla transfer edilen ısı ortalama %4-12,3 aralığında arttırılmıştır. Khanlari vd. (2019) tarafından yapılan deneysel çalışmada, plakalı bir ısı değiştiricide TiO_2/su tekli nanoakışkanı test edilmiştir [122]. Çalışmanın sonuçlarına göre, TiO_2/su nanoakışkanının kullanımı transfer edilen ısıyı ortalama %6,5 arttırmıştır. Srinivas ve Vinod (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmada, CuO/su nanoakışkanı farklı partikül konsantrasyonlarında helisel borulu bir ısı değiştiricide test edilmiş ve deneysel sonuçlara göre elde edilen ısı transferi 500-6 000 W aralığında bulunmuştur [85]. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre, CuO/su nanoakışkanının kullanımı ısı transferini maksimum %32,7 oranında arttırmıştır.

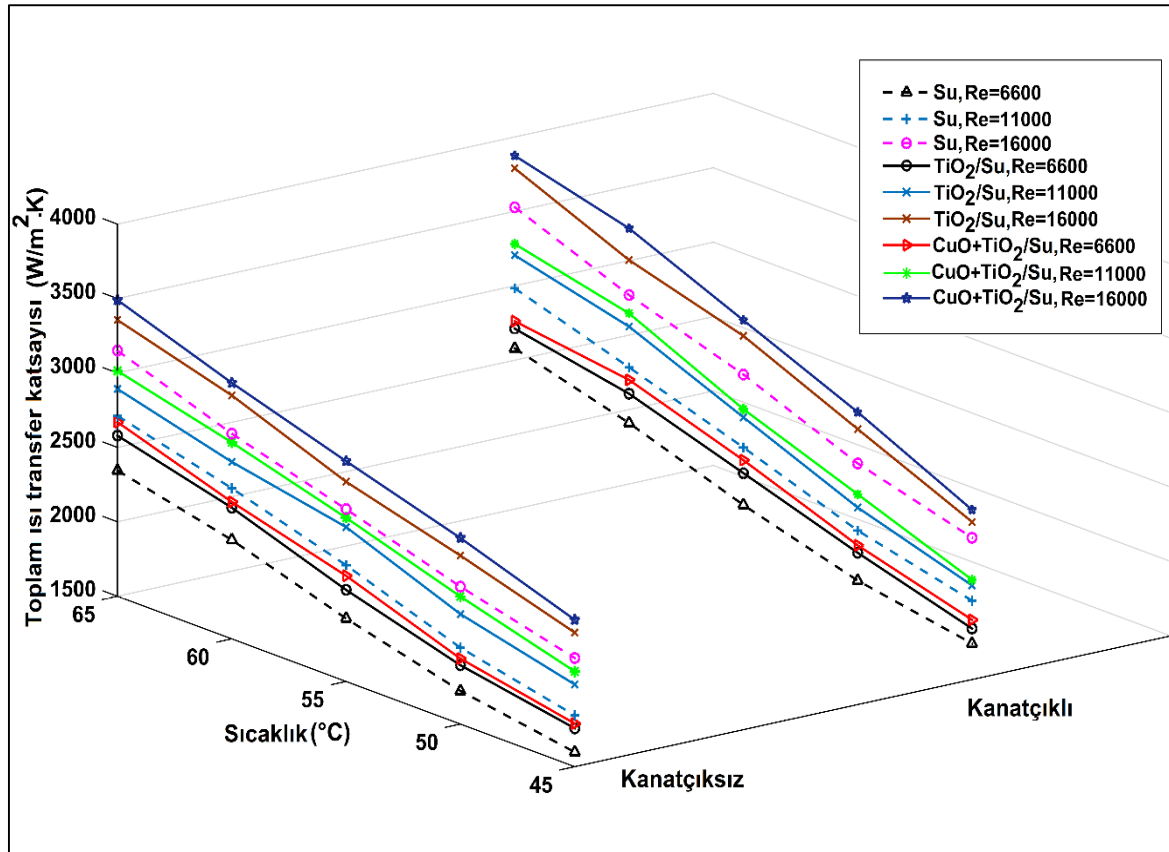


Şekil 7.9. Farklı parametrelere göre ısı transferi değerlerinin değişimi

7.2.2. Deneysel toplam ısı transfer katsayısı bulguları

Toplam ısı transfer katsayısı, helisel borulu ısı değiştiricilerin değerlendirilmesinde kullanılan diğer bir önemli parametredir. Şekil 7.10’da farklı Reynolds sayılarında ve farklı sıcaklıklarda test edilen yeni tip kanatçıklı ve kanatçıksız helisel borulu ısı değiştiricilere ait toplam ısı transfer katsayısı değerleri verilmiştir. Toplam ısı transfer katsayısı değerleri sıcak tarafta su, TiO_2/su tekli ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkanlarına ait sonuçlar içermektedir. Ek olarak sonuçlar, üç farklı Reynolds sayısı değeri ve beş farklı sıcaklık değerleri için sunulmuştur. Her iki ısı değiştiricide de nanoakışkan kullanımı, toplam ısı transfer katsayısını önemli ölçüde arttırmıştır. Kanatçıksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiricilerde TiO_2/su tekli nanoakışkan kullanımı, toplam ısı transfer katsayısını sırasıyla ortalama %7,5 ve %8,6 oranında arttırmıştır. Kanatçıksız ve kanatçıklı ısı değiştiricilerde $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkan kullanımı ise toplam ısı transfer katsayısı değerini sırasıyla ortalama %10,8 ve %12 oranında iyileştirmiştir. Ek olarak, TiO_2/su tekli nanoakışkan kullanımı kanatçıksız ve kanatçıklı sistemler için toplam ısı transfer katsayısını maksimum olarak %10,2 ve %11,5 oranında arttırmıştır. $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit

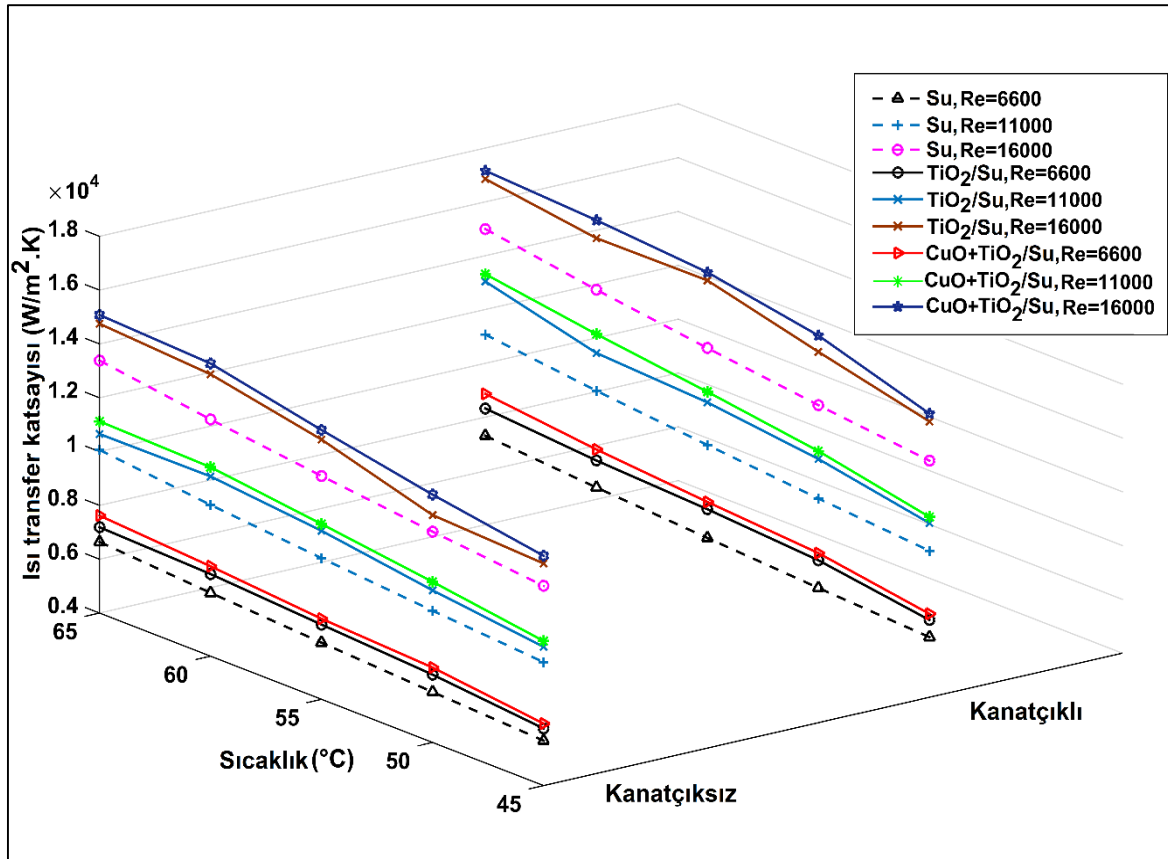
nanoakışkan kullanımı ile elde edilen maksimum toplam ısı transfer katsayısı artışı ise kanatçiksız ve kanatçıklı ısı değiştiriciler için sırasıyla %14,3 ve %15'tir. Ek olarak, Şekil 7.10'dan açıkça görüldüğü gibi CuO-TiO₂/su nanoakışkan kullanımı daha fazla artış elde edilmesini sağlamıştır. Bu durum, hibrit tip nanoakışkan elde etmek için CuO nanopartikülleri kullanımının olumlu etkisini açıkça göstermiştir. Afshari vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, 1 600-3 800 aralığında değişen Reynolds sayılarında lehimli plakalı ısı değiştiriciler denenmiş ve çalışma akışkanı olarak TiO₂/su tekli ve TiO₂-Al₂O₃/su hibrit nanoakışkanları kullanılmıştır [119]. Tekli ve hibrit nanoakışkanların kullanımı toplam ısı transfer katsayısını sırasıyla %4,3-6 ve %8-14,5 aralığında arttırmıştır. Khanlari vd. (2019) plakalı ısı değiştiricilerde TiO₂/su nanoakışkanı kullanmış ve nanoakışkan kullanımıyla toplam ısı transfer katsayısı %6 oranında iyileştirilmiştir [122]. Naik ve Vinod (2018) kütlece %1 konsantrasyonda CuO/su nanoakışkanı kullanarak helisel borulu bir ısı değiştiriciyi test etmiş ve toplam ısı transfer katsayısını %29 oranında arttırmıştır [81]. Sedimentasyonu önlemek ve homojen bir akışkan elde etmek için bir karıştırıcı kullanmışlardır. Ancak bu durum, enerji tüketimini arttırabilir ve bunun ilk hesaplamalarda dikkate alınması gerekmektedir.



Şekil 7.10. Farklı parametrelere göre toplam ısı transfer katsayısının değişimi

7.2.3. Deneysel sıcak taraf ısı transfer katsayısı bulguları

Isı transfer katsayısı, ısı değıştircilerin performansını analiz etmekte kullanılan bir parametredir. Şekil 7.11’de, üç farklı helisel boru Reynolds sayısı ve farklı sıcaklıklarda helisel borulu ısı değıştircilerin sıcak (helisel boru) tarafındaki ısı transfer katsayısı parametresinin değışimi sunulmuştur. Şekil 7.11’de görüleceğı üzere, sıcak taraf ısı transfer katsayısı değeri her iki ısı değıştircide de toplam ısı transfer katsayısı ile benzer bir davranış göstermiştir. Kanatçksız ve kanatçkl helisel borulu ısı değıştircilerin helisel borularında tekli nanoakışkan kullanımı, sıcak taraf ısı transfer katsayısı parametresini ortalama olarak sırasıyla %9,2 ve %14 oranında yükseltmiştir. TiO_2/su tekli nanoakışkan kullanımı ile ısı transfer katsayısındaki maksimum artış değeri ise kanatçksız ve kanatçkl sistemler için sırasıyla %11 ve %18,2’dir. Ek olarak, kanatçksız ve kanatçkl ısı değıştircilerin helisel boru tarafında $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkan kullanımı, sıcak taraf ısı transfer katsayısını sırasıyla ortalama %13 ve %18,1 oranında artırmıştır. Ayrıca, hibrit nanoakışkan kullanımı kanatçksız ve kanatçkl sistemler için sıcak taraf ısı transfer katsayısında sırasıyla %16 ve %20 oranında maksimum artış sağlamıştır.



Şekil 7.11. Farklı parametrelere göre sıcak taraf ısı transfer katsayısının değışimi

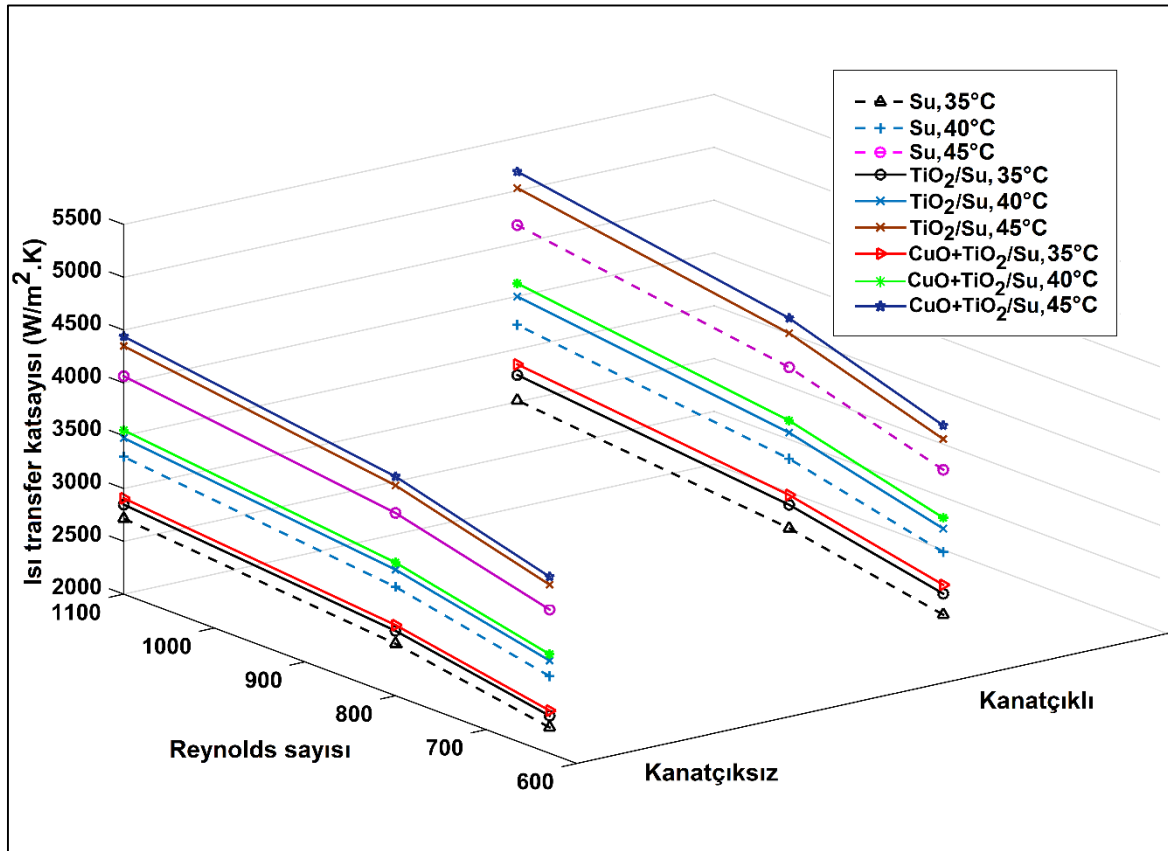
Toplam ısı transfer katsayısı parametresine benzer şekilde, 11 000 ve 16 000 Reynolds sayılarındaki sıcak taraf ısı transfer katsayısı değerlerindeki artış, Reynolds sayısı 6 600'e kıyasla daha yüksek olarak bulunmuştur. Elde edilen ısı transfer katsayısı değerleri, helisel borulu ısı değiştiriciye kanatçık uygulamasının ısı transferi üzerindeki önemli etkisini açıkça ortaya koymuştur. Bu çalışmada CuO-TiO₂/su, TiO₂/su ve su kullanılarak helisel borulu ısı değiştiricilerin sıcak çevrimlerindeki ısı transfer katsayısı değerleri 5 668-17 158 W/m².K aralığında elde edilmiştir. Palanisamy ve Mukesh Kumar (2019), tasarladıkları helisel borulu ısı değiştiricide su ve karbon nanotüp/su akışkanlarını kullanmış ve ısı transfer katsayısı değerlerini 3 800-6 800 W/m².K aralığında elde etmiştir [88]. Bahrehmand ve Abbassi (2016) tarafından yürütülen başka bir araştırmada, helisel borulu bir ısı değiştiricinin performansı deneysel olarak test edilmiş ve helisel boru tarafındaki ısı transfer katsayısı değeri Al₂O₃/su nanoakışkanı kullanılarak 5 000-25 000 W/m².K arasında elde edilmiştir [12]. Niwalkar vd. (2019) tarafından yapılan bir araştırmada, çalışma akışkanları olarak su ve SiO₂/su akışkanları test edilerek helisel borulu bir ısı değiştiricide ısı transfer katsayısı 2 000-14 000 W/m².K aralığında hesaplanmıştır [83]. Kulkarni vd. (2022) tarafından yapılan bir araştırmada, farklı çalışma koşullarında helisel borulu bir ısı değiştiricinin gövde tarafında biyosentezlenmiş çinko nanopartikül içeren nanoakışkan kullanılmış ve ısı transfer katsayısı yaklaşık 1 200-13 000 aralığında elde edilmiştir [123]. Ayrıca, sonuçlar biyosentezlenmiş çinko ile hazırlanan nanoakışkan kullanımının olumlu etkisini göstermiştir.

7.2.4. Deneysel soğuk taraf ısı transfer katsayısı bulguları

Şekil 7.12'de test edilen ısı değiştiricilerinin soğuk (gövde) tarafındaki ısı transfer katsayısı değerlerinin farklı parametrelere göre değişimi verilmiştir. Kanatçıksız ısı değiştiricide TiO₂/su tekli ve CuO-TiO₂/su hibrit nanoakışkan kullanımı soğuk taraf ısı transfer katsayısı değerini ortalama olarak sırasıyla %5,7 ve %7,9 oranında arttırmıştır. Kanatçıklı ısı değiştiricide tekli ve hibrit nanoakışkan kullanımı ise soğuk taraf ısı transfer katsayısı değerlerini sırasıyla %7,5 ve %10,5 arttırmıştır.

Gövde tarafı ısı transfer katsayısı için elde edilen artış oranları, helisel borulu ısı değiştiricilerin sıcak (helisel boru) tarafındaki ısı transfer katsayısı için elde edilen ortalama artışlarla karşılaştırıldığında nispeten daha düşüktür. Bu durum, ısı değiştiricilerin helisel boru tarafında kullanılan TiO₂/su ve CuO-TiO₂/su akışkanlarının kritik etkisini bir

kez daha göstermektedir. Ek olarak kanatçıksız ve kanatçık ısı değıştircilerin gövde tarafındaki ısı transfer katsayısının ortalama artış değeri arasındaki fark ise kanatçık modifikasyonunun olumlu etkisini göstermektedir. Bu çalışmada incelenen ısı değıştircilerin gövde tarafındaki ısı transfer katsayısı değeri tüm deneyler ve konfigürasyonlar için $2\ 240-5\ 180\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}$ aralığında hesaplanmıştır. Benzer çalışmada, çalışma akışkanı olarak saf su ve $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ test edilmiş ve gövde tarafındaki ısı transfer katsayısı $1\ 100-1\ 500\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}$ aralığında hesaplanmıştır [12].

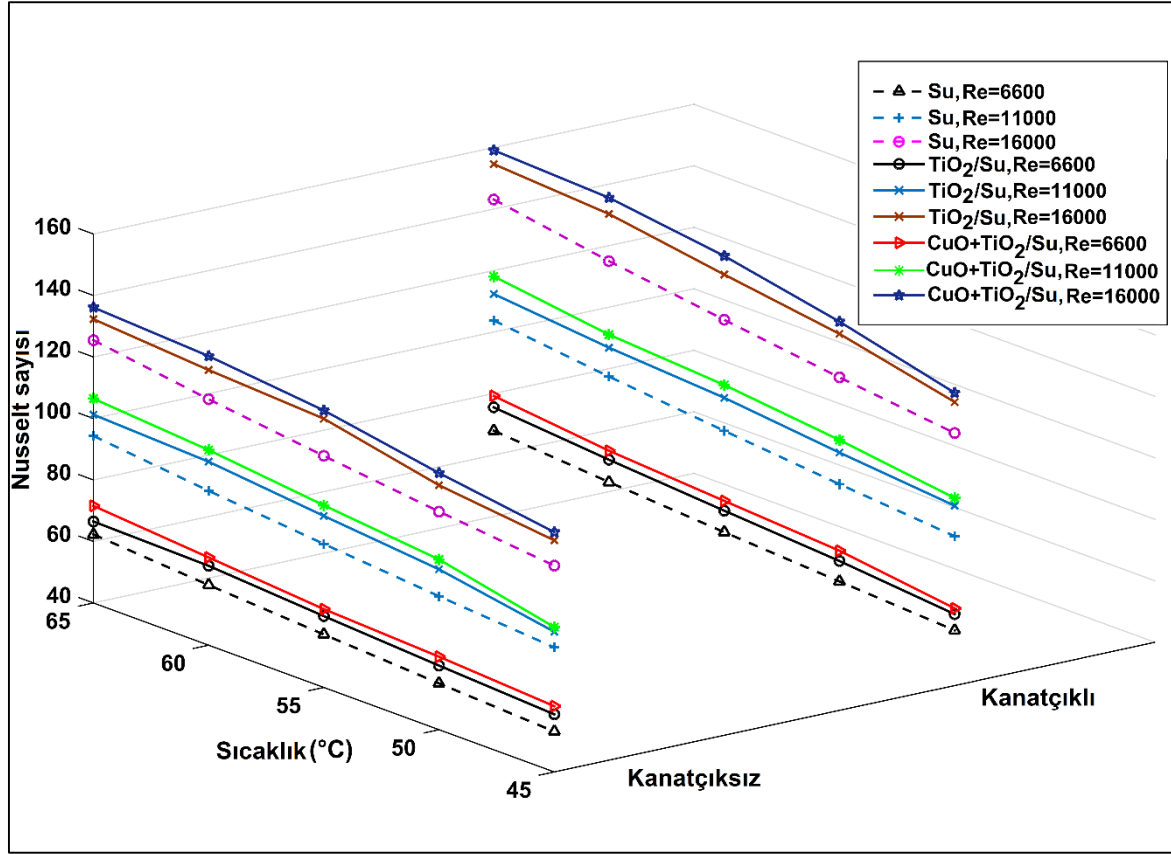


Şekil 7.12. Farklı parametrelere göre soğuk taraf ısı transfer katsayısının değışimi

7.2.5. Deneysel Nusselt sayısı bulguları

Şekil 7.13'te test edilen iki ısı değıştircisinin sıcak tarafındaki Nusselt sayısının sıcak taraf çalışma akışkanı, Reynolds sayısı ve sıcaklık gibi farklı parametrelere bağı olarak değışimi sunulmuştur. TiO_2/su nanoakışkanının kullanımı kanatçıksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değıştircilerinin ortalama Nusselt sayısı değeri sırasıyla %8,7 ve %11,3 oranında arttırmıştır. Ek olarak, $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkan kullanımı kanatçıksız ve

kanatçıklı ısı değıştircilerin ortalama Nusselt sayısı değęlerini sırasıyla %12 ve %14,5 iyileştirmiştir.



şekil 7.13. Farklı parametrelere göre sıcak taraf Nusselt sayısının değışimi

Bunun yanında, şekil 7.13 Reynolds sayısı, sıcaklığın ve sisteme kanatçık eklemenin Nusselt sayısı üzerindeki önemli etkisini göstermektedir. Helisel boru üzerine kanatçık eklenmesi ısı değıştircideki türbölans yoğunluğunun artmasını ve helisel boruya yakın bölgelerdeki akışkan hızının artmasını sağlayarak ısı transferini iyileştirmiştir.

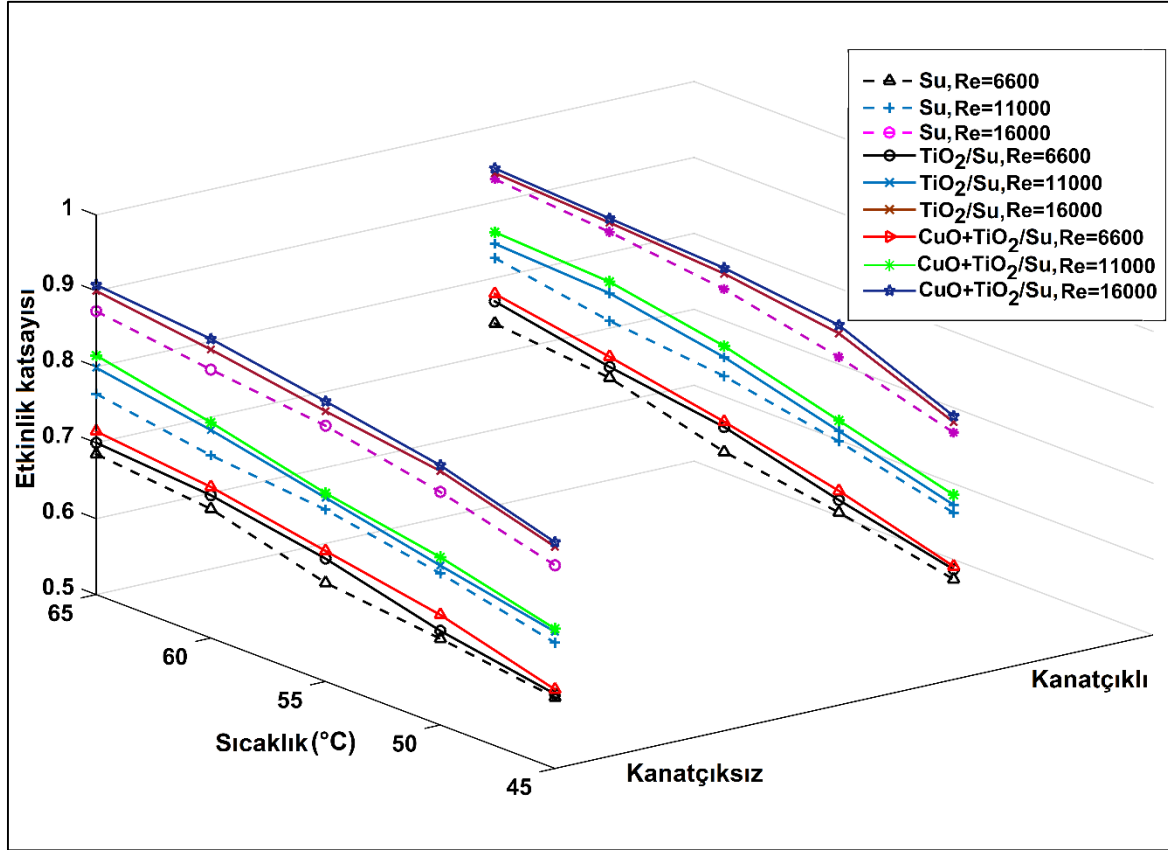
Bu çalışmada, Helisel borudaki (sıcak taraf) Nusselt sayısı değęleri her üç akışkanın (su, TiO_2/su ve $\text{CuO}-\text{TiO}_2/\text{su}$) da test edildiği deneylerde 54-159 aralığında bulunmuştur. Wang vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, helisel borulu bir ısı değıştirci tasarlanmış ve optimize edilmiştir [124]. Çalışmada Nusselt sayısı değęi yaklaşık 35-105 aralığında hesaplanmışır. Etghani ve Hosseini Baboli (2017) benzer bir helisel borulu ısı değıştirci tasarlayarak test etmiştir [72]. Çalışma sonuçlarına göre Nusselt sayısı 53-76 aralığında bulunmuştur. Kannadasan vd. (2012) tarafından gerçekteştirilen araştırmada, CuO/su nanoakışkan helisel borulu bir ısı değıştircide denenmiş ve Nusselt sayısı 35-105

aralığında hesaplanmıştır [125]. Diğer bir çalışmada, farklı bir geometrik modifikasyona sahip helisel borulu bir ısı değiştirici denenmiş ve hesaplanan Nusselt sayısı 25-375 aralığındadır [74]. Sepehr vd. (2018), kanatçık eklenmiş helisel borulu bir ısı değiştiriciyi sayısal olarak analiz etmiş ve ortalama Nusselt sayısını 125 olarak bulmuştur [126]. Kulkarni vd. (2022) biyosentezlenmiş çinko nanopartiküllerin kullanıldığı bir çalışma akışkanını helisel borulu bir ısı değiştiricide farklı koşullar altında test etmiş ve Nusselt sayısını 25-240 aralığında hesaplamıştır [123]. Farklı bir çalışmada, Noorbakhsh vd. (2020) helisel borulu bir ısı değiştiricisinin helisel boru tarafında yeni bir geometri tasarlamış ve yeni sistem için Nusselt sayısını 39-70 aralığında bulmuştur [127].

7.2.6. Deneysel etkinlik katsayısı bulguları

Tüm ısı sistemlerinde olduğu gibi, etkinlik katsayısı ifadesi helisel borulu ısı değiştiricilerin ısı performanslarının analiz edilmesinde kullanılan önemli parametrelerdendir. Etkinlik katsayısı parametresi, ısı değiştirici sisteminin belirli koşullar altında gösterdiği ısı performansın, ideal ısı performansına oranı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 7.14'te yeni tip helisel borulu ısı değiştiricilere ait etkinlik katsayısı değerlerinin farklı parametrelere göre değişimi sunulmuştur.

Şekil 7.14'ten görülebileceği üzere, TiO_2 ve CuO-TiO_2 içeren nanoakışkanların ısı değiştiricilerin sıcak tarafında kullanılması etkinlik katsayısı değerini önemli ölçüde arttırmıştır. TiO_2 /su nanoakışkan kullanımı kanatçıksız ve kanatçıklı sistemlerin ortalama etkinlik katsayısı değerlerini sırasıyla %4,5 ve %5,3 oranında iyileştirmiştir. Hibrit nanoakışkan kullanımı ise etkinlik katsayısını kanatçıksız ve kanatçıklı ısı değiştiricileri için sırasıyla %4,9 ve %5,6 oranında arttırmıştır. Bu tez çalışması kapsamında deneysel olarak bulunan etkinlik katsayısı artışı değerleri, literatürdeki ısı değiştiricilerin incelendiği benzer çalışmalar ile uyum içerisindedir. Khanlari vd. (2019) tarafından yapılan araştırmada, TiO_2 /su nanoakışkan plakalı bir ısı değiştiricide denenmiş ve etkinlik katsayısı maksimum olarak %5 oranında arttırılmıştır [122]. Diğer bir çalışmada ise, Sunu vd. (2020) Al_2O_3 /su nanoakışkanını helisel borulu bir ısı değiştiricide denemiş ve saf su kullanımına göre etkinlik katsayısı değeri %2,2 oranında arttırılmıştır [128].



Şekil 7.14. Farklı parametrelere göre etkinlik katsayısı değerlerinin değişimi

7.3. Deneysel Bulguların Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırılması

Çizelge 7.1 çeşitli tip ısı değiştiricilerde nanoakışkanların test edilmesine ilişkin araştırmalar ve mevcut tez çalışması sonuçları arasında genel bir karşılaştırmayı sunmaktadır. Çizelgede verilen çalışmalar, ısı değiştiricilerde çalışma akışkanı olarak nanoakışkan kullanımının olumlu etkilerini açıkça göstermektedir. İncelenen çalışmalara göre, ısı performansının iyileştirilmesinde partikül boyutu, partikül konsantrasyonu, sıcaklık ve debi gibi çalışma koşulları oldukça önemlidir. Ayrıca, ısı değiştirici tipi, kullanılan nanoakışkanın ısı davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Başka bir deyişle, aynı nanoakışkan, çeşitli sistemlerde farklı ısı özellikler gösterebilir. Mevcut çalışmadaki iyileştirme aralıkları verilen çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu araştırmada kabul edilebilir bulgulara rastlandığı açıkça görülebilmektedir.

Çizelge 7.1. Mevcut tez çalışmasının benzer çalışmalar ile karşılaştırılması

Kaynak	Nanoakışkan	Partikül oranı (%)	Isı değiştirici tipi	Re	Isı transfer katsayısı ($W/m^2.K$)	Bulgular
[90]	SiO ₂ /su, Ag/su	0,1 ve 0,3 (v/v)	Helisel borulu ısı değiştirici	8 900-11 970	~5 200-8 800	Transfer edilen ısı %8-23 aralığında arttırılmıştır.
[100]	TiO ₂ /su, Al ₂ O ₃ /su	0,1, 0,2, ve 0,3 (v/v)	Gövde borulu ısı değiştirici	~3 150-4 500	~2 500-4 500	Isı transfer katsayısı maksimum %42,37 iyileştirilmiştir.
[129]	TiO ₂ /su, Al ₂ O ₃ /su, CeO ₂ /su, SiO ₂ / su	0-3 (v/v)	Plakalı ısı değiştirici	-	~690-880	En yüksek ısı transfer iyileştirmesi %7,9 ile TiO ₂ /su nanoakışkanında gözlemlenmiştir.
[122]	TiO ₂ / su	2 (w/w)	Plakalı ısı değiştirici	~1 500-4 000	2 680-5 320	Isı transfer katsayısı %6-11 aralığında iyileştirilmiştir.
[130]	TiO ₂ / su	0,3-1,5 (w/w)	Plakalı ısı değiştirici	~160-530	~1 400-3 800	Isı transfer katsayısı %6,6-23,7 aralığında arttırılmıştır.
[131]	CuO/ su, CuO-Al ₂ O ₃ /su	0,5 ve 1 (w/w)	U boru tipi ısı değiştirici	~8 000-16 000	12 000-23 900	CuO-Al ₂ O ₃ /su kullanımı ile maksimum %12'lik iyileşme sağlanmıştır.
[119]	TiO ₂ / su, TiO ₂ -Al ₂ O ₃ /su	1 (w/w)	Plakalı ısı değiştirici	1 600-3 800	~2 650-6 300	Hibrit nanoakışkan kullanımı ısı transferini ortalama %7,5-12,3 aralığında arttırmıştır.
[132]	Al ₂ O ₃ /su	0,15-0,75 (w/w)	Helisel borulu ısı değiştirici	-	-	Maksimum enerji verimi %10,65 olarak hesaplanmıştır.
[82]	Al ₂ O ₃ /su, SiO ₂ / su	0,1-0,3 (v/v)	Helisel borulu ısı değiştirici	6 000-15 000	-	Utilizing nanofluids importantly upgraded the performance.
[88]	Karbon nanotüp/su	0,1, 0,3, ve 0,5 (v/v)	Helisel borulu ısı değiştirici	-	~38 00-6 800	Isı transfer katsayısı %14-41 aralığında arttırılmıştır.
Bu çalışma	TiO ₂ /su ve CuO-TiO ₂ /su	1 (w/w)	Helisel borulu ısı değiştirici	6 600-16 000	5 668-17 158	Sıcak taraf ısı transfer katsayısı ortalama %9,2-18,1 aralığında arttırılmıştır.

v/v: hacimce %, w/w: kütlece %

Kanatçksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değıştiricilerde TiO_2/su tekli ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkanlarının kullanılmasının ısıl performansı önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, hibrit nanoakışkanlarının helisel borulu ısı değıştiricilerde kullanımı, her iki helisel borulu ısı değıştiricide de tekli nanoakışkandan daha iyi performans göstermiştir. Ek olarak, helisel borulu ısı değıştiriciye kanatçıkların entegre edilmesinin hem TiO_2/su tekli hem de $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkanlarla performans geliştirme üzerinde daha fazla olumlu etki gösterdiği sonucuna varılmıştır.

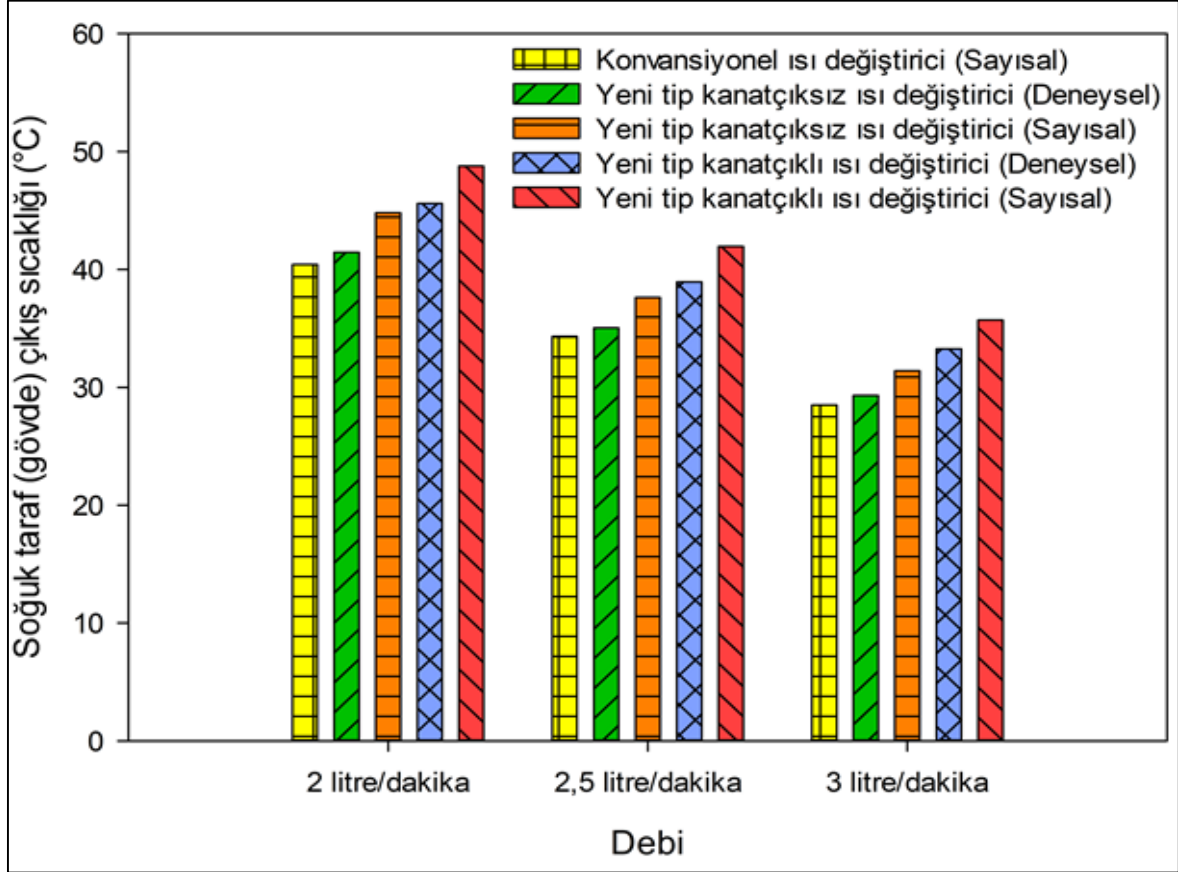
7.4. Deneyssel ve Sayısal Bulguların Karşılaştırılması

Daha önce de belirtildiği gibi, bu tez çalışmasının sayısal analiz kısmında tasarlanan ve incelenen helisel borulu ısı değıştiricilerde saf su kullanılmıştır. Sayısal çalışmada genel olarak en yüksek performansa sahip geometrinin tespiti amaçlandığından, bu kısımda nanoakışkan kullanımının etkisi incelenmemiştir. Bundan dolayı, bu kısımda verilen karşılaştırma grafikleri hem deneyssel hem de sayısal analizlerde incelenen helisel borulu ısı değıştiricilerin sıcak tarafında saf su kullanıldığı analizler sunularak karşılaştırılmıştır.

Sayısal ve deneyssel olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında ilk olarak helisel borulu ısı değıştiricilerin gövde tarafı (soğuk taraf) su çıkış sıcaklıkları ele alınmıştır. Şekil 7.15'te helisel borulu yeni tip kanatçksız ve kanatçıklı ısı değıştiricilerin sayısal ve deneyssel olarak elde edilmiş ortalama soğuk taraf (gövde) çıkış sıcaklığı değerleri sunulmuştur. Verilen şekilde konvansiyonel helisel borulu ısı değıştiriciye ait sayısal sonuçlar ve yeni tip kanatçıklı ve kanatçksız helisel borulu ısı değıştiricilere ait hem sayısal hem de deneyssel olarak elde edilmiş gövde tarafı (soğuk taraf) su çıkış sıcaklığı değerleri görülebilmektedir. Şekilden de açıkça görüleceği üzere, yeni tip akış kanalı tasarımına sahip ısı değıştiricilerin konvansiyonel ısı değıştiriciye oranla daha iyi sonuçlar vermiştir. Ek olarak, kanatçık içeren yeni tip helisel borulu ısı değıştiricisinin soğuk taraf çıkış sıcaklığı hem deneyssel hem de sayısal sonuçlarda diğer tip sistemlerden daha yüksek bulunmuştur.

Yapılan sayısal analizlere göre, konvansiyonel helisel borulu ısı değıştiricinin gövde tarafı su çıkış sıcaklığı 28,50-40,40 °C aralığında bulunmuştur. Yeni tip kanatçksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değıştiricilere ait deneyssel olarak elde edilmiş gövde tarafı su çıkış sıcaklığı ise sırasıyla 29,30-41,50 °C ve 33,20-45,60 °C aralığında gözlemlenmiştir.

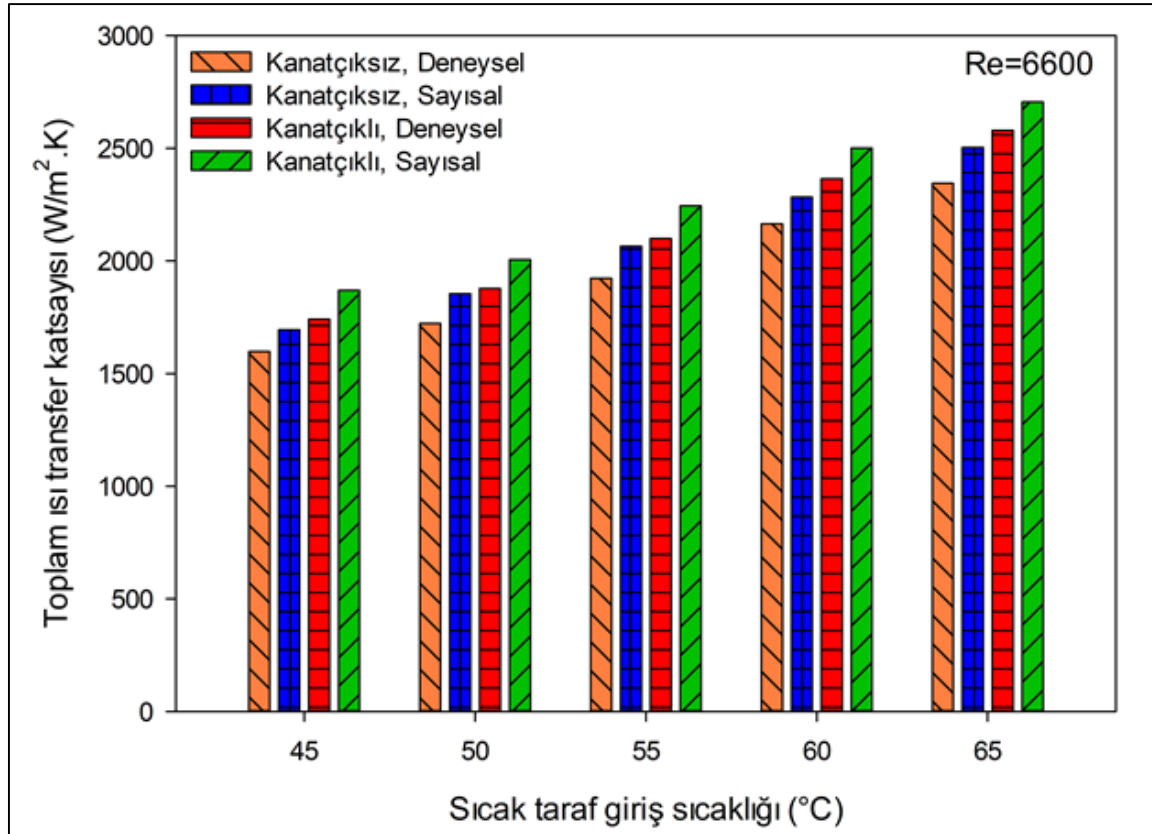
Sayısal analiz sonuçlarına göre, yeni tip kanatçıksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiricilerin gövde tarafı su çıkış sıcaklığı sırasıyla 31,40-44,80 °C ve 35,70-48,70 °C değerleri arasında bulunmuştur. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen çıkış sıcaklığı değerleri arasındaki farkın kabul edilebilir seviyede olduğu belirtilebilir.



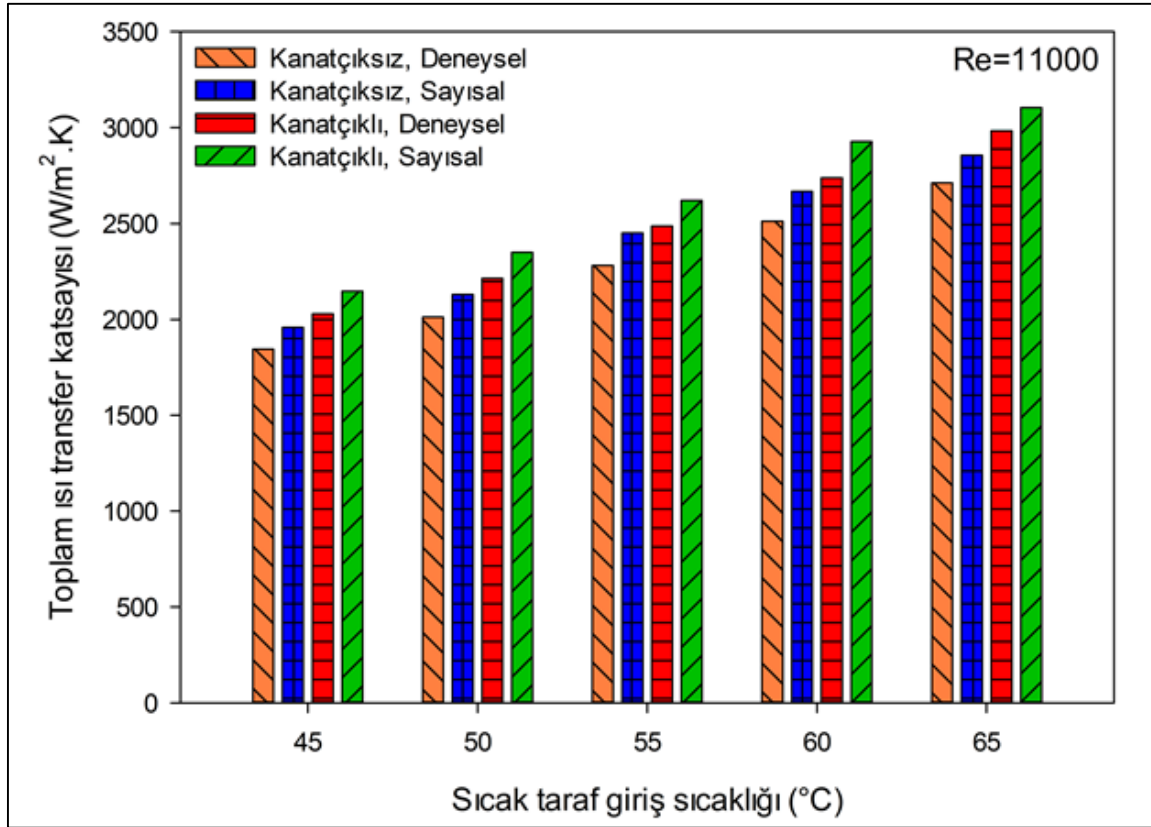
Şekil 7.15. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen gövde çıkış sıcaklıkları

Şekil 7.16'de 6 600 değerindeki Reynolds sayısı için tasarlanan ve imal edilen yeni tip kanatçıksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiricilerin deneysel ve sayısal olarak elde edilen toplam ısı transfer katsayısı değerleri sunulmuştur. Şekil 7.17 ve Şekil 7.18 de ise sırasıyla $Re=11\ 000$ ve $Re=16\ 000$ değerleri için yeni tip helisel borulu ısı değiştiricilerin deneysel ve sayısal olarak bulunan toplam ısı transfer katsayısı değerleri verilmiştir. Verilen şekillerdeki değerlerin tümü, helisel borulu ısı değiştiricilerin sıcak tarafında saf su kullanılan deneylere ve sayısal analizlere aittir. Kanatçık içermeyen helisel borulu ısı değiştiriciye ait sayısal ve deneysel toplam ısı transfer katsayısı sonuçları arasındaki fark %6,27-8,66 arasında değişmektedir. Ek olarak, kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiricinin sayısal ve deneysel toplam ısı transfer katsayısı sonuçları arasındaki fark ise %6,90-9,48 aralığında bulunmuştur.

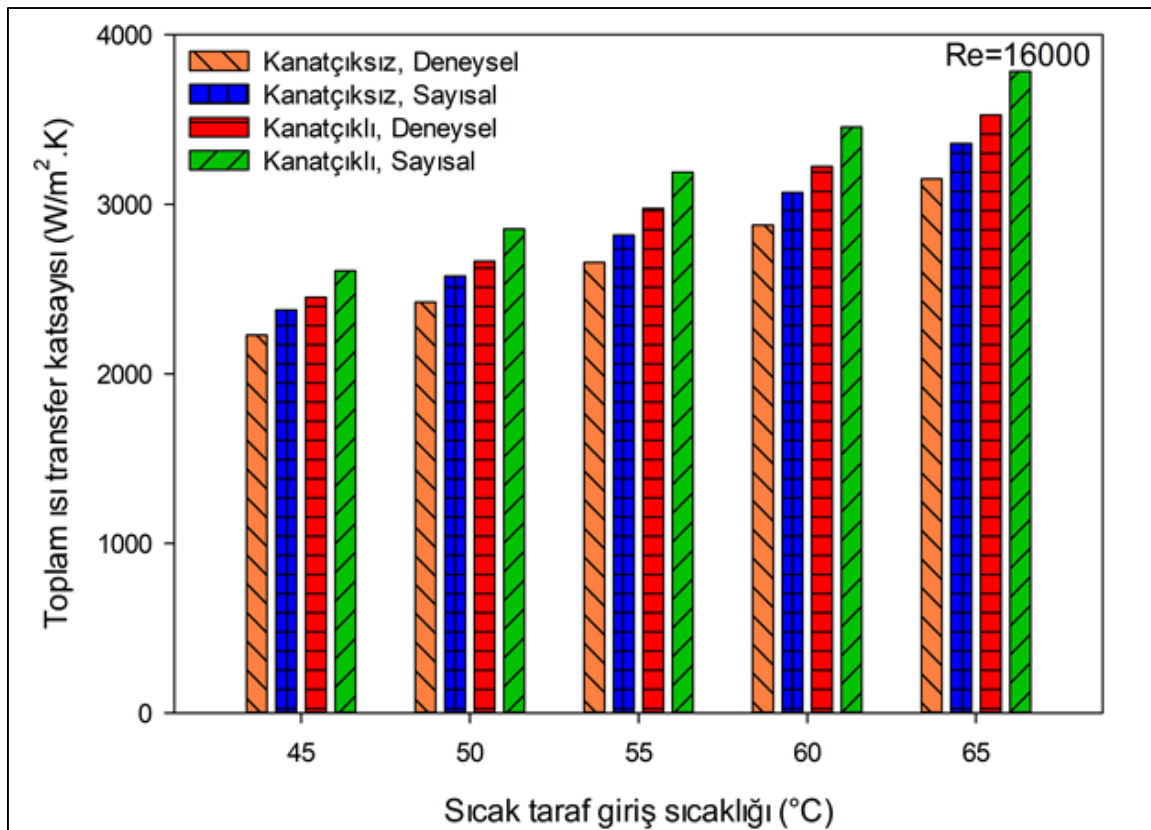
Bu çalışmanın sayısal ve deneysel olarak elde edilen sonuçları, yeni tip akış yolunun ve uzunlamasına kanatçıkların helisel borulu ısı değıştircilere entegre edilmesinin ısı transferi üzerindeki olumlu etkilerini kanıtlar niteliktedir. Bunun yanında, deneysel çalışmada kullanılan nanoakışkanların da (TiO_2/su tekli ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ hibrit) yeni tip kanatçiksız ve kanatçıklı helisel borulu ısı değıştircilerdeki ısı transferini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7.16. $Re=6\ 600$ için deneysel ve sayısal toplam ısı transfer katsayısı bulguları



Şekil 7.17. Re=11 000 için deneysel ve sayısal toplam ısı transfer katsayısı bulguları



Şekil 7.18. Re=16 000 için deneysel ve sayısal toplam ısı transfer katsayısı bulguları

7.5. Belirsizlik Analizi Bulguları

Bu tez çalışmasında, akışkanların debi değerleri ve sıcaklıkları uygun ölçüm cihazları kullanılarak ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Bu çalışmada, sıcaklık, debi, ısı transferi, ısı transfer katsayısı ve etkinlik katsayısı için hesaplanan belirsizlik değerleri sırasıyla $\pm 0,60$ °C, $\pm 5,18$, $\pm 5,42$, $\pm 6,54$ ve $\pm 7,54$ olarak hesaplanmıştır. Elshazly vd. (2017) tarafından yapılan ve helisel borulu ısı değiştiricilerin incelendiği çalışmada, ısı transfer katsayısı için belirsizlik değeri %4,7-7,0 aralığında bulunmuştur [133]. Farklı bir çalışmada ise helisel borulu ısı değiştiriciler araştırılmış ve ısı transfer katsayısı ve etkinlik katsayısı değerleri için belirsizlik değerleri sırasıyla ± 9 ve ± 10 olarak hesaplanmıştır [134]. Bu çalışmada bulunan belirsizlik değerlerinin, literatürde helisel borulu ısı değiştiricilerin incelendiği çalışmalarda bulunan çalışmalarla uyum içerisinde olduğu söylenebilir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yeni tip helisel borulu ısı değiştiriciler tasarlanarak konvansiyonel helisel borulu ısı değiştirici ile sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışmada yeni akış kanalına sahip helisel borulu ısı değiştiricilerin kanatçıksız ve kanatçıklı tipleri test edilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre, yeni tip helisel borulu ısı değiştiriciler imal edilmiştir. Üretim işleminden sonra, helisel borulu ısı değiştiriciler su, TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ nanoakışkanları ile deneysel olarak incelenmiştir. Farklı çalışma akışkanları ısı değiştiricilerin sıcak (helisel boru) tarafında dolaştırılmıştır. Deneyler, farklı Reynolds sayıları ve sıcak taraf giriş sıcaklığı değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Tasarlanan yeni akış kanalına sahip helisel borulu ısı değiştiricinin konvansiyonel sisteme göre daha iyi ısı performans gösterdiği bulunmuştur. Ek olarak, yeni tip sistemin helisel borularına kanatçıkların ilave edilmesi de ısı transferini önemli ölçüde arttırmıştır.
- Kanatçıksız helisel borulu ısı değiştiriciye ait sayısal ve deneysel olarak bulunan sonuçlar arasındaki fark %6,27-8,66 arasındayken, kanatçıklı helisel borulu ısı değiştiricinin sayısal ve deneysel sonuçları arasındaki fark ise %6,90-9,48 arasında hesaplanmıştır.
- İncelenen kanatçıklı ve kanatçıksız helisel borulu ısı değiştiricilerin gövde tarafındaki ısı transfer katsayısı değerleri tüm deneyler ve konfigürasyonlar için 2 240-5 180 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ aralığında hesaplanmıştır.
- Su, TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ kullanılan deneylerde her iki helisel borulu ısı değiştiricinin sıcak (helisel boru) çevrimlerindeki ısı transfer katsayısı değerleri 5 668-17 158 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ aralığında elde edilmiştir.
- Kanatçıksız yeni tip ısı değiştiricide çalışma akışkanı olarak TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ nanoakışkanlarının kullanılması, ısı transferini sırasıyla ortalama %9 ve %13 oranında arttırmıştır. Kanatçık içeren yeni tip sistemde ise TiO_2/su ve $\text{CuO-TiO}_2/\text{su}$ nanoakışkanlarının kullanılması, ısı transfer oranını sırasıyla ortalama %9,6 ve %13,8 oranında iyileştirmiştir.
- Kanatçıklı ve kanatçıksız yeni tip ısı değiştiricilerin sıcak tarafında TiO_2/su tekli nanoakışkan kullanılması, ısı transfer katsayısını sırasıyla %9,2 ve %14 olarak

yükseltmiştir. Ayrıca, kanatçksız ve kanatçklı sistemlerin sıcak tarafında dolaşan CuO-TiO₂/su hibrit nanoakışkan ısı transfer katsayısını sırasıyla %13 ve %18,1 oranında artırmıştır.

- Yüksek Reynolds sayılarında TiO₂/su tekli ve CuO-TiO₂/su hibrit nanoakışkanlarının kullanımının etkisinin, düşük Reynolds sayılarına kıyasla nispeten yüksek olduğu görülmüştür.
- Yeni tip ısı değiştiricinin helisel boruları üzerine uzunlamasına kanatçıkların eklenmesi, türbölans yoğunluğunun artmasını sağlamış ve sistemin helisel boru yüzeyine yakın bölgelerde akan akışkanın hızını iyileştirmiştir. Bu durum, kanatçıklar ile modifiye edilmiş ısı değiştiricide ısı transferinin artmasının ana nedeni olarak gösterilebilir.

Tez çalışmasının genel bulguları incelendiğinde, hazırlanan nanoakışkanların her iki ısı değiştiricinin de ısı performansını önemli ölçüde arttırmıştır. Ancak hibrit nanoakışkan kullanımı, tekli nanoakışkana göre daha üstün ısı özellikler göstermiştir. İleriki araştırmalar için öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Helisel borular ve iç boru içersine farklı türbölötörler ve genişletilmiş ısı transfer yüzey alanları eklenerek karşılaştırma yapılabilir.
- Kullanılan nanoakışkanlar farklı yüzey aktif maddeler ile hazırlanarak, yüzey aktif madde tipinin etkileri araştırılabilir.
- Helisel borulu ısı değiştiricisine eklenen kanatçık sayıları arttırılıp azaltılarak ısı performans değişimi test edilebilir ve bir optimizasyon çalışması yapılabilir.
- Hazırlanan ve test edilen nanoakışkanlar farklı konsantrasyonda hazırlanarak performans testleri gerçekteştirilebilir.
- Üçlü hibrit (tri-hybrid) nanoakışkanlar hazırlanarak yeni tip helisel borulu ısı değiştiricilerdeki performansları tekli ve ikili hibrit nanoakışkanlar ile deneysel olarak karşılaştırılabilir.
- Nanoakışkanların zamanla helisel borulu ısı değiştirici içersindeki çökelme durumunu engellemek adına sisteme bir karıştırmacı aparat eklenebilir. Ancak bu durum için enerji tüketimi göz önünde bulundurulmalıdır.
- Hazırlanan nanoakışkanların performansı farklı ısı değiştirici sistemlerde denenerek, helisel borulu ısı değiştiriciler ile karşılaştırılabilir.
- İleriki çalışmalarda, tasarlanan ve test edilen helisel borulu ısı değiştiricilerin teknoekonomik analizleri gerçekteştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Kumar, L., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A. (2019). Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review. *Energy Conversion and Management*, 195, 885-908.
2. Hesselgreaves, J. E., Law, R., Reay, D. (2016). *Compact heat exchangers: selection, design and operation*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
3. Shah, R. K., Sekulic, D. P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons, New Jersey.
4. Kakaç, S., Liu, H., Pramuanjaroenkij, A. (2012). *Heat Exchangers Selection, Rating, and Thermal Design*. CRC Press, New York.
5. Fsadni, A. M., Whitty, J. P. (2016). A review on the two-phase heat transfer characteristics in helically coiled tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95, 551-565.
6. Bhanvase, B. A., Barai, D. (2021). *Nanofluids for Heat and Mass Transfer: Fundamentals, Sustainable Manufacturing and Applications*. Academic Press.
7. Ajeeb, W., Murshed, S. S. (2022). Nanofluids in compact heat exchangers for thermal applications: A State-of-the-art review. *Thermal Science and Engineering Progress*, 30, 101276.
8. Pordanjani, A. H., Aghakhani, S., Afrand, M., Mahmoudi, B., Mahian, O., Wongwises, S. (2019). An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy. *Energy Conversion and Management*, 198, 111886.
9. Bahiraei, M., Rahmani, R., Yaghoobi, A., Khodabandeh, E., Mashayekhi, R., Amani, M. (2018). Recent research contributions concerning use of nanofluids in heat exchangers: a critical review. *Applied Thermal Engineering*, 133, 137-159.
10. Taborek, J. (1997). Double-pipe and multitube heat exchangers with plain and longitudinal finned tubes. *Heat Transfer Engineering*, 18(2), 34-45.
11. Perumal, S., Sundaresan, D., Sivanraju, R., Tesfie, N., Ramalingam, K., Thanikodi, S. (2022). Heat transfer analysis in counter flow shell and tube heat exchanger using of design of experiments. *Thermal Science*, 26, 843-848.
12. Bahrehmand, S., Abbassi, A. (2016). Heat transfer and performance analysis of nanofluid flow in helically coiled tube heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 628-637.
13. Sikandar, M. U. (2019). Design of helical coil heat exchanger for a mini powerplant. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 10, 303-313.
14. Prabhanjan, D. G., Rennie, T. J., Raghavan, G. V. (2004). Natural convection heat transfer from helical coiled tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(4), 359-365.

15. Nandakumar, K., Masliyah, J. H. (1982). Bifurcation in steady laminar flow through curved tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, 119, 475-490.
16. Fernández-Seara, J., Piñeiro-Pontevedra, C., Dopazo, J. A. (2014). On the performance of a vertical helical coil heat exchanger. Numerical model and experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 680-689.
17. Zohuri, B. (2017). *Compact Heat Exchangers; Selection, Application, Design and Evaluation (First edition)*. New York: Springer International Publishing.
18. Pandya, N. S., Shah, H., Molana, M., Tiwari, A. K. (2020). Heat transfer enhancement with nanofluids in plate heat exchangers: A comprehensive review. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 81, 173-190.
19. Choi, S. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticle. *American Society of Mechanical Engineers*, 231, 99-105.
20. Kakaç, S., Pramuanjaroenkij, A. (2009). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 3187-3196.
21. Khanlari, A. (2018). *Plakalı Isı Değiştiricilerin Deneysel ve Sayısal Analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
22. Gürbüz, E. Y. (2021). *Spineloksit Nanoakışkanlı Ön Soğutmasız Difüzyonlu Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminin Termodinamik Analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
23. Xiang, Q. W., Arun, S. M. (2008). A Review on nanofluids-experiments and applications. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25, 631-648.
24. Babar, H., Sajid, M. U., Ali, H. M. (2019). Viscosity of hybrid nanofluids: a critical review. *Thermal Science*, 23(3), 1713-1754.
25. Chein, R., Chuang, J. (2007). Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1), 57-66.
26. Altun, A. (2020). *Yüzey aktif maddelerin nanoakışkanların termal özellikleri ve ısı transferi üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
27. Wang, B. X., Zhou, L. P., Peng, X. F. (2006). Surface and size effects on the specific heat capacity of nanoparticles. *International Journal of Thermophysics*, 27(1), 139-151.
28. Tiznobaik, H. Shin, D. (2013). Enhanced specific heat capacity of high-temperature molten salt-based nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 542-548.
29. Sundar, S. L., Singh, M. K., Sousa, A. C. M. (2013). Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe₃O₄ nanofluid for heat transfer applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 7-14.

30. Turgut, A., Tavman, I., Chirtoc, M., Schuchmann, H. P., Sauter, C. Tavman, S. (2009). Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO₂ nanofluids. *International Journal of Thermophysics*, 30(4), 1213-1226.
31. Nguyen, C. T., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S. Mintsu, H.A. (2008). Viscosity data for Al₂O₃-water nanofluid-hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(2), 103-111.
32. Chandrasekar, M., Suresh, S., Senthilkumar, T. (2012). Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3917-3938.
33. Heyhat, M. M., Kowsary, F., Rashidi, A. M., Alem Varzane Esfehiani, S., Amrollahi, A. (2012). Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(8), 1272–1278.
34. Khanafer, K., Vafai, K. (2011). A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(19-20), 4410-4428.
35. Yang, L., Xu, J., Du, K., Zhang, X. (2017). Recent developments on viscosity and thermal conductivity of nanofluids. *Powder Technology*, 317, 348–369.
36. Teng, T. P., Hung, Y. H., Teng, T. C., Mo, H. E., Hsu, H. G. (2010). The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity, *Applied Thermal Engineering*, 30(14-15), 2213-2218.
37. Chon, C. H., Kihm K. D., Lee S. P. Choi S. U. S. (2005). Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*, 87(15), 153107.
38. Kuppan T. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook*, 2nd ed, Marcel Dekker, New York.
39. Ajeel, R. K., Saiful-Islam, W., Sopian, K., Yusoff, M. Z. (2020). Analysis of thermal-hydraulic performance and flow structures of nanofluids across various corrugated channels: An experimental and numerical study. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100604.
40. Satapathy, A. K. (2009). Thermodynamic optimization of a coiled tube heat exchanger under constant wall heat flux condition. *Energy*, 34, 1122-1126.
41. Colorado, D., Ali, M. E., García-Valladares, O., Hernández, J. A. (2011). Heat transfer using a correlation by neural network for natural convection from vertical helical coil in oil and glycerol/water solution. *Energy*, 36, 854-863.
42. Jamshidi, N., Farhadi, M., Ganji, D. D., Sedighi, K. (2013). Experimental analysis of heat transfer enhancement in shell and helical tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 51, 644-652.

43. Hardik, B. K., Baburajan, P. K., Prabhu, S. V. (2015). Local heat transfer coefficient in helical coils with single phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58, 522-538.
44. Dizaji, H. S., Jafarmadar, S., Hashemian, M. (2015). The effect of flow, thermodynamic and geometrical characteristics on exergy loss in shell and coiled tube heat exchangers. *Energy*, 91, 678-684.
45. Andrzejczyk, R., Muszynski, T. (2018). An experimental investigation on the effect of new continuous core-baffle geometry on the mixed convection heat transfer in shell and coil heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 136, 237-251.
46. Khorasani, S., Moosavi, A., Dadvand, A., Hashemian, M. (2019). A comprehensive second law analysis of coil side air injection in the shell and coiled tube heat exchanger: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 150, 80-87.
47. Andrzejczyk, R., Muszynski, T., Gosz, M. (2018). Experimental investigations on heat transfer enhancement in shell coil heat exchanger with variable baffles geometry. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 132, 114-126.
48. Miansari, M., Valipour, M. A., Arasteh, H., Toghraie, D. (2020). Energy and exergy analysis and optimization of helically grooved shell and tube heat exchangers by using Taguchi experimental design. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139(5), 3151-3164.
49. Solanki, A. K., Kumar, R. (2018). Condensation of R-134a inside dimpled helically coiled tube-in-shell type heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 129, 535-548.
50. Khorasani, S., Dadvand, A. (2017). Effect of air bubble injection on the performance of a horizontal helical shell and coiled tube heat exchanger: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 111, 676-683.
51. Rahimi, M., Hosseini, M. J., Gorzin, M. (2019). Effect of helical diameter on the performance of shell and helical tube heat exchanger: an experimental approach. *Sustainable Cities and Society*, 44, 691-701.
52. Alimoradi, A., Veysi, F. (2017). Optimal and critical values of geometrical parameters of shell and helically coiled tube heat exchangers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 73-78.
53. Mangrulkar, C. K., Dhoble, A. S., Chamoli, S., Gupta, A., Gawande, V. B. (2019). Recent advancement in heat transfer and fluid flow characteristics in cross flow heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109220.
54. Getu, H. M., Bansal, P. K. (2011). New frost property correlations for a flat-finned-tube heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(4), 544-557.
55. Arasteh, H., Salimpour, M. R., Tavakoli, M. R. (2019). Optimal distribution of metal foam inserts in a double-pipe heat exchanger. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 29, 1322-3142.

56. Abadi, G. B., Kim, K. C. (2017). Experimental heat transfer and pressure drop in a metal-foam-filled tube heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 42-49.
57. Iasiello, M., Bianco, N., Chiu, W. K., Naso, V. (2021). The effects of variable porosity and cell size on the thermal performance of functionally-graded foams. *International Journal of Thermal Sciences*, 160, 106696.
58. Feng, S. S., Kuang, J. J., Lu, T. J., Ichimiya, K. (2015). Heat transfer and pressure drop characteristics of finned metal foam heat sinks under uniform impinging flow. *Journal of Electronic Packaging*, 137(2), 021014.
59. Andreozzi, A., Bianco, N., Iasiello, M., Naso, V. (2017). Numerical study of metal foam heat sinks under uniform impinging flow. *Journal of Physics: Conference Series*, 796, 012002.
60. Bianco, N., Iasiello, M., Mauro, G. M., Pagano, L. (2021). Multi-objective optimization of finned metal foam heat sinks: Tradeoff between heat transfer and pressure drop. *Applied Thermal Engineering*, 182, 116058.
61. Kasaeian, A., Babaei, S., Jahanpanah, M., Sarrafha, H., Alsagri, A. S., Ghaffarian, S., Yan, W. M. (2019). Solar humidification-dehumidification desalination systems: A critical review. *Energy Conversion and Management*, 201, 112129.
62. Salimpour, M. R. (2009). Heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(2), 203-207.
63. Jayakumar, J. S., Mahajani, S. M., Mandal, J. C., Iyer, K. N., Vijayan, P. K. (2010). CFD analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes. *Computers & Chemical Engineering*, 34(4), 430-446.
64. Pawar, S. S., Sunnapwar, V. K. (2013). Experimental studies on heat transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in helical coils with laminar and turbulent flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 792-804.
65. Afshari, F., Ghasemi Zavaragh, H., Di Nicola, G. (2019). Numerical analysis of ball-type turbulators in tube heat exchangers with computational fluid dynamic simulations. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(7), 3771-3780.
66. Abu-Hamdeh, N. H., Bantan, R. A., Tlili, I. (2020). Analysis of the thermal and hydraulic performance of the sector-by-sector helically coiled tube heat exchangers as a new type of heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*, 150, 106229.
67. Chamoli, S., Lu, R., Chen, H., Cheng, Y., Yu, P. (2019). Numerical optimization of design parameters for a modified double-layer microchannel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 138, 373-389.
68. Yang, C., Bansal, P. K. (2005). Numerical investigation of capillary tube-suction line heat exchanger performance. *Applied Thermal Engineering*, 25(13), 2014-2028.

69. Mirgolbabaie, H. (2018). Numerical investigation of vertical helically coiled tube heat exchangers thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 136, 252-259.
70. Zhang, C., Wang, D., Xiang, S., Han, Y., Peng, X. (2017). Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in helically coiled tube with spherical corrugation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113, 332-341.
71. Omid, M., Farhadi, M., Darzi, A. A. R. (2018). Numerical study of heat transfer on using lobed cross sections in helical coil heat exchangers: effect of physical and geometrical parameters. *Energy Conversion and Management*, 176, 236-245.
72. Etghani, M. M., Baboli, S. A. H. (2017). Numerical investigation and optimization of heat transfer and exergy loss in shell and helical tube heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 121, 294-301.
73. Chen, H., Liu, Q. S., Liu, Y. W., Gao, B. (2020). Optimal design of a novel non-isometric helically coiled recuperator for Joule–Thomson cryocoolers. *Applied Thermal Engineering*, 167, 114763.
74. Wang, G., Dbouk, T., Wang, D., Pei, Y., Peng, X., Yuan, H., Xiang, S. (2020). Experimental and numerical investigation on hydraulic and thermal performance in the tube-side of helically coiled-twisted trilobal tube heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 153, 106328.
75. Wu, Z., Yang, F., Zhu, L., Feng, P., Zhang, Z., Wang, Y. (2016). Improvement in hydrogen desorption performances of magnesium based metal hydride reactor by incorporating helical coil heat exchanger. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(36), 16108-16121.
76. Mangrulkar, C. K., Dhoble, A. S., Pant, P. K., Kumar, N., Gupta, A., Chamoli, S. (2020). Thermal performance escalation of cross flow heat exchanger using in-line elliptical tubes. *Experimental Heat Transfer*, 33(7), 587-612.
77. Yıldız, G., Ağbulut, Ü., Gürel, A. E. (2021). A review of stability, thermophysical properties and impact of using nanofluids on the performance of refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 129, 342-364.
78. Kumar, P. M., Kumar, J., Suresh, S., Babu, K. P. (2012). Heat transfer enhancement in a helically coiled tube with Al_2O_3 /water nanofluid under laminar flow condition. *International Journal of Nanoscience*, 11(05), 1250029.
79. Akbarinia, A., Behzadmehr, A. (2007). Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1327-1337.
80. Ashrafi, N., Bashirzadeh, Y. (2014). Heat transfer of Nano-fluids as working fluids of swimming pool heat exchangers. *ADMT Journal*, 7(1), 75-81.
81. Naik, B. A. K., Vinod, A. V. (2018). Heat transfer enhancement using non-Newtonian nanofluids in a shell and helical coil heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 90, 132-142.

82. Maghrabie, H. M., Attalla, M., Mohsen, A. A. (2021). Performance assessment of a shell and helically coiled tube heat exchanger with variable orientations utilizing different nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 182, 116013.
83. Niwalkar, A. F., Kshirsagar, J. M., Kulkarni, K. (2019). Experimental investigation of heat transfer enhancement in shell and helically coiled tube heat exchanger using SiO₂/water nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 18, 947-962.
84. Kulkarni, H. R., Dhanasekaran, C., Rathnakumar, P., Sivaganesan, S. (2021). Experimental study on thermal analysis of helical coil heat exchanger using Green synthesis silver nanofluid. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1037-1042.
85. Srinivas, T., Vinod, A. V. (2015). Heat transfer enhancement using CuO/water nanofluid in a shell and helical coil heat exchanger. *Procedia Engineering*, 127, 1271-1277.
86. Srinivas, T., Vinod, A. V. (2016). Heat transfer intensification in a shell and helical coil heat exchanger using water-based nanofluids. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 102, 1-8.
87. Kumar, P. M., Chandrasekar, M. (2019). CFD analysis on heat and flow characteristics of double helically coiled tube heat exchanger handling MWCNT/water nanofluids. *Heliyon*, 5(7), e02030.
88. Palanisamy, K., Kumar, P. M. (2019). Experimental investigation on convective heat transfer and pressure drop of cone helically coiled tube heat exchanger using carbon nanotubes/water nanofluids. *Heliyon*, 5(5), e01705.
89. Bhanvase, B. A., Sayankar, S. D., Kapre, A., Fule, P. J., Sonawane, S. H. (2018). Experimental investigation on intensified convective heat transfer coefficient of water based PANI nanofluid in vertical helical coiled heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 128, 134-140.
90. Ardekani, A. M., Kalantar, V., Heyhat, M. M. (2019). Experimental study on heat transfer enhancement of nanofluid flow through helical tubes. *Advanced Powder Technology*, 30(9), 1815-1822.
91. Rakhsha, M., Akbaridoust, F., Abbassi, A., Majid, S. A. (2015). Experimental and numerical investigations of turbulent forced convection flow of nano-fluid in helical coiled tubes at constant surface temperature. *Powder Technology*, 283, 178-189.
92. Rasheed, A. H., Alias, H. B., Salman, S. D. (2021). Experimental and numerical investigations of heat transfer enhancement in shell and helically microtube heat exchanger using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106547.
93. Abu-Hamdeh, N. H., Almitani, K. H. (2016). Solar liquid desiccant regeneration and nanofluids in evaporative cooling for greenhouse food production in Saudi Arabia. *Solar Energy*, 134, 202-210.
94. Said, Z., Rahman, S. M. A., Assad, M. E. H., Alami, A. H. (2019). Heat transfer enhancement and life cycle analysis of a Shell-and-Tube Heat Exchanger using stable CuO/water nanofluid. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 306-317.

95. Mahmoudi, M., Tavakoli, M. R., Mirsoleimani, M. A., Gholami, A., Salimpour, M. R. (2017). Experimental and numerical investigation on forced convection heat transfer and pressure drop in helically coiled pipes using TiO_2 /water nanofluid. *International Journal of Refrigeration*, 74, 627-643.
96. Fule, P. J., Bhanvase, B. A., Sonawane, S. H. (2017). Experimental investigation of heat transfer enhancement in helical coil heat exchangers using water based CuO nanofluid. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2288-2294.
97. Ali, H. M., Babar, H., Shah, T. R., Sajid, M. U., Qasim, M. A., Javed, S. (2018). Preparation techniques of TiO_2 nanofluids and challenges: a review. *Applied Sciences*, 8(4), 587.
98. He, Y., Men, Y., Zhao, Y., Lu, H., Ding, Y. (2009). Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO_2 nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions. *Applied Thermal Engineering*, 29(10), 1965-1972.
99. Rao, V. N., Sankar, B. R. (2019). Heat transfer and friction factor investigations of CuO nanofluid flow in a double pipe U-bend heat exchanger. *Materials Today: Proceedings*, 18, 207-218.
100. Elmnefi, M., Abdullah, R. (2021). Experimental study of heat transfer enhancement using Al_2O_3 /water and TiO_2 /water nanofluids in a shell-and-tube heat exchanger. *Heat Transfer Research*, 52(18), 15-37.
101. Huminic, G., Huminic, A. (2018). Hybrid nanofluids for heat transfer applications—a state-of-the-art review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 82-103.
102. Huminic, G., Huminic, A., Dumitrache, F., Fleacă, C., Morjan, I. (2020). Study of the thermal conductivity of hybrid nanofluids: Recent research and experimental study. *Powder Technology*, 367, 347-357.
103. Uysal, C., Gedik, E., Chamkha, A. J. (2019). A numerical analysis of laminar forced convection and entropy generation of a diamond- Fe_3O_4 /water hybrid nanofluid in a rectangular minichannel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(2), 391-402.
104. Khanlari, A. (2020). The effect of utilizing Al_2O_3 - SiO_2 /Deionized water hybrid nanofluid in A tube-type heat exchanger. *Heat Transfer Research*, 51(11), 991-1005.
105. Huminic, G., Huminic, A. (2020). A numerical approach on hybrid nanofluid behavior in laminar duct flow with various cross sections. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140(5), 2097-2110.
106. Karagoz, S., Afshari, F., Yildirim, O., Comakli, O. (2017). Experimental and numerical investigation of the cylindrical blade tube inserts effect on the heat transfer enhancement in the horizontal pipe exchangers. *Heat and Mass Transfer*, 53(9), 2769-2784.

107. Afshari, F., Zavaragh, H. G., Sahin, B., Grifoni, R. C., Corvaro, F., Marchetti, B., Polonara, F. (2018). On numerical methods; optimization of CFD solution to evaluate fluid flow around a sample object at low Re numbers. *Mathematics and Computers in Simulation*, 152, 51-68.
108. Ansys. (2017). ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg: ANSYS Inc.
109. Khanlari, A., Yılmaz Aydın, D., Sözen, A., Gürü, M., Variyenli, H. İ. (2020). Investigation of the influences of kaolin-deionized water nanofluid on the thermal behavior of concentric type heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*, 56(5), 1453-1462.
110. Sözen, A., Variyenli, H. İ., Özdemir, M. B., Gürü, M., Aytaç, I. (2016). Heat transfer enhancement using alumina and fly ash nanofluids in parallel and cross-flow concentric tube heat exchangers. *Journal of the Energy Institute*, 89(3), 414-424.
111. Khanlari, A., Sözen, A., Variyenli, H. İ., Gürü, M. (2019). Comparison between heat transfer characteristics of TiO₂/deionized water and kaolin/deionized water nanofluids in the plate heat exchanger. *Heat Transfer Research*, 50(5), 435-450.
112. Sözen, A., Gürü, M., Khanlari, A., Çiftçi, E. (2019). Experimental and numerical study on enhancement of heat transfer characteristics of a heat pipe utilizing aqueous clinoptilolite nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114001.
113. Malika, M., Sonawane, S. S. (2022). The sono-photocatalytic performance of a Fe₂O₃ coated TiO₂ based hybrid nanofluid under visible light via RSM. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 641, 128545.
114. Dynamic Light Scattering (DLS)-Instruction Manual. (2011). Malvern Instrum. Ltd., UK.
115. Chinnam, J., Das, D., Vajjha, R., Satti, J. (2015). Measurements of the contact angle of nanofluids and development of a new correlation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 62, 1-12.
116. Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons.
117. Coronel, P., Sandeep, K. P. (2007). Pressure drop and friction factor in helical heat exchangers under nonisothermal and turbulent flow conditions. *Journal of Food Process Engineering*, 26(3), 285-302.
118. Kunes, J. (2012). *Dimensionless physical quantities in science and engineering*, Elsevier.
119. Afshari, F., Tuncer, A. D., Sözen, A., Variyenli, H. İ., Khanlari, A., Gürbüz, E. Y. (2022). A comprehensive survey on utilization of hybrid nanofluid in plate heat exchanger with various number of plates. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 32, 241-264.

120. Khanlari, A., Tuncer, A. D., Sözen, A., Aytaç, İ., Çiftçi, E., Variyenli, H. İ. (2022). Energy and exergy analysis of a vertical solar air heater with nano-enhanced absorber coating and perforated baffles. *Renewable Energy*, 187, 586-602.
121. Tuncer, A. D. (2018). *Yeni tip havalı bir güneş kolektörünün tasarımı imalatı ve performans analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
122. Khanlari, A., Sözen, A., Variyenli, H. İ. (2019). Simulation and experimental analysis of heat transfer characteristics in the plate type heat exchangers using TiO₂/Water nanofluid. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 29 (4), 1343-1362.
123. Kulkarni, H. R., Dhanasekaran, C., Rathnakumar, P., Iqbal, S. M., Sivaganesan, S. (2022). Biosynthesized zinc nano fluid for helically coiled heat exchanger at constant heat flux. *Materials Today: Proceedings*, 58, 104-113.
124. Wang, C., Cui, Z., Yu, H., Chen, K., Wang, J. (2020). Intelligent optimization design of shell and helically coiled tube heat exchanger based on genetic algorithm. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 159, 120140.
125. Kannadasan, N., Ramanathan, K., Suresh, S. (2012). Comparison of heat transfer and pressure drop in horizontal and vertical helically coiled heat exchanger with CuO/water based nano fluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 42, 64-70.
126. Sepehr, M., Hashemi, S. S., Rahjoo, M., Farhangmehr, V., Alimoradi, A. (2018). Prediction of heat transfer, pressure drop and entropy generation in shell and helically coiled finned tube heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*, 134, 277-291.
127. Noorbakhsh, M., Pourfallah, M., Ajarostaghi, S. S., Zaboli, M. (2020). Numerical evaluation and the effects of geometrical and operational parameters on thermal performance of the shell and double coil tube heat exchanger. *Heat Transfer*, 49(8), 4678-4703.
128. Sunu, P. W., Anakottapary, D. S., Susila, I. D. M., Santosa, I. D. M. C., Indrayana, I. N. E. (2020). Study of thermal effectiveness in shell and helically coiled tube heat exchanger with addition nanoparticles. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569(3), 032038.
129. Tiwari, A. K., Ghosh, P., Sarkar, J. (2015). Particle concentration levels of various nanofluids in plate heat exchanger for best performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 1110-1118.
130. Barzegarian, R., Keshavarz Moraveji, M. Aloueyan, A. (2016). Experimental investigation on heat transfer characteristics and pressure drop of BPHE (brazed plate heat exchanger) using TiO₂-water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 11-18.

131. Gürbüz, E. Y., Variyenli, H. İ., Sözen, A., Khanlari, A., Ökten, M. (2021). Experimental and numerical analysis on using CuO-Al₂O₃/water hybrid nanofluid in a U-type tubular heat exchanger. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 31(1), 519-540.
132. Srinivas, T., Venu Vinod, A. (2013). Performance of an agitated helical coil heat exchanger using Al₂O₃/water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51, 77-83.
133. Elshazly, K. M., Sakr, R. Y., Ali, R. K., Salem, M. R. (2017). Effect of γ -Al₂O₃/water nanofluid on the thermal performance of shell and coil heat exchanger with different coil torsions. *Heat and Mass Transfer*, 53(6), 1893-1903.
134. Panahi, D., Zamzamian, K. (2017). Heat transfer enhancement of shell-and-coiled tube heat exchanger utilizing helical wire turbulator. *Applied Thermal Engineering*, 115, 607-615.



GAZİ GELECEKTİR..