



**NANOAKIŞKANLI MİNİ KANALLARDA  
OPTİMUM TASARIM PARAMETRELERİNİN  
YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

**Şeyma ELBAŞ**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji Bilim Dalı  
Prof. Dr. Bayram ŞAHİN  
2018  
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NANOAKIŞKANLI MİNİ KANALLARDA OPTİMUM TASARIM  
PARAMETRELERİNİN YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE  
BELİRLENMESİ**

**Şeyma ELBAŞ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2018**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

NANOAKIŞKANLI MİNİ KANALLARDA OPTİMUM TASARIM  
PARAMETRELERİNİN YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Prof. Dr. Bayram ŞAHİN danışmanlığında, Şeyma ELBAŞ tarafından hazırlanan bu çalışma, 16/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı - Enerji Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (3./3.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Kenan YAKUT

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 16.08./2018 tarih ve 33./19 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### NANOAKIŞKANLI MİNİ KANALLARDA OPTİMUM TASARIM PARAMETRELERİNİN YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Şeyma ELBAŞ

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Endüstriyel uygulamalarda ısı transferinin iyileştirilmesi amacıyla farklı teknikler uygulanmakta ve sistemlerin ısı performansını artırmaya yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Su, sentetik yağ (motor yağı), etilen glikol gibi temel ısı transferi akışkanlarına nano boyutlarındaki katı partiküllerin belirli oranlarda eklenmesi, akışkanın ısı transferi performansını artıran bir yöntemdir. Bu çalışmada iş akışkanı olarak SiO<sub>2</sub>-Su nanoakışkanı farklı hacimsel konsantrasyonlarda (0, %0,4 ve %0,8), Reynolds sayısı (Re) 300, 600 ve 900, kanal çapı (D) 1.2 mm, 1.55 mm ve 1.9 mm olarak seçilmiştir. Dairesel minikanallarda SiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanlarının zorlanmış taşınım ile ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri belirlenmiştir. Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) yardımıyla sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı için Reynolds sayısı, kanal çapı ve partikül hacimsel oranının bir fonksiyonu olarak modeller kurulmuştur.

**2018, 80 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Nanoakışkan, minikanal, ısı transferi, yanıt yüzey yöntemi, optimizasyon

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **OPTIMUM DESIGN PARAMETERS OF MINICHANNELS WITH NANOFLUIDS USING RESPONSE SURFACE METHOD**

Şeyma ELBAŞ

Ataturk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering  
Department of Energy

Supervisor: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

In industrial applications different techniques are applied to improve the heat transfer and studies are being conducted to improve the thermal performance of the systems. The addition of nano-sized solid particles at certain ratios to basic heat transfer fluids such as water, synthetic oil (engine oil), ethylene glycol is a method of increasing the heat transfer performance of the fluid. In this study, SiO<sub>2</sub>-Water nanofluid as a working fluid has different volume concentrations (0, 0,4% and 0,8%), Reynolds number (Re) are 300,600 and 900, channel diameter (D) are 1.2 mm, 1.55 mm and 1.9 mm. In circular minichannels, heat transfer and pressure drop characteristics of SiO<sub>2</sub>-water nano-fluids have been tried to be determined by forced convection. Models were established as a function of Reynolds number, channel diameter and particle volume ratio for the friction factor and Nusselt number with the help of Response Surface Method (RSM).

**2018, 80 pages**

**Keywords:** Nanofluid, minichannel, heat transfer, response surface method, optimization

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda, geniş bilgi ve tecrübelerini en güzel şekilde aktaran, desteğini esirgemeyen değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Bayram ŞAHİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarımın tüm aşamasında bana yol gösteren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY'a, fikir ve düşüncelerini esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdussamet Subaşı'na, Arş. Gör. Murat CEYLAN'a ve emeği geçen herkese çok teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her döneminde, her konuda desteğini hissettiğim sevgili eşim Özgür ELBAŞ ve canım kızım Defne Naz ELBAŞ'a şükranlarımı sunarım.

**Şeyma ELBAŞ**

**Temmuz, 2018**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Literatür Taraması .....	1
1.1.1. Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin incelenmesi .....	1
1.1.2. Nanoakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü Karakteristiklerin İncelenmesi.....	8
1.1.3. Minikanalarda Isı Transferinin İncelenmesi .....	13
<b>2. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>17</b>
2.1. Isı Transferinin İyileştirilmesi .....	17
2.1.1. Aktif yöntemler .....	17
2.1.2. Pasif yöntemler.....	18
2.2. Nanoakışkan Kavramı .....	19
2.2.1. Nanoakışkanların hazırlanması .....	20
2.2.2. Nanokışkan türleri .....	21
2.2.3. Nanoakışkanların ısı iletkenliği.....	22
2.2.4. Nanoakışkanların viskozitesi.....	24
2.2.5. Nanoakışkanların uygulama alanları .....	26
2.2.6. Nanoparçacıkların ısı transferine etkileri .....	28
2.3. Isı Transferi Kavramı .....	29
2.3.1. Isı iletimi (Kondüksiyon) .....	29
2.3.2. Taşınım (Konveksiyon).....	30
2.3.3. Işınım (Radyasyon) .....	32
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>33</b>
3.1. Yanıt Yüzey Yöntemi.....	33

3.2. Deney Sistemi.....	36
3.2.1. SiO <sub>2</sub> Nanoakışkanının Hazırlanması .....	38
3.2.2. Nanopartiküller.....	39
3.2.3. Test Bölgesi .....	40
3.2.4. Ultrasonik homojenizatör .....	40
3.2.5. Çift cidarlı cam reaktör.....	41
3.2.6. Hassas terazi .....	42
3.2.7. Debimetre .....	43
3.2.8. Sirkülatörlü su banyosu .....	44
3.2.9. Pompa.....	44
3.2.10. Veri okuma kartı.....	45
3.2.11. Termoelemanlar.....	46
3.2.12. Basınç transdüseri.....	48
3.2.13. Güç kaynağı.....	48
3.3. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi .....	50
3.4. Belirsizlik Analizi.....	52
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>54</b>
4.1. Boş Kanal Deney Sonuçları .....	54
4.2. Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile Matematiksel Modelleme .....	56
4.3. Isı transferi ve Sürtünme Karakteristikleri .....	63
4.4. Optimizasyon.....	69
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>74</b>
KAYNAKLAR .....	78
ÖZGEÇMİŞ .....	81



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Akış Alanı (m <sup>2</sup> )
C <sub>m</sub>	Kütlesel Oran
C <sub>v</sub>	Hacimsel Oran
D	Boru Çapı (mm)
f	Sürtünme Faktörü
h	Isı Taşınım Katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
I	Akım (A)
k	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
L	Test Bölgesi Uzunluğu (m)
m	Akışkanın Kütlesel Debisi (kg/s)
m <sub>n</sub>	Nanoakışkan Kütlesi (kg)
m <sub>p</sub>	Nanopartikül Kütlesi (kg)
Nu	Ortalama Nusselt Sayısı
Pr	Prandtl Sayısı
Q	Isı Miktarı (W)
Re	Reynolds Sayısı
T <sub>ç</sub>	Akışkanın Çıkış Sıcaklığı (°C)
T <sub>g</sub>	Akışkanın Giriş Sıcaklığı (°C)
T <sub>ort</sub>	Akışkanın Ortalama Sıcaklığı (°C)
T <sub>s</sub>	Yüzey Sıcaklığı (°C)
V	Ortalama Akışkan Hızı (m/s)
V <sub>n</sub>	Nanoakışkanın Hacmi (m <sup>3</sup> )
x	Bağımsız Değişken
μ	Akışkanın Dinamik Viskozitesi (kg/ms)
ρ	Akışkan Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
ρ <sub>n</sub>	Nanoakışkanın Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
ρ <sub>p</sub>	Nanopartikülün Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
φ	Hacimsel partikül oranı

**Alt İndisler:**

l	Temel Akışkan
m	Kütlesele
n	Nanoakışkan
p	Partikül
v	Hacimsel
ort	Ortalama
s	yüzey



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Deneysel strateji.....	35
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin resmi .....	37
Şekil 3.3. Test bölgesi.....	40
Şekil 3.4. Ultrasonik homojenizatör .....	41
Şekil 3.5. Çift cidarlı cam reaktör.....	42
Şekil 3.6. Hassas terazi .....	43
Şekil 3.7. Debimetre .....	43
Şekil 3.8. Sirkülatörlü su banyosu .....	44
Şekil 3.9. Pompa .....	45
Şekil 3.10. Veri okuma kartı.....	46
Şekil 3.11. Termoelemanlar için kalibrasyon deklemleri .....	46
Şekil 3.12. Basınç transdüseri.....	48
Şekil 3.13. Güç kaynağı.....	49
Şekil 3.14. Minikanallarda basınç kaybı ölçümü şematığı .....	51
Şekil 4.1. Saf suya ait Nusselt sayısının deneysel ve model tahminlerinin karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.2. Saf su sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması .....	55
Şekil 4.3. Tasarım değişkenlerinin Nusselt sayısı üzerindeki katkı yüzdeleri.....	62
Şekil 4.4. Tasarım değişkenlerinin sürtünme faktörü üzerindeki katkı yüzdeleri .....	62
Şekil 4.5. $\phi = 0$ için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi.....	63
Şekil 4.6. $\phi = 0$ için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi .....	63
Şekil 4.7. $\phi = 0,4$ için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi.....	64
Şekil 4.8. $\phi = 0,4$ için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi .....	64
Şekil 4.9. $\phi = 0,8$ için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi.....	65
Şekil 4.10. $\phi = 0,8$ için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi ....	65
Şekil 4.11. D=1,2 mm için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi .....	66
Şekil 4.12. D= 1,2 mm için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi .....	66
Şekil 4.13. D=1,55 mm için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi .....	67

<b>Şekil 4.14.</b> D= 1,55 mm için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi .....	67
<b>Şekil 4.15.</b> D=1,9 mm için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi .....	68
<b>Şekil 4.16.</b> D= 1,9 mm için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi .....	68
<b>Şekil 4.17.</b> Örnek bir pareto optimal yüzeyi .....	71
<b>Şekil 4.18.</b> Pareto yüzeyi .....	72



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri üzerine yapılan çalışmalara birkaç örnek Tawfik .....	3
Çizelge 1.2. Nanoakışkan viskozitesi özet çizelgesi .....	8
Çizelge 1.3. Mini/mikrokanallar için yapılan çalışma özetleri .....	15
Çizelge 2.1. Katı/sıvı süspansiyonları için efektif ısı iletkenlik modelleri .....	24
Çizelge 3.1. Farklı nanoakışkan hacimsel oranları için hesaplanan kütleler .....	39
Çizelge 3.2. SiO <sub>2</sub> nanopartikülün özellikleri .....	39
Çizelge 3.3. Belirsizlik değerleri .....	53
Çizelge 4.1. Çalışmada incelenen parametreler ve değerleri .....	56
Çizelge 4.2. Deney planı .....	57
Çizelge 4.3. Hesaplanan karakteristik büyüklükler .....	58
Çizelge 4.4. Nusselt sayısı (Nu) için ANOVA tablosu .....	59
Çizelge 4.5. Sürtünme faktörü (f) için ANOVA tablosu .....	60
Çizelge 4.6. Nusselt sayısı için doğrulama deney sonuçları .....	60
Çizelge 4.7. Sürtünme faktörü için doğrulama deney sonuçları .....	61
Çizelge 4.8. Çözüm kümesi ve amaç fonksiyonlarının aldığı değerler .....	73

## 1. GİRİŞ

Nanoakışkanlar mikro kanallar içinde çökme, tıkanma ve aşınma gibi problemler oluşturmadığından yüksek performans gösterir ve uzun ömürlü olur. Bu sebeple ısıtma ve soğutma gerektiren hemen hemen tüm sistemlerde güvenli ve etkili bir şekilde kullanılabilir ve enerji tasarrufu bakımından çok fayda sağlayabilir. Bunun yanı sıra performans, iş, güç, malzeme ve maliyet tasarrufunu önemli oranlarda iyileştirebilir.

Isı transferini iyileştirme alanında etkisi kanıtlanmış olan nanoakışkanların son on yılda, nanometre boyutlarında katı partiküllerin üretilmesiyle ısı transfer akışkanı olarak kullanılan nanoakışkanların taşınım karakteristiklerinin belirlenmesi ve ısı iletkenliklerinin belirlenmesi üzerine deneysel ve teorik çalışmaların yoğunluk kazandığı görülmektedir.

### 1.1. Literatür Taraması

Literatür taraması, var olan kaynaklar içerisinde belirli bir konunun detaylı biçimde araştırılması ve o konuya ait verilerin sistemli biçimde toplanması sürecidir. Bu taramanın temel amacı yazılacak konuyla ilgili kaynakları belirlemek ve konunun daha önce ele alınıp alınmadığını araştırıp, daha önce yapılmış olan çalışmaların izlediği yolu öğrenerek yapılan araştırmada hangi yöntemin uygun olduğuna karar vermektir.

#### 1.1.1. Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin incelenmesi

Bu literatür özetinde nanoakışkanların ısı iletkenlik, viskozite ve termal performansıyla ilgili yapılan çalışmalar verilmiştir.

Nanoakışkan ısı iletkenliği üzerinde partikül boyutlarının etkisini inceleyen Chopkar *et al.* (2006), nanopartiküllerin boyutlarını 10-80 nm aralığında değiştirmişlerdir. Küçük partikül boyutlarında partikül boyutu ile ısı iletkenlik arasındaki ilişkinin daha belirgin

olduğunu, nanopartikül boyutu ile nanoakışkan ısı iletkenliği arasında linner olmayan bir ilişki olduğunu gözlemlemişlerdir.

Nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerinde partikül boyutu ve sıcaklık etkisini inceleyen Patel *et al.* (2010) yaptıkları çalışmada nanopartikül ilavesiyle ısı iletkenliğin çok fazla arttığı ve bu artışın mevcut Maxwell modeliyle tahmin edilemeyeceği, ısı iletkenliğin sıcaklıkla doğru fakat partikül boyutuyla ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanının ısı iletkenliği üzerinde hacimsel partikül oran, partikül boyutu ve sıcaklık etkileri inceleyen Teng *et al.* (2010), yaptıkları çalışmada farklı hacimsel partikül oranlarında nanoakışkanlar (%0,5, %1, %1,5 ve %2 ) hazırlayıp, farklı partikül çapları (20 nm, 50 nm, ve 100 nm) kullanarak her bir nanoakışkan için 10°C, 30°C ve 50°C sıcaklıklarında ısı iletkenliğin değişimini incelemişlerdir. ısı iletkenliğin iyileştirilmesinde küçük partikül boyutuna sahip nanopartiküller ile hazırlanan nanoakışkanlarda Sıcaklık artışının daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir.

Cu- su nanoakışkanın termal iletkenliğine yüzey aktif madde ve pH değeri etkisini inceleyen (Li *et al.* 2008) , Cu-su nanoakışkanının termal iletkenliğinin pH değeri, nano süspansiyonlarının yüzey aktif madde konsantrasyonu ve nanopartikül hacimsel oranına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. yüzey aktif madde ve pH değeriyle birlikte yapılan cbelirtmişlerdir.

Lee *et al.* (1999) nanoakışkanların termal iletkenliklerini ölçmek için CuO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülü ve temel akışkan olarak su ve etilen glikol kullanmışlardır. Temel akışkanlara göre nanoakışkanlarda daha yüksek termal iletkenlik elde etmişlerdir. CuO-etilen glikol nanoakışkanında %4 hacimsel oranda %20'den fazla artış olmuştur. Termal iletkenlik hacimsel oranla lineer olarak artmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu nanoakışkanın termal iletkenliğinin hem nanopartiküllerin hem de temel akışkanın termal iletkenliğine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Çok düşük partikül hacimsel oranlarının ısı iletkenlik üzerinde etkilerini incelemek isteyen Patel *et al.* (2003) Au ve Ag nanopartiküllerini ve su ile hazırlanan nanoakışkanlarını kullanmışlardır. Ag-su nanoakışkanının %0.00026 hacimsel oranda ısı iletkenlikte %5-21 ve Au-su nanoakışkanının %0.011 hacimsel oranda ısı iletkenlikte %7-14 arasında artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ghozatloo *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada iki adım metodu kullanıp, aktifleştirilmiş grafini saf suya karıştırarak nanoakışkan hazırlamışlardır. Grafin fonksiyonelleştirilmesi için oksidatif madde olarak potasyum persülfat (KPS) kullanmışlardır. Ağırlıkça %0.01-0.05 aktif grafini saf su içerisine karıştırmışlar ve hazırladıkları nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda grafin konsantrasyonu arttıkça termal özelliklerin iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

Tawfik (2017) tarafından nanoakışkanlar için maksimum ölçülen termal iletkenlik artırımının verildiği araştırmalar yardımıyla Çizelge 1.1 hazırlanmıştır.

**Çizelge 1.1.** Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri üzerine yapılan çalışmalara birkaç örnek Tawfik (2017)

Kaynak	Partikül türü-boyutu (nm)	Temel akışkan	Hacimsel Partikül Oranı (%)	Isıl İletkenlik Artışı (%)	İncelenen Parametreler
(Masuda <i>et al.</i> 1993)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -13	Su	4,33	32	Partikül konsantrasyonu Akışkan hazırlama yöntemi
	SiO <sub>2</sub> -12		2,3	1,1	
	TiO <sub>2</sub> -27		4,35	11,6	
(Eastman <i>et al.</i> 1996)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -33	Su	5	29	Partikül konsantrasyonu Akışkan hazırlama yöntemi
	CuO-36			60	
	Cu-35	HE-200 yağ	0,052	44	
(Pak and Cho 1998)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -13	Su	4,33	32	Partikül boyutu Partikül termal iletkenliği
	TiO <sub>2</sub> -27		4,35	11,6	
(Li and Eastman 1999)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -38	Su	4,3	10	Partikül konsantrasyonu Partikül boyutu
		EG	5	18	
	CuO-24	Su	3,41	12	Partikül termal iletkenliği Temel akışkan türü
		EG	4	23	



Çizelge 1.1. (devam)

(Wang <i>et al.</i> 1999)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -28	Su	5,5	16	Partikül boyutu Akışkan hazırlama yöntemi
		EG	8	41	
		Makine yağı	7,4	30	
		Pompa yağı	7,1	20	
	CuO-23	Su	9,7	34	
		EG	14,8	54	
(Wang <i>et al.</i> 2002)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -29	Etilen glikol	4	17	Partikül konsantrasyonu Partikül boyutu Temel akışkan türü Akışkan hazırlama yöntemi
	CeO <sub>2</sub> -29		4	18	
	TiO <sub>2</sub> -40		4	13	
	CuO-33		4	17	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -28		4	16	
	ZnO-56		4	21	
(Xie <i>et al.</i> 2003)	Çok cidarlı CNTs Ø15×30, 000	De-iyonize su	1	7	Partikül konsantrasyonu Partikül termal iletkenliği Sıcaklık
		Etilen glikol	1	12,7	
(Patel <i>et al.</i> 2003)	Au-10/20	Su	0,00026	21	Partikül konsantrasyonu Sıcaklık
		Tolüen	0,011	8,8	
	Ag-10/20	Su	0,001	16,5	
(Wen and Ding 2004)	Çok cidarlı CNT Ø20×60, 000	Su	0,84	21	Partikül konsantrasyonu Sıcaklık
(Liu <i>et al.</i> 2005)	Çok cidarlı CNT Ø20~50	EG	1	12,4	Partikül konsantrasyonu Partikül şekli Temel akışkan türü
		Motor yağı	1	8,5	
(Murshed <i>et al.</i> 2005)	TiO <sub>2</sub> -15 (Küre)	De-iyonize su	5	30	Partikül konsantrasyonu Partikül şekli
	TiO <sub>2</sub> -Ø10×40 (silindir)		5	33	
(Chopkar <i>et al.</i> 2006)	Al70Cu30-20/40	EG	2,5	125	Partikül konsantrasyonu Partikül boyutu

Çizelge 1.1. (devam)

(Hwang <i>et al.</i> 2006)	Çok cidarlı CNT- Ø130×30 0,000/50, 000	Su	1	11,3	Partikül konsantrasyonu Partikül şekli Temel akışkan türü
	CuO-29		1	5	
	SiO <sub>2</sub> -12		1	3	
	CuO-33	EG	1	9	
(Wen and Ding 2006)	TiO <sub>2</sub> -34	Su	6,8	6	Partikül konsantrasyonu
(He <i>et al.</i> 2007)	TiO <sub>2</sub> -20	Su	2	4,2	Partikül konsantrasyonu
(Li and Peterson 2007)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -36	Su	6	28	Partikül konsantrasyonu Partikül boyutu Sıcaklık
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -47		6	26	
(Chopkar <i>et al.</i> 2008)	Al <sub>2</sub> Cu-31	Su	2	96	Partikül konsantrasyonu Partikül boyutu Temel akışkan türü
	Al <sub>2</sub> Cu-101		2	61	
	Ag <sub>2</sub> Al-33		2	106	
	Ag <sub>2</sub> Al-120		2	75	
	Al <sub>2</sub> Cu-31	Etilen glikol	2	84	
	Al <sub>2</sub> Cu-101		2	56	
	Ag <sub>2</sub> Al-33		2	96	
	Ag <sub>2</sub> Al-120		2	62	
(Oh <i>et al.</i> 2008)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -45	De-iyonize su	4	13,3	Partikül konsantrasyonu
(Beck <i>et al.</i> 2009)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -282	Su	4	17,7	Partikül konsantrasyonu Partikül boyutu
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -282	EG	3	16,3	
(Mintsa <i>et al.</i> 2009)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -36	Su	18	31	Partikül konsantrasyonu Partikül boyutu Sıcaklık
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -47		18	31	
	CuO-29		16	24	

Çizelge 1.1. (devam)

(Beck <i>et al.</i> 2010)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -12	Su	4	5,4	Partikül konsantrasyonu Partikül boyutu Temel Akışkan Türü
		Etilen glikol	4	14,3	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -10	Su- Etilen glikol karışımı (%50-%50)	3	11,3	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -50		3	
(Yu <i>et al.</i> 2010)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -15	Karosen	1	34,6	Partikül konsantrasyonu Sıcaklık
(Lee <i>et al.</i> 2011)	SiC-100	De-iyonize su	3	7,2	Partikül konsantrasyonu
(Khedkar <i>et al.</i> 2012)	CuO-25	Su	7,5	32,3	Partikül konsantrasyonu Sıcaklık
		Mono EG	7,5	21,3	
(Pakdaman <i>et al.</i> 2012)	Çift cidarlı CNT Ø5×20	Isı transfer yağı	2	15	Partikül konsantrasyonu Sıcaklık
(Sun <i>et al.</i> 2013)	SiO <sub>2</sub> -10	Su	1,2	11	Partikül konsantrasyonu
	SiO <sub>2</sub> -60		1,2	13	
(Cingarapu <i>et al.</i> 2014)	Sn- SiO <sub>2</sub> -50/100	TH66 (Thermi nol)	5	13	Partikül konsantrasyonu Partikül termal iletkenliği
(Karimi <i>et al.</i> 2015)	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -8	De-iyonize su	2	17,2	Partikül konsantrasyonu Sıcaklık
(Parametthanuwat <i>et al.</i> 2015)	AG-5/25	De-iyonize su	0,5	16	Partikül konsantrasyonu Akışkan hazırlama yöntemi
(Li <i>et al.</i> 2016)	SiC-30	Diametrik yağ	0,8	7,36	Partikül konsantrasyonu Sıcaklık Akışkan hazırlama yöntemi
(Khedkar <i>et al.</i> 2016)	TiO <sub>2</sub> -5	Etilen glikol	7	19,52	Partikül konsantrasyonu Sıcaklık
(Sadegh <i>et al.</i> 2016)	AG-10	Isı transfer yağı	0,6	36,3	Partikül konsantrasyonu Sıcaklık

Yeni nesil nanoakışkanların viskozitesindeki artış kanal içerisindeki ilerleyişi zorlaştırıp, ısı transferi performansını etkilediği için araştırmacılar nanoakışkan viskozitesini artıran parametreler üzerinde birçok çalışma yapmıştır. Literatürde klasik akışkanlar ile nanoakışkanların viskozite değerlerini kıyaslayabilmek için nanoakışkan viskozitesinin temel akışkan viskozitesine oranı olarak tanımlanan efektif viskozite değerleri belirlenmiştir.

$Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve  $TiO_2$  nanopartiküllerinin saf su içerisine süspansiyon edilmesinin viskozite üzerindeki etkileri gözlemek için çalışmalar yapan Masuda *et al.* (1993) nanoakışkanların viskozitelerini oda sıcaklığı ile  $67^\circ C$  sıcaklık aralığında ölçmüşlerdir. Su- $TiO_2$  nanoakışkanı için %4,3'lük hacimsel partikül oranında viskozitede %60 artış olduğu tespit edilmiştir.

Nguyen *et al.* (2007) partikül boyutu ve çeşidinin viskozite ve ısı transferi iyileştirmesine nasıl etki yapacağını incelemek için 36 nm ve 47 nm boyutlarında  $Al_2O_3$  ve 29 nm boyutundaki CuO partiküllerini kullanmışlardır. Çözeltilerini hacimsel olarak (%1-%9,4) hazırlamışlardır. Kritik olarak belirledikleri hacimsel konsantrasyon %4 olup, bu değer altında nanoakışkan viskozitesinde çok fazla bir değişkenlik görülmezken bu değerden daha büyük konsantrasyonlarda partikül boyutu arttıkça akışkan viskozitesinin de arttığını gözlemlemişlerdir.

Anoop *et al.* (2009b) 45nm, 150nm, 95nm, 100nm olan farklı boyutlardaki  $Al_2O_3$  nanopartiküllerini ele alarak temel akışkana göre nanoakışkan viskozitesindeki değişimi gözlemlemişlerdir. %8 ve %6 hacimsel konsantrasyonlar için aldıkları veriler neticesinde partikül boyutundaki artışın viskozite artışını azalttığı sonucuna varmışlardır.

Tavman *et al.* (2010) tarafından yapılan deneysel çalışmada  $SiO_2$  (12nm),  $TiO_2$  (21 nm) ve  $Al_2O_3$  (30nm) nanopartikülleriyle %2'ye kadar hacimsel partikül oranlarında hazırlanan su bazlı nanoakışkanların viskoziteleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmaya göre

nanoakışkan viskozite değerlerinin artan hacimsel partikül oranlarına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir.

**Çizelge 1.2.** Nanoakışkan viskozitesi özet çizelgesi Sundar *et al.* (2013b)

Kaynak	Partikül	Boyut(nm)	Temel akışkan	Sentez Yöntemi	Hacimsel konsantrasyon %	Viskozite artışı %
(Wang <i>et al.</i> 1999)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28	Su, EG	İki adım	6 3.5	86 39
(Das <i>et al.</i> 2003), (Putra <i>et al.</i> 2003)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38	Su	İki adım	1-4	46
(Prasher <i>et al.</i> 2006b)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27 40 50	PG	İki adım	3	29 36 24
(Chevalier <i>et al.</i> 2007)	SiO <sub>2</sub>	35 94 190	Etanol	İki adım	5 6 7	95 85 44
(He <i>et al.</i> 2007)	TiO <sub>2</sub>	95	Su	İki adım	1.18	11
(Garg <i>et al.</i> 2008)	Cu	200	EG	İki adım	2	24
(Lee <i>et al.</i> 2008)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30	Su	İki adım	0.3	2.90
(Anoop <i>et al.</i> 2009b)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45 150 95 100	Su	İki adım	8 8 6 6	6 3 77 57
(Chandrasekar <i>et al.</i> 2010)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43	Su	İki adım	5	136
(Kole and Dey 2010c)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<50	Motor yağı	İki adım	1.5	136
(Peyghambarzadeh <i>et al.</i> 2011b)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<50	Su	İki adım	0.1-1	37-49
(Yu <i>et al.</i> 2011)	AlN	50	EG	İki adım	0.1	1.195
(Yu <i>et al.</i> 2011)	AlN	50	PG	İki adım	0.1	1.375
(Lee <i>et al.</i> 2011)	SiC	<100	Su	İki adım	3	102
(Azmi <i>et al.</i> 2012), (Azmi <i>et al.</i> 2013)	SiO <sub>2</sub>	50	Su	İki adım	0-4.0	49

### 1.1.2. Nanoakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü Karakteristiklerinin İncelenmesi

Temel akışkan ve partikül tipi, partikül boyut ve şekilleri, hacimsel partikül yoğunluğu, gibi çeşitli etkenlerin nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerini ne ölçüde etkilediğini incelemek için birçok araştırma yapılmıştır.

Pak and Cho (1998), Sınır koşulu olarak sabit ısı akısını ele alıp, türbülanslı akışta  $Al_2O_3$  (13 nm)/su ve  $TiO_2$  (27 nm)/su nanoakışkanlarının taşınım ile ısı transferi performansını incelemişlerdir. Hacimsel olarak %2.78 nanoparçacık içeren  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanı kullanılarak taşınım ısı transferi katsayısında %75'e varan artışlar gözlenmiş olup  $TiO_2$  parçacıkları ile elde edilen artışın  $Al_2O_3$  parçacıkları ile elde edilene nazaran daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Li and Xuan (2002), ısı transferi performansını Cu/su nanoakışkanı için laminer ve türbülanslı akışta gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada ısı transferi katsayısındaki artışın %60'lara vardığı gözlenmiştir. Araştırmacılar, artan Reynolds sayısı ile birlikte ısı transferi katsayısı artışının yükseldiğini belirtmişler ve bu durumu ısı dağılımı (thermal dispersion) olayına bağlamışlardır.

Nanoakışkanların ısı transferine etkilerini araştırmak için Kim *et al.* (2009), yaptıkları deneysel çalışmada, sabit duvar ısı akısı uygulanan düz silindirik bir kanal içinde  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanıyla laminer ve türbülanslı akış için sonuçlar elde etmişlerdir. %3'lük hacimsel nanoparçacık oranı için ısı iletim ve ısı transferi katsayılarında sırasıyla %8 ve %20'lik artışlar olduğunu gözlemlemişlerdir.

Gherasim *et al.* (2009), Radyal akışlı bir soğutma cihazında su içerisine süspansiyon edilen  $Al_2O_3$  nanopartiküller ile sağlanan ısı transferi artışını deneysel olarak incelemişlerdir. Nanoakışkanların kullanımıyla ısı transferinin arttığı gözlenmiştir. Ortalama Nusselt sayısının artan partikül hacimsel oranı ve Reynolds sayısı ile arttığı ve diskler arasındaki mesafeyle azaldığı tespit edilmiştir.

Anoop *et al.* (2009),  $Al_2O_3$ /su nanoakışkanının nanoparçacık boyutunun ısı transferine olan etkisini incelemişlerdir. 45 nm ve 150 nm olmak üzere iki farklı boyuttaki nanoparçacıklar ile hazırlanan nanoakışkanların ısı transferi incelenmiş ve 45 nm boyutundaki parçacıkların daha yüksek ısı transferi artışı sağladıkları tespit edilmiştir.

Ding and Wen (2005), nanoakışkanlarda gözlemlenen yüksek ısı transferi artışını açıklamak amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, viskozite gradyanı, kesme kuvvetleri ve Brownian hareketi sonucu yaşanan nanoparçacık göçünü teorik olarak incelemişler ve nanoparçacık konsantrasyonunun kanalın merkezinden kanal duvarına gidildikçe azaldığını gözlemlemişlerdir. Parçacık dağılımının nanoakışkan termofiziksel özelliklerinin kanal kesiti boyunca değişmesine yol açacağı ve bu durumun akışın hız ve sıcaklık dağılımını etkileyeceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, hız ve sıcaklık dağılımındaki söz konusu değişikliklerin nanoakışkanlarda fazladan bir ısı transferi artışına neden olacağı açıklanmıştır.

Tam gelişmiş laminer akış bölgesinde  $Al_2O_3$  nanoakışkanlarının akış yapıları ve taşınımıyla ısı transferi Hwang *et al.* (2009) tarafından incelenmiştir. %0.3 nanopartikülün hacim fraksiyonuna karşılık ısı transfer katsayısında %8'lik bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Isı transfer katsayısındaki artışın ısı iletkenlikte gerçekleşen artıştan fazla olduğuna dikkat çekmişlerdir.

Yu *et al.* (2013), farklı bir temel akışkan içerisine süspansiyon edilmiş Cu nanopartiküllerinin zorlanmış ısı taşınım katsayısını incelemişlerdir. Terminol-59 içerisine %0.5 ve %0.75 hacimsel konsantrasyonlarda hazırlanan nanoakışkanların yüksek sıcaklıklar için mevcut korelasyonlar yardımıyla hesaplanan termofiziksel özelliklerde %2.0 dan daha düşük hacimsel oranlarda yaklaşık %18 iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak sıklıkla kullanılan Terminol-59 temel akışkanı içerisine Cu nanopartiküllerinin eklenmesi bu nanoakışkanının ticari uygulamalar için ilgi çekici olduğunu belirtmişlerdir.

Bir mikrokanal içindeki nanoakışkanların ısı transfer katsayısını deneysel olarak inceleyen Jung *et al.* (2009),  $Al_2O_3$  nanoakışkanları için sürtünme kayıplarında yüksek bir artış olmadan %1.8 nanopartikülün hacim fraksiyonunda ısı transfer katsayısında suya göre %32'lik bir artışın olduğunu tespit etmişlerdir.

Heris *et al.* (2006),  $Al_2O_3$  nanoakışkanlarının taşınımıyla ısı transferini sabit duvar sıcaklığına sahip bir boruda ve laminer akım şartlarında incelemişler ve nanopartikül hacim fraksiyonunun artmasıyla ısı transferinde önemli bir artışın gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Bu artışın sadece ısıl iletim katsayısındaki artış ile açıklanamayacağını belirtmişlerdir. Isı transfer katsayısındaki artışın klasik ısı transfer katsayısı korelasyonlardan elde edilen değerlere göre daha yüksek olması bu çalışmada dikkat çeken diğer bir sonuç olmuştur.

Laminar akış koşullarında,  $Al_2O_3$  -su nanoakışkanının ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri Heyhat *et al.* (2013) tarafından incelenmiştir. Artan hacimsel konsantrasyon ve Reynolds sayısı ile ısı transferinin arttığı belirtilmiştir. Yalnız, ısı transferindeki artışın sadece termal iletkenlikteki artıştan değil farklı parametrelerin de etkisinin olduğu belirtilmiştir. Temel akışkan içerisine nanopartiküllerin eklenmesi basınç düşümünün de artmasına neden olmuştur. %2.0 hacimsel oranda nanoakışkanın 5.67 kat saf suyunkinden daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

Su ve Etilen glikol içerisine süspanse edilmiş  $CuO$ ,  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  nanopartiküllerinin boru akışında ısı transferi ve akış karakteristiklerini sayısal olarak farklı hacimsel oranlar için ele alan Corcione *et al.* (2012), partikül hacimsel oranının optimum bir değerine kadar ısı transferi artan hacimsel oranla artmakta ve bu optimum değerden sonra ısı transferinde önemli oranda kötüleşme olduğunu gözlemlemişlerdir. Farklı nanoakışkanlar dikkate alındığında sabit pompalama gücünde ve ısı transferi miktarında göreceli sürtünme kaybı azalması büyük ölçüde temel akışkan tipine ve çok az miktarda nanopartikül malzeme tipine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

Azari *et al.* (2013), su bazlı  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  and  $TiO_2$  nanoakışkanlarının taşınım ısı transferi karakteristikleri sabit ısı akısı sınır şartında incelemişlerdir. Laminar akış şartlarında yapılan çalışmada  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  nanoakışkanlarının ısı transferinde önemli miktarda artış olduğunu gözlemlemişlerdir.  $Al_2O_3$  nanoakışkanları ile sağlanan ısı transferindeki artışın  $TiO_2$  partikülleri ile sağlanan artıştan daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.



Khanafer *et al.* (2003) su bazlı bakır nanoakışkan içeren bir kare kapalı ortamda doğal konveksiyonu gözlemlemişlerdir ve %20 hacimsel parçacık oranında ısı transferinde %25'e varan artışlar ortaya çıkacağını tespit etmişlerdir.

Saf Su- ve  $TiO_2$  den oluşan nanoakışkanın ısı transferi performanslarını ve akış karakteristiklerini inceleyen He *et al.* (2007), Bohlin CVO viskozimetresi kullanarak viskozite ölçümleri yapmışlardır. Yapılan çalışmada hacimsel oranın artışıyla nanoakışkanın viskozitesinin arttığı belirlenmiştir.

Zamzajian *et al.* (2011),  $Al_2O_3$  -Etilen Glikol ve CuO- Etilen Glikol nanoakışkanlarının zorlanmış konvektif ısı transfer katsayısını, çift borulu ve plaka tipi ısı değiştiricilerinde, türbülanslı akışta, incelemişlerdir. Çift borulu ısı değiştiricisinin gövdesinden 2.5 l/dk debide akan soğuk akışkan kullanılmış olup ısı değiştiricisinde her iki nanoakışkanın sıcaklıkları  $45^\circ C$ ,  $60^\circ C$  ve  $75^\circ C$ , nanoakışkanın hacimsel debisi ise 3 l/dk'dır. Elde edilen sonuçlara göre homojen dağılmış ve stabilize edilmiş nanopartiküllerin temel akışkanın zorlanmış konvektif ısı transfer katsayısını artırdığı tespit edilmiştir. İncelenen deneyde sırasıyla en az ve en fazla artış %3 ve %49 olmuştur. Sıcaklık ve nanopartikül konsantrasyonunun artışıyla konvektif ısı transfer katsayısının daha da artacağı belirtilmiştir. Teoriksel eşitliklerde nanopartiküllerin kirletme etkisinin, sıcaklığın, nanoakışkanı stabilize etme yöntemlerinin ve stabilize edici maddenin etkilerinin dikkate alınmaması gibi sebeplerden dolayı Daha yüksek sıcaklıklarda ve partikül konsantrasyonunda teoriksel ve deneysel sonuçlar arasında önemli bir tutarsızlık olduğunu belirtmişlerdir.

Çift borulu ısı değiştiricisi sistemi laminer akış rejiminde nanoakışkanın konvektif ısı transfer katsayısı Chun *et al.* (2008) tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmada, laminer akışta, akışkana nanopartikül eklenmesinin ortalama ısı transfer katsayısını artırdığı tespit edilmiştir. Nanopartiküllerin yüzey özellikleri, nanopartikül eklenmesi ve partikül şekli nanoakışkanların ısı transferi özelliklerini artıran ana faktör olarak gösterilmiştir. Isı transferindeki bu artışın nedeninin, partikül göçüyle cidarda oluşan yüksek partikül konsantrasyonu olabileceği belirtilmiştir.

### 1.1.3. Minikanallarda Isı Transferinin İncelenmesi

Mini ve mikro kanallar küçük boyut, düşük ağırlık, daha az miktarda iş akışkanına gerek duyup yüksek sistem verimliliğine ulaşabildiklerinden dolayı araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Literatürde yapılan çalışmaları incelediğimizde hidrolik çapa bağlı kanal sınıflandırmasında görüş ayrılıklarının olduğu görülmektedir. Kandlikar (2002a; 2002b) çalışmasında, 200 µm den büyük ve 3mm den küçük hidrolik çapa sahip kanalları mini kanal olarak sınıflandırmıştır. Çetin (2010) yaptığı çalışmada 1 mm den küçük 100 µm den büyük hidrolik çapa sahip kanalları mini kanal olarak isimlendirmiştir. Literatürde açık bir şekilde mikro, mini ve makro ölçekli kanallar arasındaki ayırım tam olarak belirlenemediği için mikrokanal isimlendirmesi farklı kaynaklara göre minikanal olarak isimlendirilebilir.

Maiga *et al.* (2005), 0.01m çapında ve 1 m uzunluğunda üniform olarak ısıtılan dairesel bir boruda su bazlı  $Al_2O_3$  ve etilen glikol bazlı  $Al_2O_3$  nanoakışkanlarının türbülanslı ve laminer akış için ısı transferlerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre etilen glikol-  $Al_2O_3$  nanoakışkanı için ısı transferindeki artışın su-  $Al_2O_3$  nanoakışkanı için olandan daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Al ve Zr nanoparçacıklarını kullanarak ısı taşınım katsayısındaki değişimleri inceleyen Rea *et al.* (2009), çalışmalarında sabit ısı akısında 4.5 mm iç çaplı boruda Zr için %3.5'lük konsantrasyonda ısı taşınım katsayısında %3'lük artış elde ederken, Al için %6'luk konsantrasyonda %27 artış elde etmişlerdir.

Wen and Ding (2004),  $Al_2O_3$  nanoparçacıklarını kullanıp farklı Re değerleri için h değerindeki değişimi gözlemlemişlerdir. İç çapın 4.5 mm ve uzunluğunun 970 mm olduğu bir boruda %1.6 hacimsel konsantrasyonda  $Al_2O_3$  /su nanoakışkanı için  $Re=1050$  ve  $Re=1600$ 'deki h için artışlar sırasıyla %41 ve %47'dir.

Karbon tabanlı olan grafen nanoparçacıklarını çalışmalarında kullanan Akhavan-Zanjani *et al.* (2014), Hacimce %0.005 ile %0.02 arasında değişen konsantrasyonda

hazırladıkları nanoakışkanı kullanarak sabit yüzey ısı akısı sınır şartı altında, 4.2 mm iç çap ve 2740.2 mm uzunluğa sahip düz dairesel bakır boruda taşınım ısı transferini araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde, ısı taşınım katsayısı için  $Re=10.850$ 'de %0.02 konsantrasyonda %6.04 ile en yüksek artış oranını bulmuşlardır.

Wen and Ding (2004),  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarında laminar akım şartlarında taşınım ısı transferini gözlemlemişlerdir. 970 mm uzunluğa, 4.5 mm iç çapa ve 6.4 mm dış çapa sahip bakır bir boru, boru yüzeyinde sabit ısı akı şartını oluşturmak için kullanılan 300 W gücünde bir ısıtıcı ve 10 l/dk'lık maksimum debiyi sağlamak için kullanılan peristaltik pompadan oluşan bir deney düzeneği kurmuşlardır. Bu deney düzeneğinde %0.6, %1 ve %1.6 şeklinde üç farklı hacimsel fraksiyonda hazırladıkları nanoakışkanları deney düzeneğinde incelemişlerdir. Deneylerin sonuçlarına göre Reynolds sayısı ve partikül hacimsel fraksiyonu ile taşınım ısı transferinin arttığını tespit etmişlerdir ve ısı taşınımında gerçekleşen iyileşmenin borunun giriş bölgesinde daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Literatürde Mikro/mini kanallarda ısı transferi ve akış karakteristiklerini kapsayan birçok çalışma vardır. Bu çalışmalardan bazıları Çizelge 1.3'te verilmiştir.

**Çizelge 1.3.** Mini/mikrokanallar için yapılan çalışma özetleri Salman *et al.* (2013)

Kaynak	Akışkan	Akış Karakteristiği	Çap	Reynolds Sayısı	Elde Edilen Bulgular
(Agarwal <i>et al.</i> 2010)	R134a	Laminer	0,424-0,939 mm	-	Yatay dairesel olmayan mikrokanallardaki soğutucu R134a'nın yoğuşması sırasındaki ısı transferi için bir korelasyon geliştirilmiştir.
(Bavière <i>et al.</i> 2006)	Demineralli ze su	laminer ve türbülanslı	700-200 µm	200-8000	Mikro ölçekteki laminer akışta Nusselt sayısında bir azalma meydana geldiği bildirilmiştir.
(Park and Punch 2008)	Deiyonize su	laminer	106-307 µm	69-800	Kullanılan parametrelerin değer aralığında içerisinde konvansiyonel tam gelişmiş akış teorilerinin kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir.
(Celata <i>et al.</i> 2010)	FC-72	laminer	480 µm	-	Isı transferi katsayısının ısı akısından oldukça bağımsız olduğu belirtilmiştir.
(Chen <i>et al.</i> 2009b)	Su	laminer	100 - 250 µm	200-1700	Kanal boyutlarındaki azalmayla birlikte yoğuşma ısı transferi hızının yükseldiği belirtilmiştir.
(Wojtan <i>et al.</i> 2006)	R134a ve R245fa	laminer	0,5 ve 0,8 mm	-	Isı transferi katsayısının akış hızı, ısıtılan uzunluk ve kanal boyutlarına güçlü bir şekilde bağlı olduğu belirlenmiştir.
(Ngo <i>et al.</i> 2007)	CO2	laminer	1,09 mm	250-2500	S şekilli kanatlara sahip mikrokanallı ısı değiştiricilerin basınç düşüm katsayısının zikzak şekilli kanatları olanlardan 4-5 kat daha az olduğu belirlenmiştir.
(Owhaib <i>et al.</i> 2004)	R134a	laminer	0,862-1,7 mm	-	Daha küçük çaplı kanallarda ısı transferi katsayısının daha yüksek olduğu ve sistem basıncındaki artışın ısı transferi performansını arttırdığı gözlenmiştir.
(Fang <i>et al.</i> 2010)	Su	laminer	100-300 µm	-	Küçük kanalların yüksek ortalama ısı akısına sahip olmaları sebebiyle daha elverişli olduğu belirtilmiştir.
(Lee <i>et al.</i> 2005)	Deiyonize Su	laminer	194-534 µm	300-3500	Isı transferi katsayısının debiye bağlı olarak kanal boyutundaki azalmayla birlikte arttığı belirlenmiştir.

Isı transferinin iyileştirilmesi ile ilgili literatürde çok fazla sayıda çalışma vardır. Bu çalışmada ise amaç nanoakışkan kullanılan mini kanallarda optimum tasarım değişkenlerinin yanıt yüzey yöntemiyle belirlenmesidir. Performans istatistiği olarak Nusselt sayısı, sürtünme faktörü dikkate alınmıştır. Çok parametrelili sistemlerde az deneysel veri ile maksimum veriye ulaşma, parametreler arasındaki önem derecesini belirlemede etkili olan bu çalışmayla sistem için en iyi sonucu veren parametre değerleri tespit edildiği için ısı transferini iyileştirmede büyük önem taşır.



## **2. KURAMSAL TEMELLER**

### **2.1. Isı Transferinin İyileştirilmesi**

Endüstrinin her alanında kullanılan ısı değiştircilerinde ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu alışmalar enerji ekonomisi açısından büyük önem taşımaktadır. Son yarım yüzyıldır ısı transferi konusunda yapılan bilimsel araştırmalar ısı transferi iyileştirme yöntemlerinin sürekli olarak gelişmesine neden olmuştur. Isı transferini arttırmak için aktif, pasif, karma olmak üzere 3 farklı yöntem kullanılır.

#### **2.1.1. Aktif yöntemler**

Dış g kaynağının kullanılmasını gerektiren yöntemler aktif yöntemler olarak adlandırılır. Aktif yöntemlerde ısı transfer edilen akışkana veya ortama dış bir kaynaktan ilave enerji verilerek ısı transferinde iyileşme sağlanır. Aşağıda kullanılan bazı dış g kaynaklarına örnek verilmiştir.

**Yüzey Titreşimi:** Alçak ve yüksek frekansta tek fazdaki ısı transferini arttırmak için kullanılır.

**Mekanik Araçlar:** Akışı tahrik eden ya da yüzeyi döndüren araçlardan meydana gelmektedir. Sanayi uygulamalarında döner ısı değiştircisi kanallarındaki ekipmanlara rastlanmaktadır.

**Enjeksiyon:** Sıvı akışındaki gözenekli bir ısı transfer yüzeyine gaz teminiyle ya da aynı sıvıyı ısı transfer alanında akışa karşı enjekte ederek kullanılan bir yöntemdir.

**Akışkan Titreşimi:** Birçok ısı değiştircisinin kütlesinin büyük olmasından dolayı daha pratik bir titreşim tekniğidir.

Elektrostatik Alanlar: Isı transfer yüzeyi çevresindeki elektrostatik alanlar daha büyük hacimde sıvının karışması için yönlendirilebilirler.

### 2.1.2. Pasif yöntemler

Dış güç kullanılmasına gerek duyulmayan yöntemler pasif yöntemlerdir. Pasif yöntemler ısı transferini önemli miktarda artırmasına rağmen, basınç düşümünü artırmak gibi dezavantajlar da ortaya çıkmaktadır. Pasif yöntemlerde iyileştirme için özel yüzey geometrileri ya da akışkan ilaveleri kullanılmaktadır.

Pürüzlü Yüzey Oluşturma: Talaşlı imalat ya da yeniden yapılandırma ile elde edilen yekpare yüzey ya da yüzeye bitişik olarak yerleştirilen bir elemanla oluşturulabilir.

Yüzey Kaplama: Yüzey metalik ya da metalik olmayan kaplama içermektedir. Yoğuşmayı sağlamak için kuru kaplama (Teflon) kullanılmaktadır.

Yüzey gerilimi, sökülüp-takılabilir türbülötörler, artırılmış yüzeyler, sargılı tüp yöntemleri de pasif yöntemlere örnek olarak verilebilir (Keleşoğlu 2010).

Türbülötörlerin ısı transferine etkisini inceleyen birçok çalışma vardır. C.X.Lin *et al.* (1999) sabit sıcaklık ve üniform giriş şartlarında girişteki türbülans seviyesinin üç boyutlu akışa ve giriş bölgesindeki ısı geçişine etkisini incelemişlerdir. Girişteki türbülans seviyesinin sürtünme faktörü ve Nusselt sayısına önemli etkilerinin girişten yalnızca kısa bir aksel mesafe içinde oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Yatay borulara konik tip türbülötör eklenmesiyle suyun zorlanmış taşınımını araştıran Anvari *et al.* (2011) deneylerde geçici akış rejimi kullanılmışlardır. Deneysel sonuçlar, korelasyon bağıntıları ile doğrulanmaktadır. Türbülötörler Daralan konik tip (DR dizisi olarak) ve genişleyen konik tip (GR dizisi) olmak üzere iki farklı şekilde yerleştirilmiştir Türbülötör eklenmesiyle basınç farkında belirgin bir artış olmasına

rağmen GR dizisinde %521, DR dizi-sinde ise %355 oranında Nusselt sayısının arttığı tespit edilmiştir.

Promvonge *et al.* (2006) yaptıkları çalışmada deneysel olarak üniform ısı akısı uygulanmış bir boru içerisine yerleştirilen konik türbülatorlerin ısı transfer üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Konik türbülatorleringirdap akış türünden kaynaklanan türbülansın etkilerinden faydalanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda Nusselt sayısı için türbülatorlü ısı transferindeki iyileşme, türbülatorsüz Nusselt sayısına oranla % 236–278 oranında arttığını tespit etmişlerdir.

## 2.2. Nanoakışkan Kavramı

Araştırmacıların en büyük hedefi, ısı transferi uygulamalarında en iyi verimi yakalamaktır. Bu verimi yakalamak amacıyla, ısı transfer yüzey alanını arttırmak, ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyde kanatçıklar kullanmak, mikrokanallar kullanmak gibi pek çok uygulama denenmiş, ancak bu metotlar ile istenilen verim elde edilememiştir. Ayrıca, ısı transferinde kullanılan akışkanların yetersiz termofiziksel özellikleri de verimin yüksek olmasını önlemiştir. Bu sebeplerden dolayı ısı transferinde istenilen verimi yakalamak için saf akışkanlara metal ya da metal olamayan parçacıklar eklenerek özellikleri çok iyi olan bir karışım elde edilmek istenmiştir.

Das *et al.* (2008) tarafından yapılan çalışmalarda saf akışkanlara mikrometre ( $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ ) ya da daha büyük boyutta parçacıklar eklemiştir. Eklenen bu mikroparçacıklar, akışın gerçekleştiği kanallarda tıkanma ve aşınma gibi problemler oluşturmuştur.

Saf akışkanlara eklenen mikro parçacıklar ile istenilen verim elde edilemediğinden araştırmalara devam edilmiş ve nanometre ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ) boyutundaki nanoparçacıkların baz akışkanlara eklenmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Choi (1995) tarafından yapılan çalışmada temel akışkan içine nano boyuttaki partiküller eklenerek elde ettiği bu yeni akışkanların özellikleri incelenmiştir. Isıl iletkenlikleri



yüksek olan nano boyuttaki katı partiküllerin (bakır, gümüş, alüminyum vs.) klasik ısı transferi akışkanının içine katılmasıyla elde edilen bu akışkana “nanoakışkan” denilmiştir. Nanoakışkanlar yüksek ısı iletkenliğine sahip, birçok nano boyut teknolojisinde rahatlıkla kullanılabilir, pratik uygulamalara uygun akışkanlardır.

### 2.2.1. Nanoakışkanların hazırlanması

Nanoakışkan, nano boyuttaki partiküllerin temel akışkan içerisine süspansiyon edilerek oluşturulan bir katı-sıvı karışımı değildir. Elde edilen nanoakışkanların kararlı ve dayanıklı bir süspansiyon oluşturması, partiküllerdeki topaklanmanın ihmal edilebilir bir düzeyde olması, akışkanın kimyasal özelliklerini değiştirmemesi gibi özellikleri de sağlaması gerekir.

Nanoakışkanları hazırlarken iki temel yöntem kullanılır.

1-Tek adım yöntemi

2-İki adım yöntemi

Tek adım yöntemindeki amaç, temel akışkan içerisinde nano partikül üretimidir. Nanopartiküller sıvı kimyasal yöntem veya direkt fiziksel buhar biriktirme tekniğiyle üretildiğinden nanopartikülün depolanması, kurutulması, taşınması ve dağılması önlenir. Bu sayede nanopartikülün topaklanması engellenir ve daha stabil bir nanoakışkan elde edilir. Fakat bu yöntemde sadece düşük buharlaşma basıncına sahip akışkanlar kullanıldığı için uygulama alanı kısıtlıdır (Li *et al.* 2009). Büyük ölçeklerde üretim yapılamaması ve maliyetinin yüksek olması bu yöntemin diğer dezavantajlarıdır.

İki adım yöntemi, kuru toz halinde üretilen nanopartiküllerin temel akışkan içine direkt olarak katılarak hazırlanması işlemidir. Nanoakışkanın hazırlanması işleminde, temel akışkan ile nanopartiküllerin karıştırılması esnasında nanopartiküller temel akışkan içinde topaklanır. Bu topaklanma sonucu ısı iletkenlik düşer ve kanallarda tıkanma meydana gelir. Bu nedenle bu yöntem kullanılırken süspansiyonun stabilitesini en iyi

şekilde sağlamak gerekir. Dengeli bir süspansiyon elde etmek için yaygın olarak uygulanan yöntemler;

- Çözeltinin PH değerini değiştirmek,
- Yüzey aktif madde çözeltileri kullanmak,
- Ultrasonik titreşimler uygulamaktır.

Nanopartiküllerin günümüzde üretilmiş halde hazır alabilmenin mümkün olmasından dolayı iki adım yöntemi oldukça çok kullanılmaktadır.

### **2.2.2. Nanokışkan türleri**

Nanokışkanlar nanopartiküllerin tipine bağlı olarak kapsamlı bir şekilde dört gruba ayrılabilir.

#### **1.Seramik Nanoakışkanlar**

Nanokışkanlar için denenen ilk maddeler seramik parçacıklardır. Seramikler oksitli ( $Al_2O_3$ ,  $CuO$ ), oksitsiz ( $SiC$ ) veya oksitli oksitsiz bileşimi olarak 3 gruba ayrılır. oksitli seramik nanoakışkanlar daha fazla dikkate alınmıştır. Masude *et al.* (1993) tarafından yapılan çalışmada %4.3 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -Su nanoakışkan hazırlanıp ısı iletkenlikte %30 artış elde edilmiştir.

#### **2. Saf Metal Nanoakışkanlar**

Saf metal nanoakışkanlar oksit seramik nanopartikülleriyle hazırlanan nanoakışkanlara göre daha az kullanılmıştır. Aynı hacimsel oranlı oksit seramik nanoakışkanlarına kıyasla saf metal nanoakışkanların ısı iletkenlikleri daha fazladır.

### 3. Alaşım Nanoakışkanlar

Uygulamalar için farklı materyaller geliştirmek adına metalleri farklı metallerle alaşımlamak iyi bir yoldur. (Ceylan *et al.* 2006). Ag-Cu, Ag-Al ve Al-Cu alaşım nanoparçacıklara örnek olarak verilebilir.

### 4. Karbon tabanlı nanoakışkanlar

Karbon esaslı maddelerin nanoakışkanlarda kullanılmasını cazip kılan etken, metale kıyasla düşük yoğunluklu ve büyük ısı iletkenliklerinin olmasıdır. Farklı akışkanlardaki tek katmanlı karbon nanotüp (SWCNT-single walled carbon nanotube), çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT- multi walled carbon nanotube) ve ultra-dağılmış elmas karbon tabanlı nanoakışkanlara örnek olarak verilebilir.

#### 2.2.3. Nanoakışkanların ısı iletkenliği

Temel ısı transferi akışkanların içine ilave edilen nano boyutlardaki katı partiküller ile elde edilen nanoakışkanlar yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahiptir. Akışkanın ısı transferi performansını arttırmada, ısı iletkenlik önemli bir etkidir. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini ölçmek için, geçici sıcak tel metodu, kararlı hal paralel plaka tekniği, sıcaklık salınım tekniği kullanılmaktadır.

Nanoakışkanların ısı iletkenliği, partikülün ve temel akışkanın ısı iletkenliğine bağlı olup nanopartiküllerin hacimsel oranının artışıyla artar. Bakır nanopartiküller ve sudan oluşan nanoakışkanın ısı iletkenliğini ele alan Xuan and Li (2000), nanopartikülün hacim kesrini %2.5 ten %7.5 artırdığında, nanoakışkanın ısı iletkenliğinin temel akışkanın ısı iletkenliğine oranının 1.24 ten 1.78 e arttığını gözlemlemişlerdir. Belirli bir hacim kesri için ısı iletkenlik artışı her temel akışkan türü için farklılık gösterir.

Taban akışkanının ısı iletkenliği, nanoparçacıkların ısı iletkenliği, hacim konsantrasyonu, nanoparçacıkların boyutu, nanoparçacıkların şekli,  $\phi$ 'ın etkisi, en-boy oranı, sıcaklık, kümeleşmenin etkisi nanoakışkanların ısı iletkenliğini değiştiren çeşitli faktörlerdir.

Nanoakışkanların ısı iletkenliğini tahmin etmek için teorik çalışmalar da yapılmıştır. Maxwell (1881) tarafından sadece küresel partiküller için geçerli olan bir model geliştirilmiştir. Genellikle daha büyük partiküllü katı-sıvı karışımlar için bir modeldir. Bu model için kullanılan formül;

$$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + (k_p - k_l)\phi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)\phi} \quad (2.1)$$

Hamilton ve Crosser (1962) iki fazlı karışımların ısı iletkenliği üzerine model geliştirmişlerdir. Küresel ve küresel olmayan partiküller dikkate alınmıştır. Efektif ısı iletkenlik formülü aşağıdaki gibidir:

$$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + (n-1)k_l - (n-1)(k_l - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_l + (k_l - k_p)\phi} \quad (2.2)$$

Küresel partiküller için  $n=3$ , silindirik partiküller için  $n=6$  alınır.  $n$  deneysel şekil faktörüdür ve  $n= 3/\psi$  olarak verilir.  $\psi$  küreselliktir ve kürenin yüzey bölgesinin partikülün yüzey bölgesine oranıdır. Hamilton-Crosser modelini kullanan Xuan and Li (2000)  $\psi$ ' nun 0.5 ten 1 e kadar farklı değerleri için nanoakışkanların ısı iletkenliğini ölçmüşlerdir.

Efektif ısı iletkenliğini hesaplamak için kullanılan diğer modellerde Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Katı/sıvı süspansiyonları için efektif ısı iletkenlik modelleri, (Choi *et al.* 2001)

Model	İfade	Açıklama
Wasp	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l - 2(k_l - k_p)\phi}{k_p + 2k_l + (k_l - k_p)\phi}$	Katı-sıvı karışımların ısı iletkenliğini hesaplamak için önerilmiştir.
Davis	$\frac{k_e}{k_l} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\phi} [\phi + f(\alpha)\phi^2 + 0(\phi^3)]$	Yüksek dereceli terimler rasgele dağılmış olan küreciklerin etkileşimlerini ifade etmektedir.
Bruggeman	$k_e = \frac{1}{4} [(3\phi-1)k_p + (2-3\phi)k_l] + \frac{k_l}{4} \sqrt{\Delta}$ $\Delta = [(3\phi-1)^2(k_p/k_l)^2 + (2-3\phi)^2 + 2(2+9\phi-9\phi^2)(k_p/k_l)]$	Homojen küresel partiküller içeren iki fazlı karışımlar için önerilmiştir
Yu-Choi	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + (k_p - k_l)(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)(1 + \beta)^3 \phi}$	İki fazlı karışımların etkili ısı iletkenliğini hesaplamak için alternatif bir teoridir.
Lu-Lin	$\frac{k_e}{k_l} = 1 + a\phi + b\phi^2$	Küresel ve küresel olmayan partiküller için geçerlidir. $\alpha=10$ için, $a=2.25$ , $b=2.27$ ; $\alpha=\infty$ için $a=3.00$ $b=4.51$ olur.

Çizelge 2.1’de yer alan  $k_e$  karışımın efektif ısı iletkenliği,  $k_p$  partikülün ısı iletkenliği,  $k_l$  temel akışkanın ısı iletkenliği,  $\phi$  partikülün hacimsel oranı,  $\alpha = k_p / k_l$ ,  $\beta$  ise nano katman kalınlığının partikül yarıçapına oranıdır. Nanoakışkanların efektif ısı iletkenliğini hesaplarken  $\beta= 0.1$  alınır.

#### 2.2.4. Nanoakışkanların viskozitesi

Nanoakışkanların ısı transferi performansını etkileyen önemli parametrelerden birisi de viskozitedir. Viskozite, bir akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç dirençtir ve

akışkanların olduğu tüm ısı uygulamalar için önemli bir özellik olmaktadır. Nanoakışkanların kullanıldığı sistemlerde pompalama gücünde fazladan bir artışın olmasına yol açan viskozite, ısı iletkenlik katsayısında sağlanan artışın sistem üzerindeki olumlu etkilerini büyük bir oranda azaltabilmektedir. Taşınım ısı transfer katsayısı viskoziteden etkilendiği için akışkan akışının olduğu mühendislik uygulamalarında ısı iletkenlik kadar viskozite de önemli bir özellik olmuştur.

Parçacık boyutu ve şekli, sıcaklık, parçacığın boyutsal dağılımı, kayma hızı, yüzey katkı maddesi ve hacim konsantrasyonu gibi bazı değişkenlerin nanoakışkanın viskozitesi üzerinde önemli etkileri vardır (Meng *et al.* 2012).

Nanoakışkanların viskozitesiyle ilgili literatürde birçok akademik çalışma mevcuttur. Farklı boyutlardaki  $Al_2O_3$  nanopartiküllerini su ve etilen glikol içerisinde süspansiyon ederek oluşturdukları nanoakışkanların viskozitelerinin değişimini deneysel olarak inceleyen Lu and Fan (2008), nanoakışkan viskozitesinin partikül boyutunda gerçekleşen bir artışla azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca 30 nm'den büyük partiküller içeren nanoakışkanlarda viskozitenin artan partikül boyutundan fazla etkilenmediğini tespit etmişlerdir. Murshed *et al.* (2008),  $Al_2O_3$ -su ve  $TiO_2$ -su nanoakışkanlarında partikül hacimsel fraksiyonun viskozite üzerindeki etkilerini gözlemlemişlerdir. %5'lik hacimsel fraksiyona karşılık  $Al_2O_3$ -su ve  $TiO_2$ -su nanoakışkanlarının viskozitelerinde sırasıyla %82 ve %86 oranında bir artışın gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Pastoriza-Gallego *et al.* (2011), atmosferik basınç altında CuO-Su nanoakışkan viskozitesini incelemişlerdir. Viskozite ölçümleri, atmosferik basınç altında, 283,15 K- 223,15 K sıcaklık değerleri arasında, 0,0016-0,017 hacimsel konsantrasyonlarda 11 nm ve 23 nm CuO-Su nanoakışkan için yapılmıştır. Ortalama tanecik çapı küçük olan nanoakışkanın viskozitesi, tanecik çapı büyük olan nanoakışkana göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Wang *et al.* (1999) yaptıkları deneyde parçacık hacimsel oranının viskozite ile arttığını tespit etmişlerdir. Küresel nanoparçacıklar içeren nanoakışkanlar için Einstein'ın ünlü formülüne dayanarak viskozite ifade edilebilir. Bu formül aşağıdaki gibidir:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 \pm 2.5\varphi) \quad (2.3)$$

Formülde yer alan  $\mu_{nf}$  nanoakışkanın viskozitesini,  $\mu_{bf}$  temel akışkanın viskozitesini,  $\varphi$  ise nanoparçacıkların hacimsel konsantrasyonunu ifade eder. Einstein formülü  $\varphi < 0.02$  olduğu durumlarda daha uygun sonuçlar vermektedir. Einstein'ın formülünü geliştirmek için birçok çalışma yapılmıştır.

Orta derecedeki parçacık konsantrasyonu için Brinkman ortaya koyduğu çalışmada Einstein'ın formülünü geliştirdi. Bu formül aşağıdaki gibidir:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left( \frac{1}{(1-\varphi)^{2.5}} \right) \quad (2.4)$$

Geliştirilen bu formül ile %35'lik nanoparçacık konsantrasyonuna kadar uygun sonuçlar elde edilebilmektedir.

Brownian hareketinin etkisini de değerlendiren Batchelor ise 1977 yılında aşağıdaki formülü geliştirdi.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2) \quad (2.5)$$

Maiga ve Nguyen yaptıkları çalışmalarla 2006 yılında deneysel karışımlar için yarı ampirik bir ifade ortaya koydular. Bu model aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + (2.5\varphi) + (2.5\varphi)^2) + (2.5\varphi)^3 + \dots \quad (2.6)$$

### 2.2.5. Nanoakışkanların uygulama alanları

Nanoakışkanlar yüksek ısı özelliklerinden dolayı medikal uygulamalarda, otomotiv sektöründe, elektronik endüstrisinde, enerji üretiminde ve daha birçok alanda

kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Son zamanlarda endüstri, konut, ulaşım vs. sektörlerde de kullanımı artmaktadır. Aşağıda nanoakışkanların kullanıldığı uygulama alanlarından bazılarına örnek verilmiştir.

### **Elektronik sistem uygulamaları**

Elektronik cihazların kendi içlerinde ürettikleri ısı büyük bir sorun oluşturmaktadır. İleri düzeydeki elektronik cihazların düzgün bir şekilde çalışabilmeleri için güvenilir bir ısı yönetim sistemine ihtiyaç vardır. Elektronik ekipmanlar için ısı atımını iyileştirmede genellikle iki yol izlenir. İlk yol soğutma cihazlarının en uygun geometrisini bulmak, ikinci yol ise ısı iletim kapasitesini artırmaktır. Temel ısı transferi akışkanlarına kıyasla nanoakışkanlar yüksek termal özelliklere sahip olduğundan dolayı ısı transfer kapasitesini arttırmada iyi bir seçenek olmaktadır. CuO-su nanoakışkanının soğutma performansını mikrokanallı soğutucularda inceleyen Chein ve Chuang (2007), nanoakışkan kullanılan mikrokanallarda daha fazla ısı emilip daha düşük duvar sıcaklıklarına ulaşıldığını gözlemlemişlerdir. Bu uygulama ile nanoakışkanların elektronik cihazların soğutulmasında kullanılabileceği gösterilmiştir.

### **Ulaşım**

Taşıma endüstrisinde kullanılan otomobil, kamyon gibi araçların performansları arttıkça ısı atabilecekleri etkili akışkanlara da ihtiyaç artmaktadır. Soğutma sistemlerinde kullanılan antifriz-su karışımları, motor yağları ve sentetik yüksek sıcaklık ısı transferi akışkanları yapıları gereği yüksek termal performanslara sahip değildirler. Bu akışkanların kullanıldığı sistemlerde nanoakışkan kullanarak ısı kapasiteler artırılabilir. Nanoakışkanlar, ağırlığın ve ısı sistemlerinin karmaşıklığının azaltılmasında, araçların performansının iyileştirilmesinde verimliliği artırarak uzun ömürlü motor soğutma oranlarına ulaşılmasında, motor, pompa, radyatör ve diğer parçaların daha küçük ve hafif üretilmesini sağlamada önemli bir etken olmaktadır. Daha hafif araçlarla daha az yakıt harcanarak yakıt ekonomisi sağlanırken çevreye salınan zararlı emisyonların miktarı da azalacaktır.



## Isıtma ve soğutma sistemleri

Nanoakışkan kullanılarak ısıtma ve soğutma sistemlerinde ısı transfer kabiliyeti artırılabilir. Nanoakışkanların soğutucu akışkana ilave edilmesinin yanında ayrı bir kanalda dolaştırılması ile enerji etkinliği artırılabilir. Wu *et al.* (2009) soğutma sistemlerinin enerji depolama üzerine %0.2 yoğunluklu  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanını kullanarak deneysel çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda yaklaşık olarak donma süresinin %20.5 iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Uygulama performansının artırılabilmesi ve zamandan tasarruf sağlanabilmesi için soğutma sistemleri endüstrilerinde soğutucu olarak nanoakışkanlar kullanılabilir.

## Mikro-mekanik cihazlar

Yüksek güce sahip olan mikro elektro-mekanik sistemlerde (MEMS) yeterli soğutma kapasitesine sahip olmayan soğutkanlar kullanılamaz. Mikro kanallarda tıkanmadan yol alan nanoakışkanlar bu sistemlerde soğutucu akışkan olarak kullanılabilir ve böylece yüksek ısı akışı durumunda MEMS'lerin soğutma performansı artırılabilir.

### 2.2.6. Nanoparçacıkların ısı transferine etkileri

Akışkanların içerisine ilave edilen nano boyuttaki katı partiküller temel akışkanın ısı iletkenlik ve özgül ısı gibi termo-fiziksel özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğinden, akışkan ve katı çeperler arasındaki temas yüzeyini artırdığından, akışkan içerisindeki mikro boyuttaki çalkantılar ve türbülans şiddetini artırdığından dolayı ısı transferini önemli ölçüde iyileştirir. Nanopartiküller çok küçük boyutlarda olduklarından dolayı sıvıda mikro taşınımı ortaya çıkarıp ısı transferini artırır.

Nanopartiküllerin çökme ihtimalleri çok az olduğu için stabil bir nanoakışkan elde edilebilir. Böylelikle süspansiyonun en büyük sorunu olan partikül birikmesinin önüne geçilmiş olunur. Temel akışkan içerisine süspansiyon edilen nano boyuttaki partiküller, 1827 yılında botanikçi Robert Brown'un gözlemlediği gibi rastgele hareket

etmektedirler (Brown hareketi). Parçacıkların rastgele hareketi de ısı transferi artışında önemli rol oynamaktadır.

### 2.3. Isı Transferi Kavramı

Madde alış verişi olmaksızın sadece sıcaklık farkından meydana gelen enerji geçişi “Isı Geçişi” olarak tanımlanır. Termodinamiğin 2. kanununa göre, iki ortam arasında sıcaklık farkı varsa, ısı yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama geçer. Isınım geçişi ortam sıcaklıklarındaki farka bağlı olduğu kadar, ortam ve yüzeylerinin özelliklerine de bağlı olduğundan dolayı ısı transferi sistemi birbirinden farklı üç başlık altında incelenmelidir.

1. İletim (kondüksiyon)
2. Taşınım (konveksiyon)
3. Işınım (radyasyon)

#### 2.3.1. Isı iletimi (Kondüksiyon)

Bir cismin farklı sıcaklıktaki bölgeleri arasında, birbirleriyle temas halindeki parçacıklardan, yüksek enerji seviyesinde bulunanlardan, düşük enerji seviyesinde bulunanlara doğru geçen enerji, iletimle ısı geçişi olarak ifade edilir. Enerji geçişi katı, sıvı ve gaz ortamında gerçekleşebilir. Isı enerjisi katılarda atomlar arası mesafe çok küçük olduğundan ancak titreşim şeklinde oluşturulan hareketlerle meydana gelir. Sıvılarda moleküler arası etkileşim daha azdır ve moleküllerin çarpışmaları sırasında aktarılır. Gaz ortamlarda ise sıvı ortamlardaki gibi çarpışma neticesinde aktarım gerçekleşir. Isı iletimi Fourier yasası ile tanımlanır. Sabit kesit alanına sahip bir cisimden bir boyutlu, kararlı ısı iletimi aşağıda verilen denklemle ifade edilir:

$$Q_t = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

Fourier ısı iletim yasası kararlı hal durumunda bir boyutta ısı iletimi için kullanılır. Yukarıda denklemde yer alan  $dT/dx$  x yönündeki sıcaklık gradyanı, A ısı geçiş yüzey alanı ve k malzemenin bir özelliği olup ısı iletim katsayısını ifade eder.

### 2.3.2. Taşınım (Konveksiyon)

Aralarında sıcaklık farkı bulunan durgun bir ortam ile (katı yüzey) hareketli akışkan arasında meydana gelen ısı transferi türüne taşınım denmektedir. Eğer akışkan tamamen durağan kabul edilebiliyorsa, o takdirde sadece ısı iletiminin söz konusu olduğu bir katı ortam gibi ele alınabilir. Bu durum genellikle çok ince akışkan tabakaları için söz konusudur. Taşınım ile ısı geçişi akışkan özelliklerine, akış hızına ve sıcaklık farkına bağlıdır. Taşınım, sıcaklıkları farklı hareketli bir ortam ile bu ortamı çevreleyen yüzey arasında gerçekleşir.

Yüzey etrafındaki akışkanın hareketliliği, salt yüzey ve akışkan arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan kaldırma kuvvetleri nedeniyle oluyorsa, meydana gelen ısı geçişine Doğal Taşınım denir. Bu durumda herhangi bir dış etmenin zorlanması söz konusu değildir. Örnek olarak; bir sobadan ya da radyatörden çevresine taşınım ile olan ısı geçişi verilebilir.

Katı yüzey üzerinde akışkan hareketi bir dış etmen ile sağlanıyorsa bu duruma Zorlanmış Taşınım denir. Örnek olarak; bir güneş toplayıcısının cam yüzeyi üzerinde esen rüzgar nedeni ile oluşan ve bu akıma bağlı ısı geçişi, yüzeyinden ısıtılan bir boru içerisinden akan suya olan ısı geçişi ve ısı değiştirgeçlerinden (eşanjörlerden) olan ısı geçişi verilebilir.

Zorlanmış ısı taşınımı için iki ayrı akım türü söz konusudur. Bir yüzey üzerinde (levha, boru, vb.) sınırlandırılmayan serbest bir akışkan hareketi varsa, bu durum için Dış Akım tanımlaması yapılır. Akışkan hareketi yüzeyler tarafından sınırlandırılıyorsa (boru veya kanal içi akım gibi) bu durumda bir İç Akım'dan söz edilir.

Isı taşınımını Newton Soğuma yasası ile ifade edilir ve aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$Q_t = h.A.(T_s - T_\infty) \quad (2.8)$$

Formülde yer alan  $Q$  duvarla hareketli sıvı arasındaki ısı transferini,  $h$  ısı taşınım katsayısını,  $A$  ısı transferi yüzey alanını,  $T_s$  yüzey sıcaklığını ve  $T_\infty$  ortam sıcaklığını gösterir.

Isı taşınım katsayısının hesaplanması oldukça karmaşıktır. Deneysel olarak elde edilen ampirik bağıntılar yardımıyla bulunabilir. Isı taşınım katsayısı akışkanın özellikleri olan viskozite, yoğunluk, ısı iletim katsayısı, akışkanın rejimi (laminar, türbülans), akış geometrisi ve akışkanın hızına bağlıdır. Boyutu **SI** birim sisteminde  $W/m^2 K$  dir.  $h$  ısı transfer katsayısı akış koşullarının laminar veya türbülanslı olmasına göre farklılık gösterir. Boru içindeki akış koşullarını tanımlamak üzere aşağıdaki boyutsuz sayılar tanımlanır:

### Reynolds Sayısı

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (2.9)$$

Reynolds sayısı atalet ve viskoz kuvvetlerin oranı olarak tanımlanır.  $Re < 2300$  laminar akış ve  $Re > 10000$  türbülanslı akış için gösterge kabul edilir. Bu limitler arasında geçiş bölgesi tanımlanmıştır.

### Prandtl Sayısı

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (2.10)$$

Burada  $c_p$  sabit basınçta özgül ısı ve  $k$  ısı iletim katsayısıdır. Prandtl sayısı momentum ve ısı dağılımların oranı olarak tanımlanır ve yalnızca akışkanın türüne ve haline bağlıdır.

### Nusselt Sayısı

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.11)$$

Burada  $h$  ısı transfer katsayısıdır. Nusselt sayısı yüzeydeki boyutsuz sıcaklık gradyenini gösterir. Laminar akışta  $Nu$  sayısı sabittir, ancak türbülanslı akışta Reynolds sayısı ve Prandtl sayısının bir fonksiyonu şeklinde ifade edilir.

### 2.3.3. Işınım (Radyasyon)

Işınım (radyasyonla) ısı transferi, elektromanyetik dalgalar şeklinde veya fotonlar vasıtasıyla gerçekleşen ısı transferi şeklindedir. Işınım ısı transferinde herhangi bir ortama ihtiyaç duyulmamaktadır. Birbirini gören yüzeyler arasında sıcaklık farkı olduğu sürece ışınlama ısı transferi olduğunu söylemek mümkündür.

Işınım ısı transferi hızı yüzey alanının büyüklüğüne, cismin yüzey sıcaklığına, yayıcılığına bağlıdır. Isı enerjisinin ışınım yoluyla transferi 1884'de Boltzmann tarafından teorik olarak elde edilen bağıntı olan Stefan-Boltzmann yasası ile ifade edilir. Aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$Q = \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad (2.12)$$

Formülde yer alan  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabitidir ve *SI* birim sisteminde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / M}^2 \text{ K}^4$  şeklindedir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada mini kanallarda farklı hacimsel partikül oranlarındaki (%0, %0,4 %0,8) SiO<sub>2</sub>-Su nanoakışkanı kullanarak sürtünme ve ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. Tasarım değişkenleri olarak Reynolds sayısı (Re), boru çapı (D), hacimsel oran ( $\phi$ ) seçilmiştir. Performans istatistiği olarak nusselt sayısı, sürtünme faktörü dikkate alınmıştır. Yanıt Yüzey Yöntemi (YYT)'nden yararlanılarak tasarım parametrelerinin performans karakteristiği üzerine etkileri belirlenip, performans karakteristiği ile ilgili olan parametreler arasında modeller kurulmuştur. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü amaç fonksiyonu olarak seçilip fonksiyonu minimum yapacak tasarım değişkenlerini belirlemek amacıyla çok amaçlı optimizasyon yapılmıştır.

#### 3.1. Yanıt Yüzey Yöntemi

Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), 1951 yılında Box ve Wilson tarafından "Denemelerin Optimum Koşullara Ulaşması" ismi ile tanımlanıp geliştirilmiştir. YYY çok parametrelili sistemlerin hızlı bir şekilde iyileştirilebilmesini sağlayıp, En Küçük Kareler (Least Square) yöntemini kullanarak yanıt yüzeyinin tahmin edilmesini sağlar. Az deneysel veri ile maksimum veriye ulaşma, eş zamanlı olarak etkin parametreleri değiştirebilme, kolay optimizasyon imkanı, parametreler arasındaki etkileşimin belirlenip önemsiz parametrelerin çıkarılması gibi avantajları olan Yanıt Yüzey Yöntemi birçok mühendislik ve bilim dalında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda etkinliği araştırılan parametreleri kapsayan aralık ve bu bölgeye ait optimum noktayı tahmin etmek için yanıt yüzeyi oluşturulur. Bu çalışmalarda;

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) + \varepsilon \quad (3.1)$$

bağıntısı kullanılır. Bu fonksiyon deneysel verileri temsil etmektedir. Burada Y bağımlı yanıt değişkeni,  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  bağımsız değişkenlerin fonksiyonu,  $\varepsilon$  hata terimi

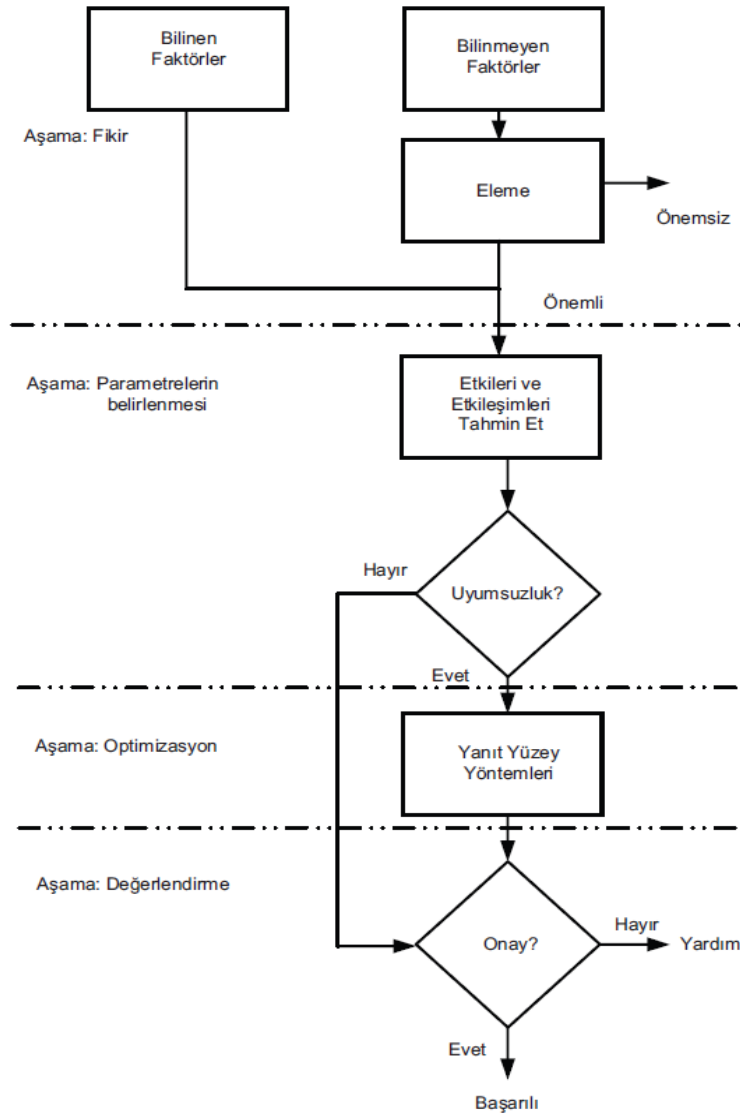
olarak adlandırılır. Yanıt yüzey yöntemi deney tasarımı, matematiksel modelleme, model doğrulama olmak üzere 3 aşamadan oluşmaktadır.

### **Deney Tasarımı:**

Deney tasarımı, maksimum bilgiye az sayıda deney yaparak ulaşma hedefidir. Parametreler arasındaki ilişkileri araştırmak ve bunlar arasında önemli olanlara ulaşmak deney tasarımı ile sağlanabilir. Deney çalışmalarında sonuç üzerinde çok sayıda etkin parametreler varsa bu tür çalışmalarda deney tasarımı yöntemini kullanmak aşağıda maddeler halinde verilen avantajları sağlayabilir (Subaşı 2010).

- Zaman ve maliyetten tasarruf
- Araştırma-geliştirme faaliyetlerinin hızlandırılması
- Kaynakların verimli kullanılması
- Deney sayısını minimum düzeyde tutmak
- Birkaç parametrenin eş zamanlı olarak değiştirilmesi
- Her bir parametrenin bağımsızca değerlendirilmesi

Deney tasarımında ön görülen strateji Şekil 3'teki gibi özetlenebilir (Turan ve Altundoğan 2011).



Şekil 3.1. Deneysel strateji

### Matematiksel Modelleme:

Matematiksel modelleme, yanıt üzerinde etkinliği belirlenmemiş olan birçok parametreden hangisinin sonuç üzerinde daha etkin olduğu hakkında önemli fikirler verir. Bu sayede araştırılacak faktörlerin sayısı azaltılıp parametrelerin alt ve üst limit değerleri hakkında bilgilere daha kolay ulaşılır. Matematiksel modelleme ile önemli olmayan parametreler önceden elenebildiğinden madden ve zaman açısından çok büyük avantaj sağlar. Birçok yanıt yüzey yöntemi probleminde, yanıt ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkiyi temsil eden ampirik bir modelin bulunup birinci aşamada toplanan



verilere uyum sağlayacak matematiksel modelin bulunması çok önemlidir. Yanıt yüzey yönteminde ikinci dereceden polinomiyal modeller esnekliği nedeni ile çok çeşitli fonksiyonel formlar alıp gerçek yanıt fonksiyonun tahmin edilmesinde kolaylık sağladığı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Eşitlik 3.2’de ikinci dereceden polinomiyal denklem modeli verilmiştir.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^N b_i X_i + \sum_{i=1}^N b_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^N b_{ij} X_i X_j \quad (3.2)$$

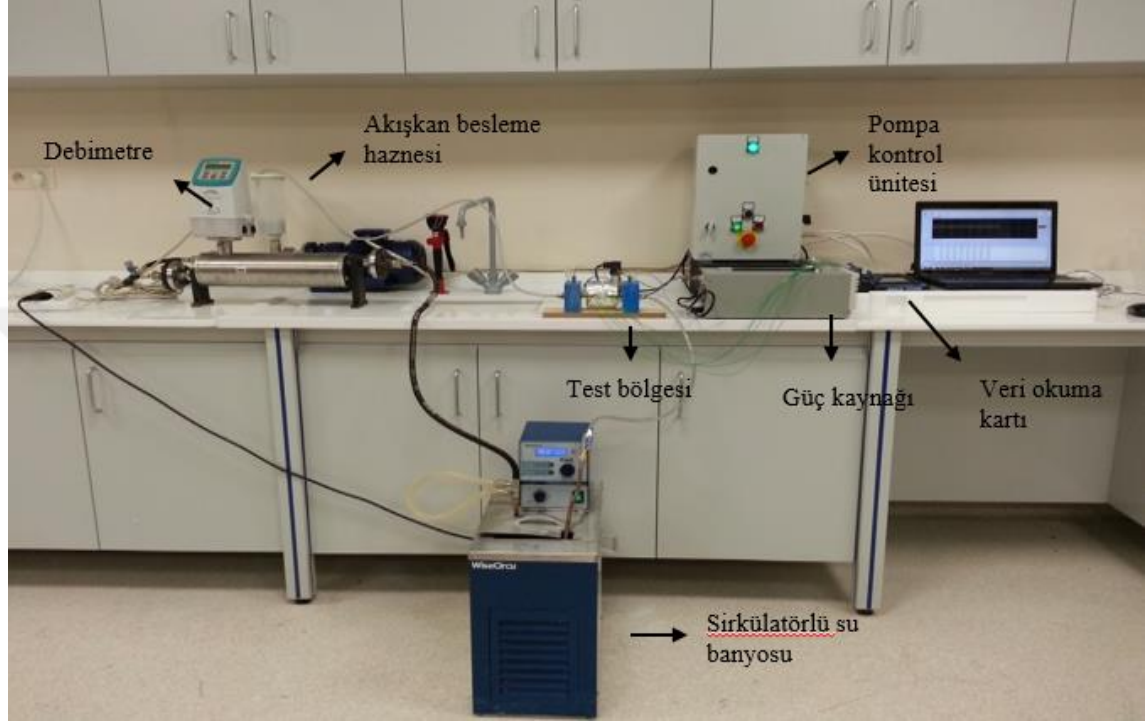
### Model Doğrulama:

Matematiksel model tahmin edildikten sonra bu denklemi kullanarak yapılacak tahminlerin ne derece hassas olacağını araştırılması ve bu denklemin ilişkiyi ne derece açıkladığını tespit edebilmek için model doğrulama gerekmektedir. Model doğrulamayı gerçekleştirmek için regresyon analizine hipotez testlerinin uygulanması, varyasyon katsayısının (C.V) hesaplanması, regresyon katsayısının ( $R^2$ ) hesaplanması, düzeltilmiş regresyon katsayısının hesaplanması ( $Radj^2$ ), hipotez testlerinin regresyon katsayılarına bireysel olarak uygulanması, kalıntı analizi gibi farklı test yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir. Deneyler üzerinde etkin olan parametrelerden bir veya birkaçı değiştirilerek doğrulama deneyleri yapıp elde edilen sonuçlar ile matematiksel modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılır. Karşılaştırılan sonuçlar arasındaki hata minimum düzeyde olursa modelin prosesi temsil ettiği kabul edilebilir.

### 3.2. Deney Sistemi

Pozitif yer değiştirmeli invertörlü pompa, İş akışkanı besleme haznesi, yüksek hassasiyetle okuma yapabilen kütleli debimetre, akışkanın sabit sıcaklıkta kalmasını sağlayan su banyosu, minikanal test bölgesi, güç kaynağı, minikanal giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkını belirlemek amacıyla kullanılan basınç transdüseri, minikanal test bölgesi üzerinde termokupllar yardımıyla farklı noktalardan alınan sıcaklık

değerlerini bilgisayara aktarmak için kullanılan datalogger deney düzeneğini oluşturmaktadır. Deney düzenek sistemi görsel olarak Şekil 3.2’de verilmiştir.



**Şekil 3.2.** Deney düzeneğinin resmi

Deneylede  $\text{SiO}_2$  nanopartiküllerden oluşan nanoakışkan ve saf su kullanılmıştır.  $\text{SiO}_2$  nanoakışkanları farklı hacimsel oranlarda (%0.4, %0.8) ele alınmıştır. İlk olarak iş akışkanını besleme haznesi doldurulup pompa çalıştırılır. İstenilen Reynolds sayısı değerine ulaşıldıktan sonra sisteme güç kaynağına bağlanan güç analizörü yardımıyla ısı enerjisi verilir. Termokupllar yardımıyla test bölgesinden alınıp datalogger yardımıyla bilgisayara aktarılan sıcaklık değerleri takip edilip sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Sistem kararlı hale geldikten sonra veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Bu çalışmada 1,2-1,55-1,9 mm iç çaplarında dairesel minikanallar kullanılmıştır. Reynolds sayısı 300-900 arasında ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Mevcut ısı transferi modelleri ile bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılıp incelenmiştir.

### 3.2.1. SiO<sub>2</sub> Nanoakışkanının Hazırlanması

Bu tez çalışmasında SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı kullanılmıştır. İki adım metodu ile hazırlanan nanoakışkanda ilk adım olarak nanopartiküllerin üretimi, ikinci adım olarak ise akışkan içerisine partiküllerin dağıtılması çeşitli yöntemler ile gerçekleştirilmiştir. Nanopartiküller için ele alınan hacimsel oranlar %0, 0.4 ve 0.8'dir.

Toplam akışkan hacmi içindeki nanopartikülün kütlesini belirlemek için aşağıdaki formüller kullanılacaktır.(Manay 2014)

$$C_v = \frac{\rho_n - \rho_{su}}{\rho_p - \rho_{su}} \quad (3.3)$$

Eş. 3.3'ten  $\rho_n$  bulunur ve Eş. 3.4'te yerine yazılarak,

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_n} \quad (3.4)$$

$m_n$  hesaplanır.

$$C_m = C_v \frac{\rho_p}{\rho_n} \quad (3.5)$$

3.5 denkleminde  $C_m$  hesaplanır ve Eş. 3.6'da yerine yazılarak  $m_p$  hesaplanır.

$$m_p = C_m \cdot m_n \quad (3.6)$$

$$m_{su} = m_n - m_p \quad (3.7)$$

$$\rho_{su} = \frac{m_{su}}{V_{su}} \quad (3.8)$$

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (3.9)$$

Eş. 3.7 ve 3.8 denklemlerinden suyun hacmi , Eş. 3.6 ve 3.9 denklemlerinden ise partikülün hacmi hesaplanır. Farklı hacimsel oranlar için hesaplanan kütleler Çizelge 3.1’de, nanoakışkanın özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Farklı nanoakışkan hacimsel oranları için hesaplanan kütleler

Hacimsel oran $C_v$	Akışkan Yoğunluğu $Kg/m^3$	Partikül Yoğunluğu $kg/m^3$	Nanoakışkan Yoğunluğu $kg/m^3$	Kütleli Oran $C_m$	Partikül Kütle gr	Suyun Kütle gr	Suyun Hacmi ml
0	997,78	2500	997,78	0	0	997,78	1000
0.004	997,78	2500	1003,78	0.0096	10	993,78	996
0.008	997,78	2500	1009,79	0.01980	20	989,79	992

**Çizelge 3.2.** SiO<sub>2</sub> nanopartikülün özellikleri

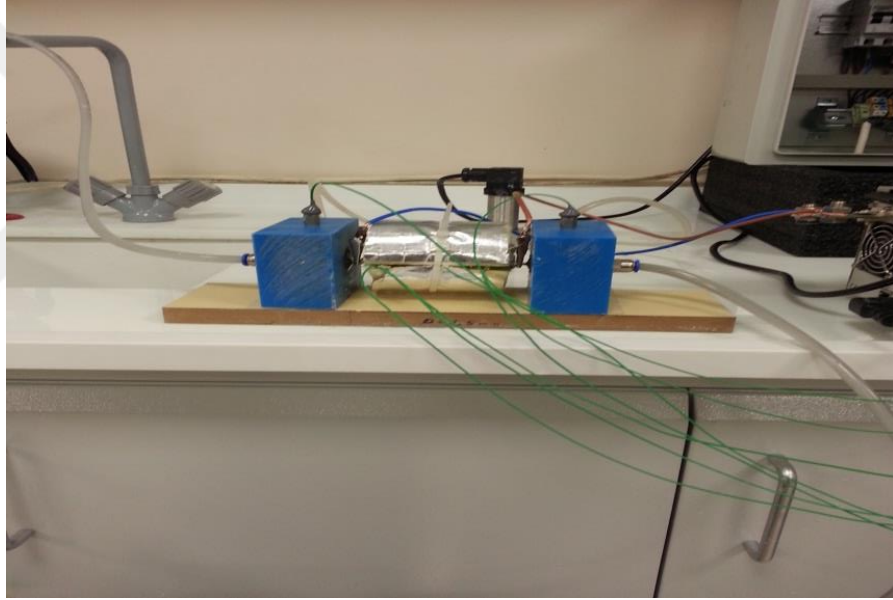
Adı	Silikon Dioksit
Moleküler Formülü	SiO <sub>2</sub>
Moleküler Ağırlığı	60.08 g/mol
Bulk Yoğunluğu	0.011 g/mL
Yoğunluk	2.2-2.6 g/mL (25 °C’da)
Partikül Boyutu	10-20 nm
Safılık	%99.5
Renk	Beyaz
Ergime Noktası	> 1600 °C
Kaynama Noktası	2230 °C

### 3.2.2. Nanopartiküller

Genellikle silika olarak adlandırılan silisyum dioksit, ortalama 15 nm boyutunda olup molekül ağırlığı 60,08 g/mol’dür. Kristal haline kuartz denir. Nanometre boyutunda silika maddesi, silikon bileşiklerinin buhar fazın hidrolize olması ile üretilir. Bu malzeme öncelikle kendine özgü uygulamalara ve özelliklere sahip olan gözenekli P-tipi silika ve küresel S-tipi silika olmak üzere iki yapı türüne ayrılmıştır.

### 3.2.3. Test Bölgesi

Test bölgesinde uzunlukları 10 cm olan çapları 1,2 mm, 1,55 mm ve 1,9 mm olan üç adet minikanal kullanılmıştır. Kestamit cinsinden olan bloklar arasına yerleştirilen minikanallar üzerinde, akış süresince ısı transferi akışkanının kanallara giriş yaptığı andan başlayarak mini kanalları terk edinceye kadar yüzey sıcaklık dağılımını belirlemek üzere 7 adet ısı çift kullanılmıştır. Test bölgesinde ısı kayıplarını önlemek için termal yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Test bölgesinin resmi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Test bölgesi

### 3.2.4. Ultrasonik homojenizatör

Tez çalışmasında iki adım yöntemine göre hazırlanan nanoakışkanlarda çökeltme ve topaklanma gibi olumsuzlukları ortadan kaldırmak için Ultrasonik homojenizatör kullanılmıştır. Hazırlanan nanoakışkan homojen hale gelip kararlı bir yapıya ulaşması için bu cihazda yaklaşık 7 saat bekletilmiştir. Bu cihazın bilgileri ve resmi (Şekil 3.4) aşağıda verilmiştir.

**Marka:** Hielscher

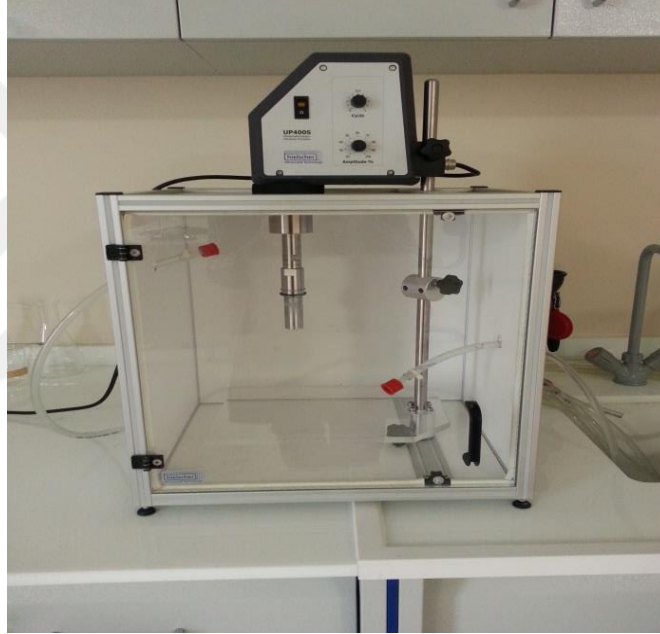
**Model:** UP400S

**Güç:** 400 Watt

**Güç kontrolü:** %20 - %100 genlik değerleri arasında çalışmaktadır.

**Çalışma frekansı:** 24 kHz

**Aksesuarlar:** Denge tezgahı, ses yalıtım kabini



**Şekil 3.4.** Ultrasonik homojenizatör

### 3.2.5. Çift cidarlı cam reaktör

Ultrasonik homojenizatörde hazırlanan karışımın kararlı hale gelmesi için beklenen süre boyunca oluşacak ısınmaları önleyip sabit sıcaklıkta kalması için çift cidarlı cam reaktör kullanılmıştır. Çift cidarlı cam reaktörün resmi Şekil 3.5'te verilmiştir.



**Şekil 3.5.** Çift cidarlı cam reaktör

### **3.2.6. Hassas terazi**

İstenilen doğrultuda nanoakışkan hazırlamak için kullanılan nanopartikül ve saf suyun kütlesinin hatasız olarak ölçülebilmesi gerekmektedir. İstenilen kütle miktarını doğru bir şekilde elde edebilmek için yüksek hassasiyette ağırlık ölçümleri yapabilen Axis marka 0.0001g hassasiyetli hassas terazi kullanılmıştır. Bu cihaz kullanıcının müdahalesi olmaksızın çalışma sırasında ölçümlerin hassas kalmasını sağlayan, iç ağırlıklı kalibrasyon sistemine sahiptir. Geniş, üç taraflı tartı camı ile kaydırılmış cam ile kapatılmış olması, hava hareketlerinin ortadan kaldırılmasının mümkün olmadığı odalarda rahat ve verimli bir çalışma imkânı sağlamaktadır. Hassas terazinin resmi Şekil 3.6'da verilmiştir.



**Şekil 3.6.** Hassas terazi

### 3.2.7. Debimetre

Yüksek hassasiyetle okuma yapabilen, sistemde dolaşan akışkanın debisini ölçmek için Siemens marka STRANS FCMASS6000 model kütleli debimetre kullanılmıştır. Bu kütleli debimetrede düşük hızlara da geniş ölçüm skalası sayesinde inilebilmiştir. Debi değerleri debimetre üzerindeki dijital ekrandan okunabildiği gibi bilgisayara da aktarılabilmektedir. Debimetrenin resmi Şekil 3.7’de verilmiştir.



**Şekil 3.7.** Debimetre



### 3.2.8. Sirkülatörlü su banyosu

Deney örneklerinin aynı koşullarda yapılabilmesi ve sistemin kararlı bir şekilde kalabilmesi için sistemde dolaşan akışkanın sabit sıcaklıkta test bölgesine girmesi gerekmektedir. Minikanal test bölgesine girecek nanoakışkan ya da saf suyun sabit sıcaklıkta kalmasını sağlayan WiseCircu marka ve zaman ayarlı bir su banyosu kullanılmıştır. Deney sisteminde akışkanın minikanallara giriş sıcaklığı  $16,7^{\circ}\text{C}$  olarak ayarlanmıştır. Sirkülatörlü su banyosunun resmi Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8. Sirkülatörlü su banyosu

### 3.2.9. Pompa

Bu deney sisteminde frekans kontrollü , pozitif yer değiştirmeli, indikatörlü pompa kullanılarak nanoakışkan formasyonuna zarar vermeden akışın sürekliliği sağlanmıştır. Kullanılan pompanın çalışma frekansı 50 kHz, maksimum iş akışkan sıcaklığı  $120^{\circ}\text{C}$ , Maksimum çalışma basıncı 12 bardır. Kullanılan pompanın resmi Şekil 3.9’da görülmektedir.



**Şekil 3.9.** Pompa

### 3.2.10. Veri okuma kartı

Test bölgesi üzerindeki 7 farklı noktadan sıcaklık ölçümlerini almak için bağlanan termoelemanlar LR8402-20 model Hioki marka veri okuma kartına bağlanmıştır. Sistem kararlı hale ulaştıktan sonra Veri okuma kartından alınan veriler bilgisayar ortamına aktarılmış ve kaydedilebilmiştir. Şekil 3.10'da resmi verilen veri okuma kartının teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

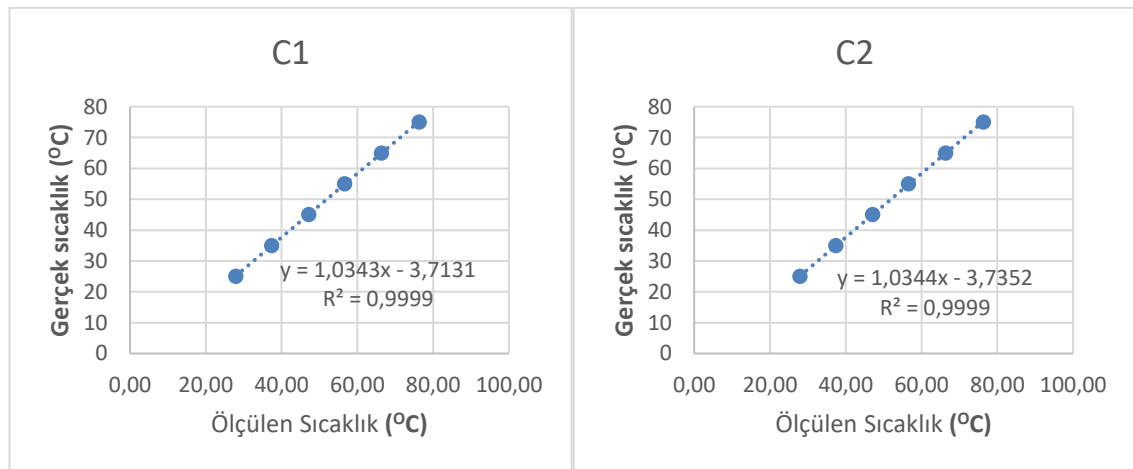
- Standart 8 kanal puls ve dijital girişi
- Standart 30 adet Analog kanal
- Örnekleme hızı Maksimum 10 ms
- Maksimum giriş  $\pm 100$  V DC
- 45 veya 60 kanala kadar yükseltilebilir kapasite
- Kanallar arası matematiksel hesap olması
- Isıl çift ile sıcaklık ölçümü
- Otomatik ısıl çift tanıma özelliği K, J, E, T, N, R,
- İstenilen tarihte ve saatte ölçümleri başlatma ve bitirme
- Puls toplamı ve puls devri ölçümü
- Ani güç kesintilerine karşı koruma
- Alarm çıkış özelliği
- Hem cihaz hemde yazılım üzerinden verileri grafiksel olarak inceleme



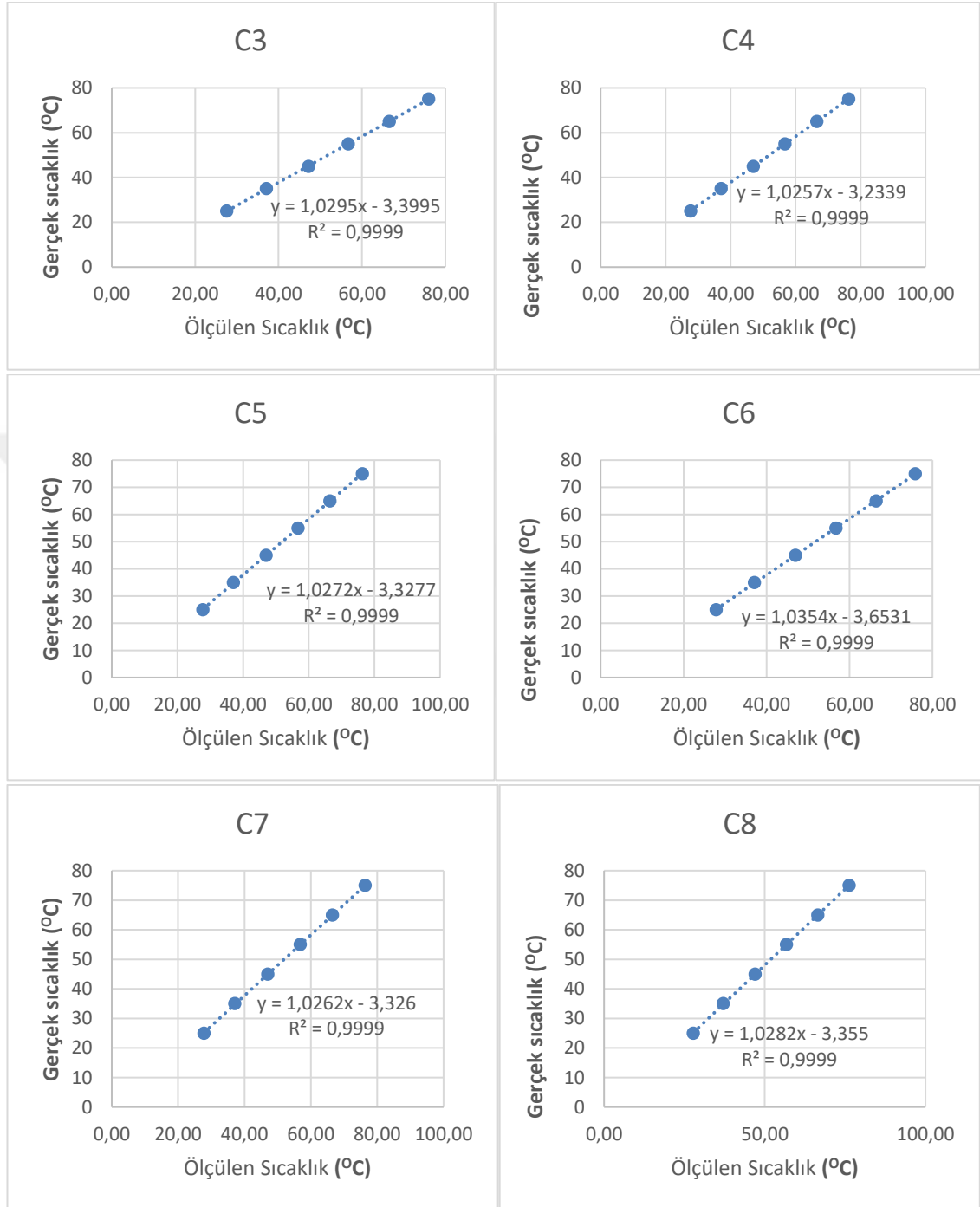
Şekil 3.10. Veri okuma kartı

### 3.2.11. Termoelemanlar

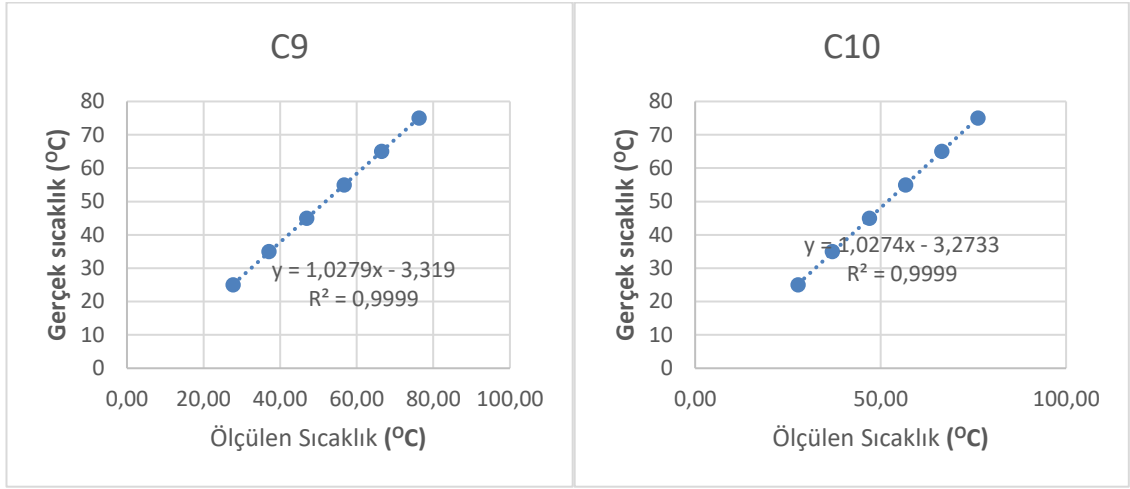
Deney sisteminde sıcaklık ölçümlerini gerçekleştirebilmek için yüksek dirence sahip olan, kimyasallara, aşınmalara dayanıklı T tipi fiberglass örgülü termokupl kullanılmıştır. Termoelemanlardan daha sağlıklı ölçüm alabilmek için Wise Curcu marka sirkülatörlü bir sıcak su banyosunda 10°C-80°C sıcaklık aralığında 10°C artış aralıklarıyla sıcaklık ölçümleri alınarak kalibre edilmiştir. Her bir termoelemanla ait kalibrasyon eğrileri ve denklemleri Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Termoelemanlar için kalibrasyon denklemleri



Şekil 3.11. (devam)



Şekil 3.11. (devam)

### 3.2.12. Basınç transdüseri

Test bölgesi girişinde ve çıkışında bulunan iki basınç prizi ile basınç transdüserine bağlantı yapıp test bölgesinde oluşan basınç düşümü VALCOM marka basınç transdüseri ile ölçülmüştür. Basınç transdüserinin resmi Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Basınç transdüseri

### 3.2.13. Güç kaynağı

Minikanal test bölgesinde sabit ısı akışı sınır şartını sağlayabilmek için iki adet ısıtıcı kullanılıp, bu ısıtıcıların beslenmesi için güç kaynağı kullanılmıştır. Deneyler sırasında

yaklaşık 2.1 watt besleme verilmiştir. Şekil 3.13’de görülen güç kaynağının özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Voltaj aralığı : 0-30 V
- Çıkış gerilimi : 720 Watt
- Akım aralığı : 0-72 A
- Multi-Range (V&I) Operasyonu için Sabit gerilim çıkışı
- CV/CC Önceliği ; Pil ve LED Endüstrisi için uygun
- Ayarlanabilir Slew Oranı
- Seri ve paralel operasyonu
- Yüksek etkinlik ve yüksek güç yoğunluğu
- LabVIEW driver desteği
- Program doğruluğu voltaj : 0.05%+10mV
- Program doğruluğu akım : 0.1%+60mA
- Yükselme zamanı : 50 ms
- Düşme zamanı (tam yük) : 50 ms
- Düşme zamanı (yük yok) : 500 ms



Şekil 3.13. Güç kaynağı

### 3.3. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Bir güç kaynağı kullanılarak sisteme ısı enerjisi verilmektedir. Isıtıcılardan geçen akım ve gerilim değerlerinin çarpılmasıyla elektriksel güç belirlenir.

$$Q = VI \quad (3.10)$$

Deney düzeneğinde kayıplar göz ardı edilerek ısının tamamının taşınımıyla test bölgesinden transfer edildiği kabul edilerek Eşitlik 3.11 yazılabilir.

$$Q = Q_{\text{taşınım}} \quad (3.11)$$

Güç kaynağından sisteme aktarılan güç Eşitlik 3.12'deki gibi de yazılabilir.

$$VI = hA[T_s - T_{\text{ort}}] \quad (3.12)$$

Ortalama ısı taşınım katsayısı Eşitlik 3.13 kullanılarak elde edilebilir.  $T_{\text{ort}}$  giriş ve çıkış sıcaklıkların ortalaması olarak yazılır.

$$h = \frac{Q}{A_s(T_s - ((T_g + T_c) / 2))} \quad (3.13)$$

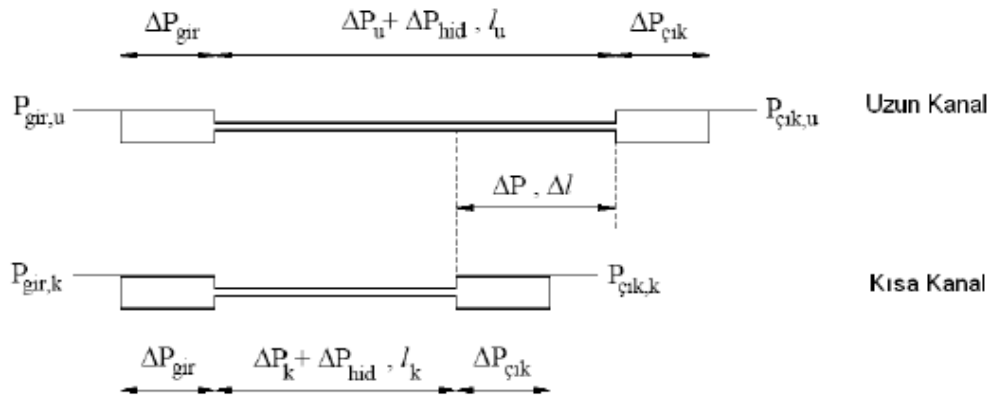
Nusselt sayısı  $h$  kullanılarak elde edilir. Eşitlik 3.14'de verilen denklemde  $D$  çapı,  $k$  ısı iletim katsayısını ifade etmektedir.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.14)$$

Akış sırasında akışkan ile yüzey arasında meydana gelen sürtünme basınç düşümüne neden olmaktadır. Eşitlik 3.15'te verilen sürtünme faktöründe  $D$  minikanalın çapı  $\rho$  akışkanın yoğunluğu,  $L$  minikanalın uzunluğu,  $V$  nanoakışkanın ortalama hızını ifade etmektedir.

$$f = \frac{\tau}{1/2\rho V^2} = \frac{2\Delta p}{\rho V^2} D/L \quad (3.15)$$

Minikanallarda basınç düşümünü belirlemek için iki adet kanal kullanılmaktadır. Bu kanalların uzunlukları hariç diğer bütün özellikleri aynı tutulmuştur. Farklı uzunluklara sahip iki minikanal Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Minikanallarda basınç kaybı ölçümü şematifi

Minikanalda meydana gelen basınç düşümü Eşitlik 3.16 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta P_{ölçme} = P_{giriş} - P_{çıkış} \quad (3.16)$$

Kanal boyunca meydana gelen basınç kayıpları Eşitlik 3.17 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta P_{kayıb} = \Delta P_{giriş} + \Delta P_{hid} + \Delta P_{çıkış} \quad (3.17)$$

Tam gelişmiş uzunluk boyunca meydana gelen basınç kaybı Eşitlik 3.18 ile uzun ile kısa kanalın toplam basınç düşümlerinin farkının alınmasıyla hesaplanmaktadır.

$$\Delta P = \Delta P_{ölç,u} - \Delta P_{ölç,k} \quad (3.18)$$



### 3.4. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda birçok değişken ele alınıp incelenmektedir. Belirsizlik analizi kullanarak değişkenler arasında en yüksek hatayı veren değişkenin öne çıkması sağlanır. Böylelikle en yüksek hatayı veren değişken ele alınarak sistemin hatasını en aza indirmek mümkün olmaktadır. Kline ve McClinton (1953) tarafından hata analizi için hassas bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada kullanılan belirsizlik analizi Eş. 3.19'da verilmektedir.

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

Eşitlik 3.19'da R ölçülen büyüklük olup, R'nin bağlı olduğu bağımsız değişkenler  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  ile temsil edilmektedir.  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  ise bağımsız değişkenlerin hata oranlarını temsil etmektedir. Eşitlik 3.20 Reynolds sayısı için belirsizlik eşitliğini göstermektedir.

$$\frac{w_{Re}}{Re} = \left[ \left( \frac{w_v}{v} \right)^2 + \left( \frac{w_D}{D} \right)^2 + \left( \frac{w_\mu}{\mu} \right)^2 + \left( \frac{w_\rho}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

Nusselt sayısı için belirsizlik eşitliği Eşitlik 3.21'de verilmiştir.

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \left[ \left( \frac{w_v}{v} \right)^2 + \left( \frac{w_D}{D} \right)^2 + \left( \frac{w_l}{l} \right)^2 + \left( \frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + \left( \frac{w_k}{k} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

Sürtünme faktörü için belirsizlik eşitliği Eşitlik 3.22'de verilmiştir.

$$\frac{w_f}{f} = \left[ \left( \frac{w_\rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{w_D}{D} \right)^2 + 4 \left( \frac{w_v}{v} \right)^2 + \left( \frac{w_{\Delta P}}{\Delta P} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki eşitliklerden görüldüğü gibi sürtünme faktörü için belirsizlik hesabında parametreler farklı etkiye sahiptir. En büyük etkiye sahip olan ise debidir. Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilen belirsizlik değerleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Belirsizlik değerleri

Parametre	Re	Nu	f
Belirsizlik (%)	1,69	2,78	2

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

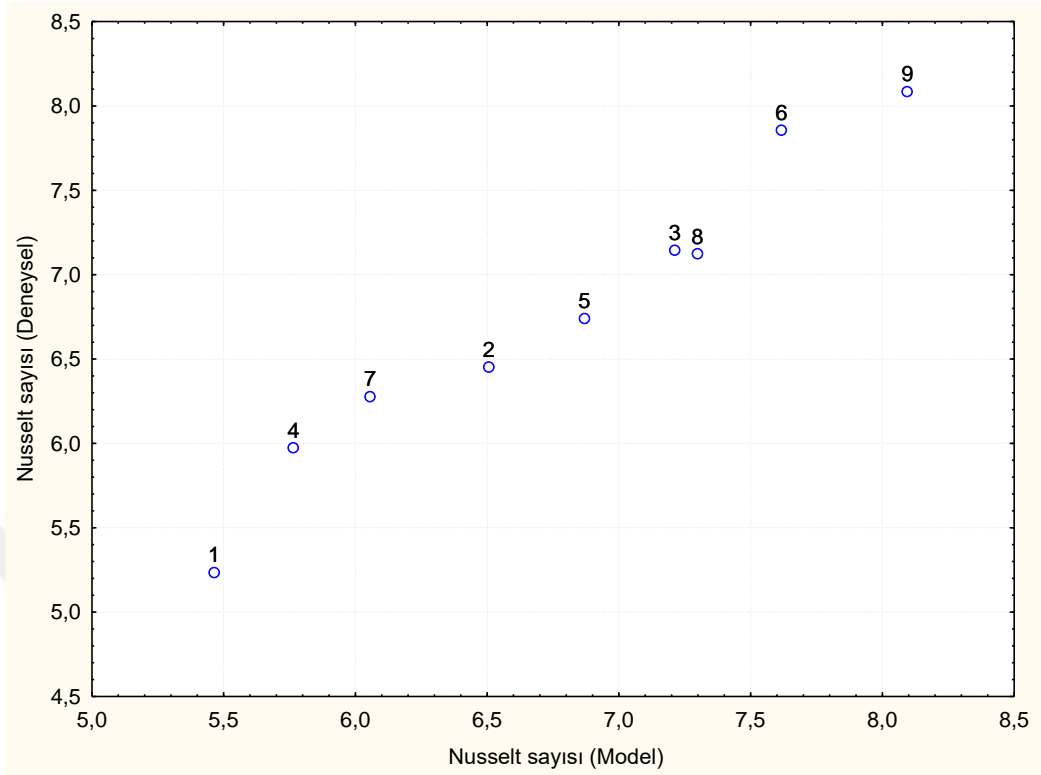
### 4.1. Boş Kanal Deney Sonuçları

Bu çalışmada saf su ile elde edilen ısı transferi sonuçları için Eşitlik 4.1'deki korelasyon elde edilmiştir. Bu korelasyon Reynolds sayısının 300-900, Prandtl sayısının 6-7 ve kanal çapının 1.2-19 mm olduğu aralıklarda sabit ısı akısı sınır şartında, hidrodinamik olarak gelişmiş ve termal olarak gelişen akışlar için kullanılabilir.

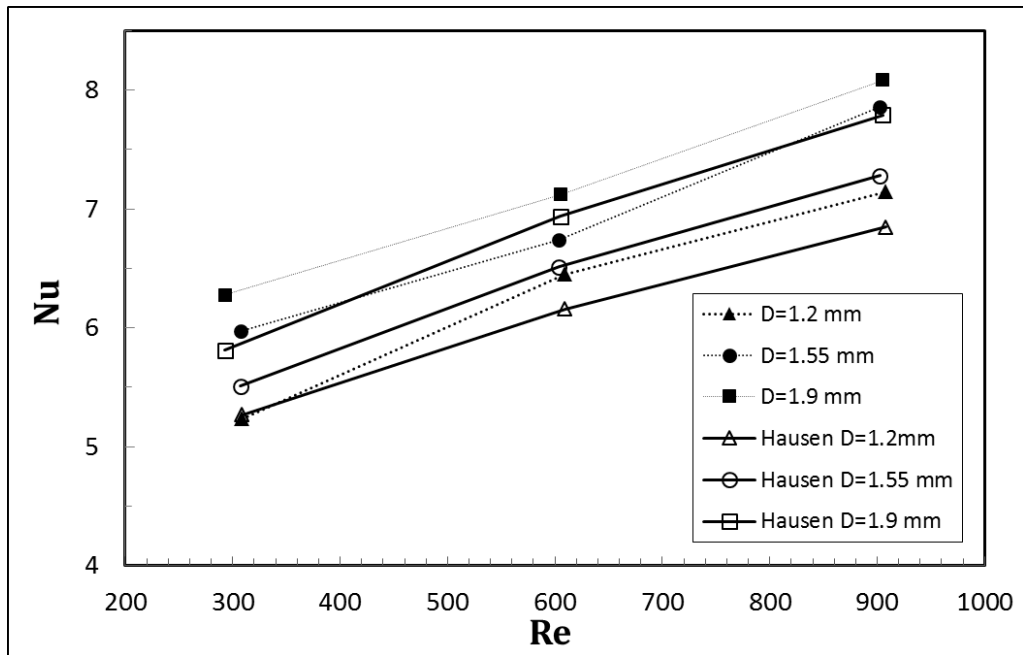
$$Nu = 0.356 + 0.34(RePrD/L)^{0.267} \quad R^2=0.962 \quad (4.1)$$

Şekil 4.1'de deneysel olarak elde edilen Nusselt sayısı ve Eşitlik 4.1 ile elde edilen Nusselt sayısı tahminlerinin değişimleri sunulmaktadır. Kullanılan deney sisteminin doğrulaması için saf suya ait ısı transferi sonuçları Hausen korelasyonu ile (Eşitlik 4.2) karşılaştırılmıştır. Hausen korelasyonu sabit ısı akısı sınır şartında dairesel borularda termal olarak gelişen, hidrodinamik olarak gelişmiş akışlar için kullanılmaktadır. Şekil 4.2'de farklı çaplardaki kanallarda saf su için Reynolds sayısı ile olan değişimleri göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde Hausen korelasyonu ile deneysel Nusselt sayıları arasında maksimum %8'lik bir fark olduğu görülmektedir.

$$Nu = 3.66 + \frac{0.19(RePrD/L)^{0.8}}{1 + 0.117(RePrD/L)^{0.467}} \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Saf suya ait Nusselt sayısının deneysel ve model tahminlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.2. Saf su sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması

#### 4.2. Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile Matematiksel Modelleme

Bu çalışmada ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri üzerinde etkili olan parametreler Reynolds sayısı ( $Re$ ), Hacimsel yüzde ( $\phi$ ) ve boru çapı ( $D$ ) olarak belirlenmiş, bu parametrelerin seviye değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Çalışmada incelenen parametreler ve değerleri

Tasarım Değişkenleri	Seviyeler		
	-1	0	1
X <sub>1</sub> Reynolds Sayısı $Re$ [Birimsiz]	300	600	900
X <sub>2</sub> Boru Çapı $D$ [mm]	1,20	1,55	1,9
X <sub>3</sub> Hacimsel Oran $\phi$	0	0,4	0,8

Çizelge 4.1’den görüldüğü üzere parametreler 3 farklı seviyede incelenmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımı ( $3^3=27$ ) yerine merkezi kompozit tasarım (MKT) kullanılarak 20 adet deney yapılmıştır. Tasarım değişkenlerinin seviyelerini içeren deney planı Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Çizelge’de parametrenin en düşük seviyesi -1 ile, orta dereceli seviyesi 0 ile, en yüksek değerli seviyesi ise 1 ile gösterilmektedir. Hesaplamalar bölümünde detayları anlatılan Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün deney planındaki değerleri Çizelge 4.3’te verilmiştir. Çizelge 4.3’teki değerler kullanılarak 20 adet deney Design Expert 8.0.3 paket programının deneme sürümü yardımıyla analiz edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerleri tasarım değişkenlerine bağlı bağıntılar olarak belirtilemediğinden dolayı, bağıntılar kapalı bir fonksiyon olarak Eşitlik 4.3’teki gibi verilmiştir.

$$Y = f(Re, \phi, D) \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3'teki kapalı fonksiyon ve yanıt yüzey yöntemi (YYY) kullanılarak deneysel sonuçlar ile tasarım değişkenleri arasında model elde edilir (Myers *et al.* 1995; Subaşı 2010).

Sunulan tez çalışmasında matematiksel model için ikinci dereceden polinom model seçilmiştir. Stepwise yaklaşımı kullanılarak önem seviyesi düşük olan terimler ihmal edilmiş, modelin doğrulaması doğrulama deneyleri ve istatistiksel analizler yoluyla gerçekleştirilmiştir. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için oluşturulan polinomial modeller sırasıyla Eşitlik 4.4 ve 4.5'te verilmiştir. Varyans analizi sonuçları (ANOVA tablosu) sırasıyla Çizelge 4.4 ve 4.5'te sırasıyla verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Deney planı

Deney No	Tasarım Değişkenleri		
	X1	X2	X3
1	1	-1	1
2	-1	1	-1
3	0	0	1
4	1	-1	-1
5	0	0	0
6	1	1	1
7	0	0	-1
8	-1	-1	-1
9	1	1	-1
10	0	0	0
11	0	0	0
12	1	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	1	-1	1
16	0	-1	0
17	-1	0	0
18	-1	1	1
19	0	0	0
20	0	1	0

**Çizelge 4.3.** Hesaplanan karakteristik büyüklükler

Deney No	Tasarım Parametreleri			DeneySEL Büyüklükler	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Nu	f
1	900	1,20	0,80	9,93523	0,06102
2	300	1,90	0,00	6,27680	0,09758
3	600	1,55	0,80	11,11769	0,06013
4	900	1,20	0,00	7,14502	0,03728
5	600	1,55	0,40	8,06961	0,05598
6	900	1,90	0,80	13,09738	0,02430
7	600	1,55	0,00	6,73982	0,05393
8	300	1,20	0,00	5,23494	0,12608
9	900	1,90	0,00	9,00820	0,03125
10	600	1,55	0,40	8,12679	0,05595
11	600	1,55	0,40	7,99665	0,05585
12	900	1,55	0,40	9,31362	0,03709
13	600	1,55	0,40	8,04577	0,05554
14	600	1,55	0,40	7,96593	0,05589
15	300	1,20	0,80	7,60839	0,15285
16	600	1,20	0,40	7,62496	0,06910
17	300	1,55	0,40	7,34148	0,13582
18	300	1,90	0,80	9,76007	0,11166
19	600	1,55	0,40	7,85109	0,05615
20	600	1,90	0,40	8,93515	0,04839

$$\begin{aligned} Nu = & 3,566885589 + 0,000712501 X_1 + 0,553882181 X_2 - 1,381347539 X_3 \\ & + 0,002180702 X_1 X_2 + 2,150711049 X_2 X_3 + 2,907796736 X_3^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} f = & 0,294886864 - 0,000514719 X_1 - 0,041793156 X_2 + 0,091036248 X_3 + 3,20672E-05 \\ & X_1 X_2 - 2,50716E-05 X_1 X_3 - 0,038731174 X_2 X_3 + 2,75582E-07 X_1^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

**Çizelge 4.4.** Nusselt sayısı (Nu) için ANOVA tablosu

Değişkenlik Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	f-Değeri	Prob.>F	
Model	55,67043	6	9,2784045	74,8143475	< 0.0001	önemli
X <sub>1</sub>	15,07435	1	15,07435	121,548665	< 0.0001	
X <sub>2</sub>	9,080292	1	9,0802918	73,2169096	< 0.0001	
X <sub>3</sub>	29,28879	1	29,28879	236,163631	< 0.0001	
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	0,419432	1	0,4194315	3,3819927	0.0889	
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0,725287	1	0,7252875	5,84819415	0.0310	
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1,082276	1	1,0822761	8,72669204	0.0112	
Residual	1,612248	13	0,1240191			
Uyumsuzluk	1,566407	8	0,1958008	21,3565135	0.0019	önemli
Hata	0,045841	5	0,0091682			
Cor. Total	57,28267	19				
Standart Sapma	0,352163			R <sup>2</sup> = 0,971855		
Ortalama	8,359729			Düzeltilmiş.-R <sup>2</sup> =0,958864		
C.V. %	4,212617			Kestirilen R <sup>2</sup> =0,913047		
Press	4,980915			Yeterli Hassasiyet=37,36228		

Tasarım değişkenlerinin performans üzerindeki etkileri başka bir deyişle ne kadar önemli oldukları varyans analizi F testi yardımıyla belirlenir. %95 güven aralığında yapılan F testine göre elde edilen matematiksel modeller istatistikî olarak önemlidir. Ayrıca, kurulan modellerdeki X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> ve X<sub>3</sub> terimlerinin yanıtlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. F testi dışında Adj-R<sup>2</sup> metodu kullanılarak kurulan modelin ilişkiyi nasıl temsil ettiği de belirlenebilir. Adj-R<sup>2</sup> değeri 1'e ne kadar yakın olursa sonuçlar ve tasarım değişkenleri arasında o kadar iyi bir ilişki vardır (Myers *et al.* 1995; Subaşı 2010).



**Çizelge 4.5.** Sürtünme faktörü (f) için ANOVA tablosu

Değişkenlik Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	f-Değeri	Prob.>F	
Model	0,024407	7	0,0034867	163,6871337	< 0.0001	önemli
X <sub>1</sub>	0,018752	1	0,0187521	880,3397976	< 0.0001	
X <sub>2</sub>	0,001773	1	0,0017731	83,24114972	< 0.0001	
X <sub>3</sub>	0,000408	1	0,0004076	19,13304563	0.0009	
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	9,07E-05	1	9,07E-05	4,257850861	0.0614	
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	7,24E-05	1	7,241E-05	3,399508378	0.0900	
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0,000235	1	0,0002352	11,04249465	0.0061	
X <sub>1</sub> ^2	0,003076	1	0,0030758	144,3960888	144,3961	
Residual	0,000256	12	2,13E-05			
Uyumsuzluk	0,000255	7	3,649E-05	879,8553816	< 0.0001	önemli
Hata	2,07E-07	5	4,147E-08			
Cor. Total	0,024663	19				
Standart Sapma	0,004615			R <sup>2</sup> = 0,989636		
Ortalama	0,069093			Düzeltilmiş.-R <sup>2</sup> =0,98359		
C.V. %	6,679842			Kestirilen R <sup>2</sup> =0,924129		
Press	0,001871			Yeterli Hassasiyet =44,57084		

Eşitlik 4.4 ve 4.5'te sunulan ikinci dereceden Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü polinomiyelerinin tasarım değişkenleri ile sonuçlar arasındaki ilişkiyi hangi oranda sunabildiğinin gösterilebilmesi için deney planında yer almayan durumların modeller ile tahmin edilerek aynı durumlara karşılık gelen doğrulama deney sonuçları ile karşılaştırılması gerekir. Matematiksel model tahminleri ile doğrulama deney sonuçları Çizelge 4.6 ve 4.7'de gösterilmektedir.

**Çizelge 4.6.** Nusselt sayısı için doğrulama deney sonuçları

Deney No	Tasarım Parametreleri			Nusselt sayısı, Nu		
	Re	$\phi$	D	DeneySEL	Model	Hata (%)
1	470	0.0	1.55	6,082	6,348919	4,3
2	680	0.4	1.2	7,594	7,440547	2
3	730	0.8	1.55	11,328	10,83579	4,5
4	520	0.4	1.9	9,186	8,691544	5

**Çizelge 4.7.** Sürtünme faktörü için doğrulama deney sonuçları

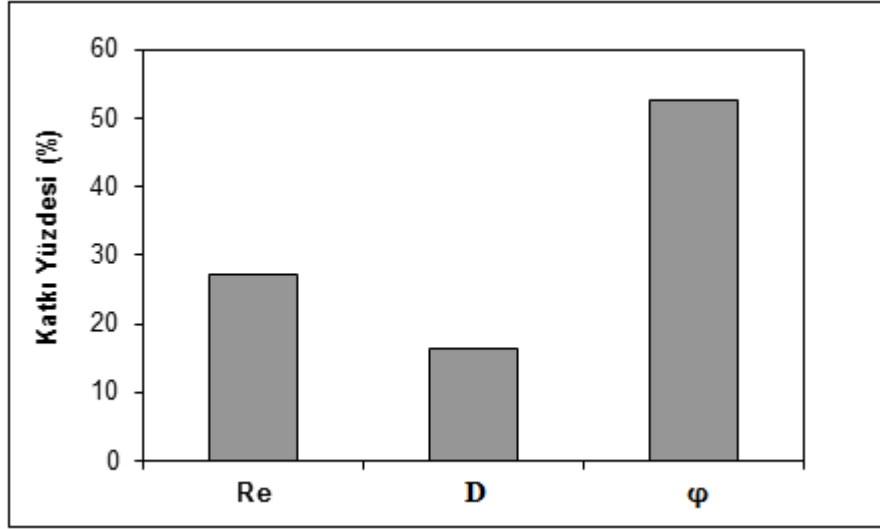
Deney No	Tasarım Parametreleri			Sürtünme Faktörü, f		
	Re	$\phi$	D	DeneySEL	Model	Hata (%)
1	470	0.0	1.55	0,07713	0,072426	6
2	680	0.4	1.2	0,06409	0,059326	8
3	730	0.8	1.55	0,05117	0,047664	7
4	520	0.4	1.9	0,05732	0,055789	2

Tasarım değişkenlerinin toplam performans içindeki değerlerini belirlemek için katkı yüzdeleri hesaplanmıştır. Katkı yüzdeleri hem Nusselt sayısı için hem de sürtünme faktörü için Eşitlik 4.6 yardımıyla hesaplanmıştır. Katkı yüzdeleri hesaplanırken Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'teki parametrenin kareler toplamı modelin kareler toplamına oranlanarak hesaplanmıştır.

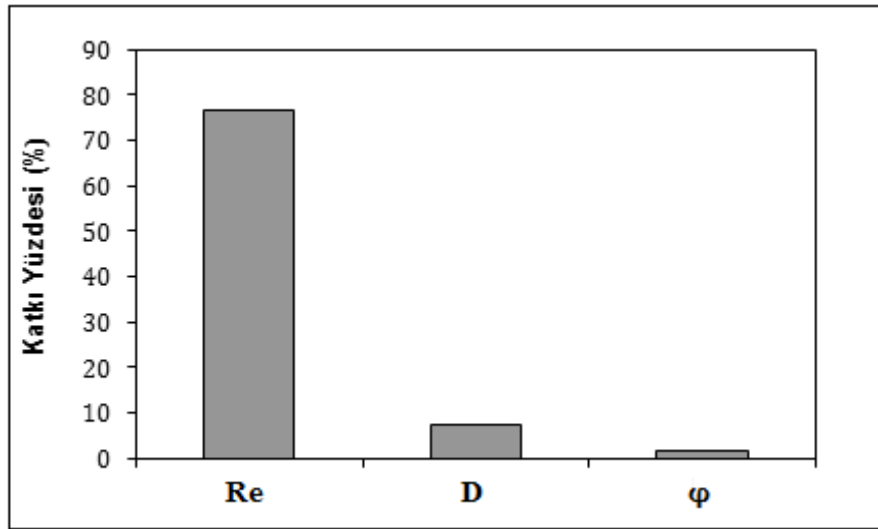
$$KY = \frac{\text{Kareler Toplamı}_{\text{parametre}}}{\text{Kareler Toplamı}_{\text{model}}} \times 100 \quad (4.6)$$

Nusselt sayısı doğrudan yüzeydeki taşınım ile ısı transferini temsil eden boyutsuz bir sayıdır. Nusselt sayısının yüksek olması taşınım ile ısı transferinin de yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Nusselt sayısı üzerinde partikül hacimsel oranı %52.59 ile en yüksek etkiye, %27.07 ile Reynolds sayısı ikinci en yüksek etkiye ve %16.31 ile kanal çapı üçüncü yüksek etkiye sahiptir.

Sıkıştırılmaz akışlarda Darcy sürtünme faktörü akış hızının, basınç düşümünün, kanal çapının, kanal uzunluğunun bir fonksiyonudur. Sürtünme faktörünün yüksek olması basınç düşümünün de yüksek olduğu anlamına gelir. Sürtünme faktörü üzerinde Reynolds sayısı %76.8 ile en yüksek etkiye, %7.26 ile kanal çapı ikinci en yüksek etkiye ve %1.67 ile partikül hacimsel oranı üçüncü yüksek etkiye sahiptir.

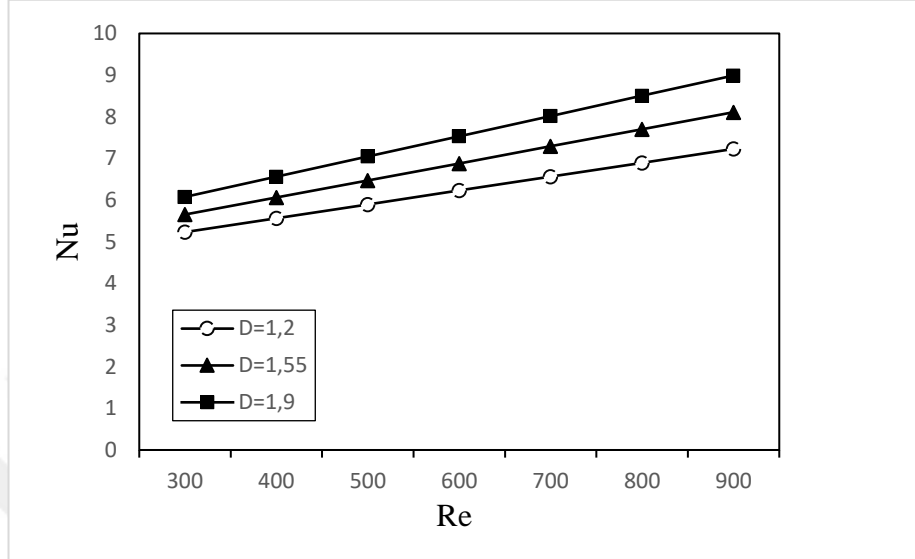


Şekil 4.3. Tasarım değişkenlerinin Nusselt sayısı üzerindeki katkı yüzdeleri

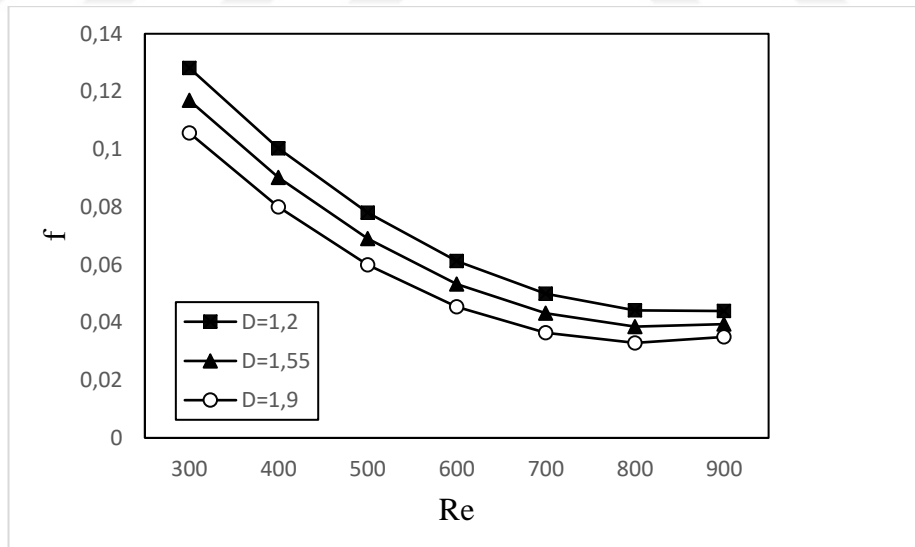


Şekil 4.4. Tasarım değişkenlerinin sürtünme faktörü üzerindeki katkı yüzdeleri

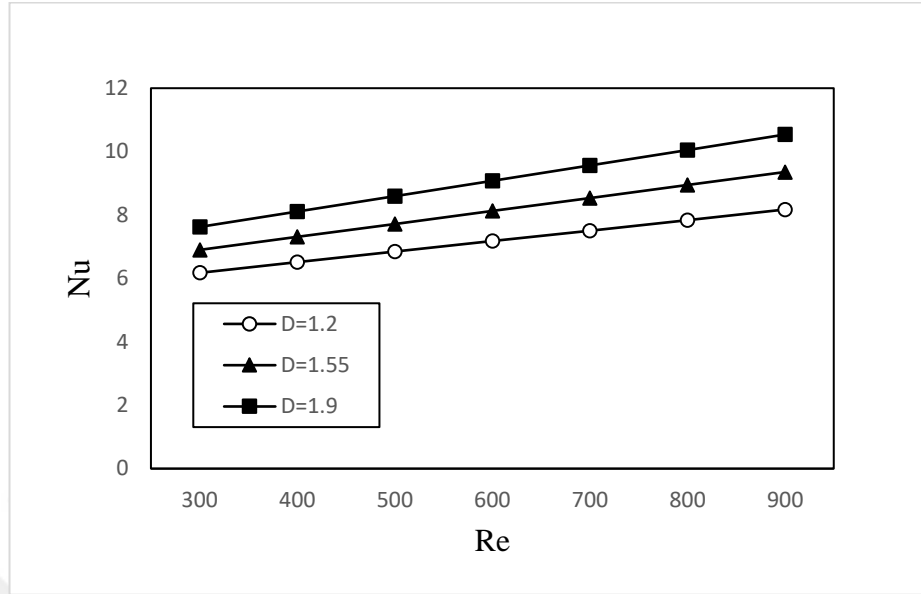
### 4.3. Isı transferi ve Sürtünme Karakteristikleri



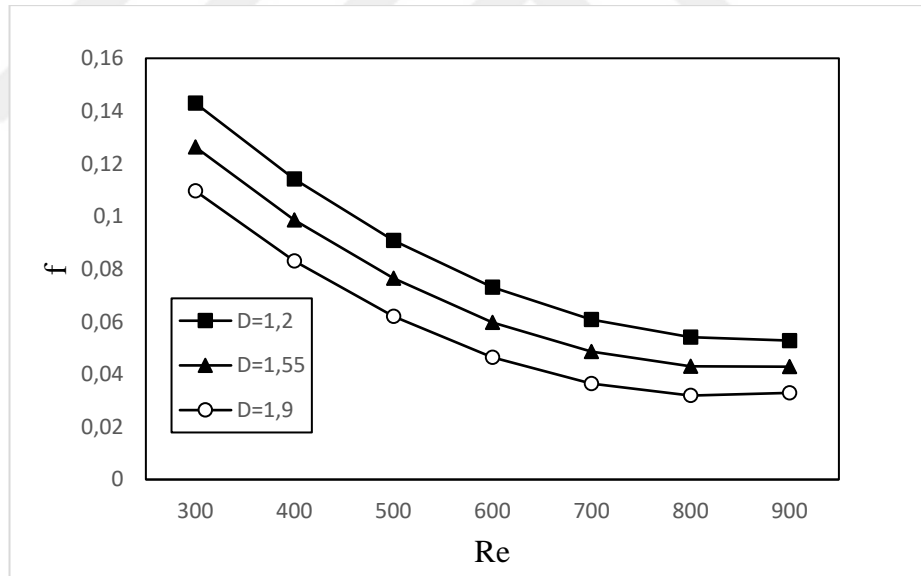
Şekil 4.5.  $\phi = 0$  için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi



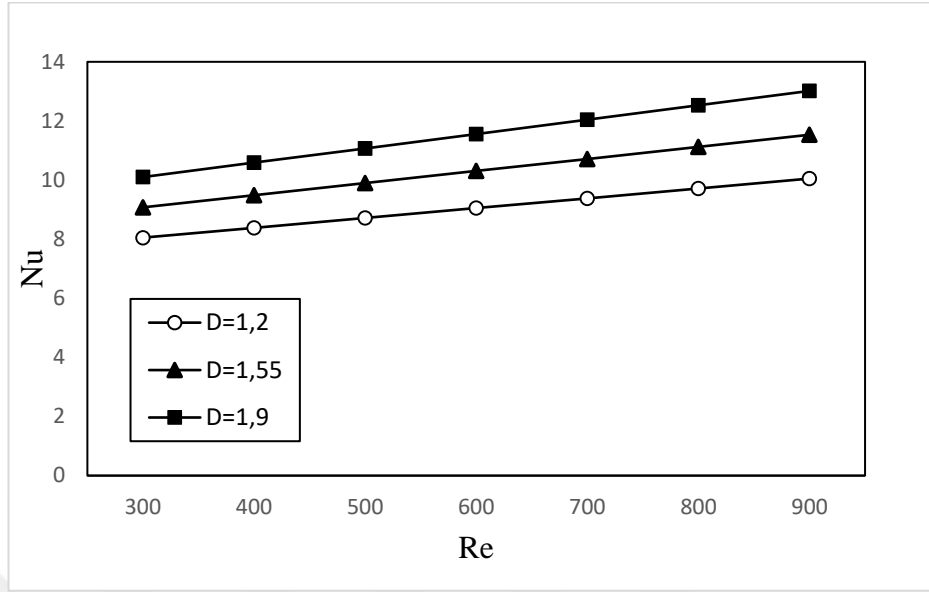
Şekil 4.6.  $\phi = 0$  için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi



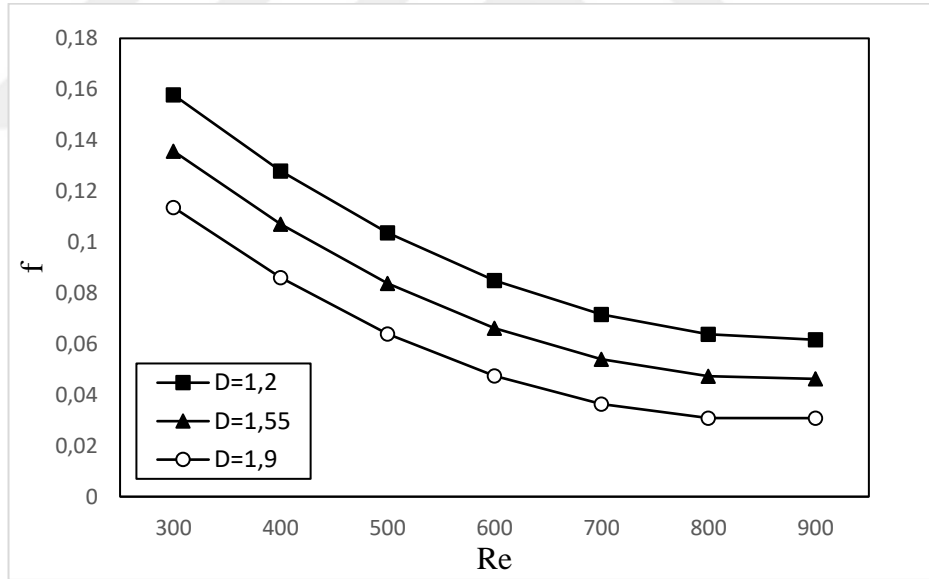
Şekil 4.7.  $\phi = 0,4$  için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi



Şekil 4.8.  $\phi = 0,4$  için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi



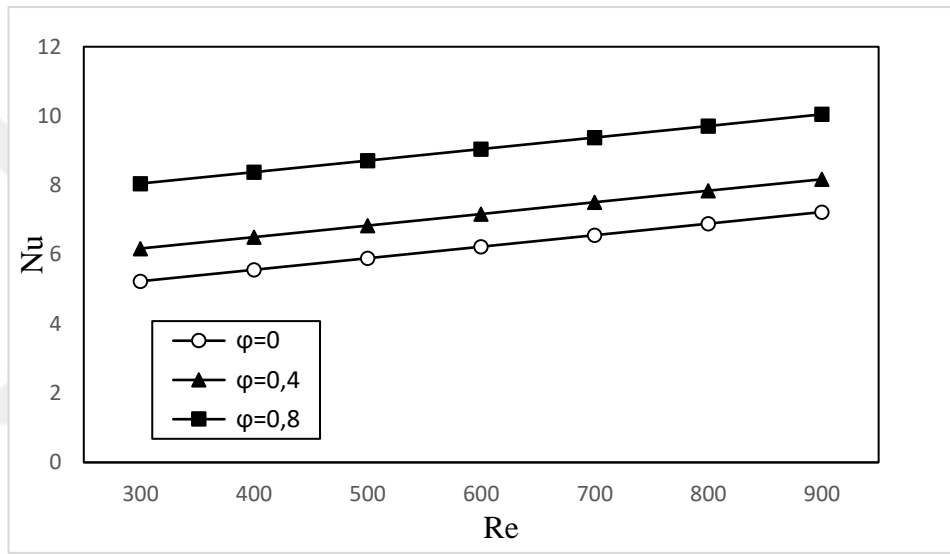
Şekil 4.9.  $\phi = 0,8$  için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi



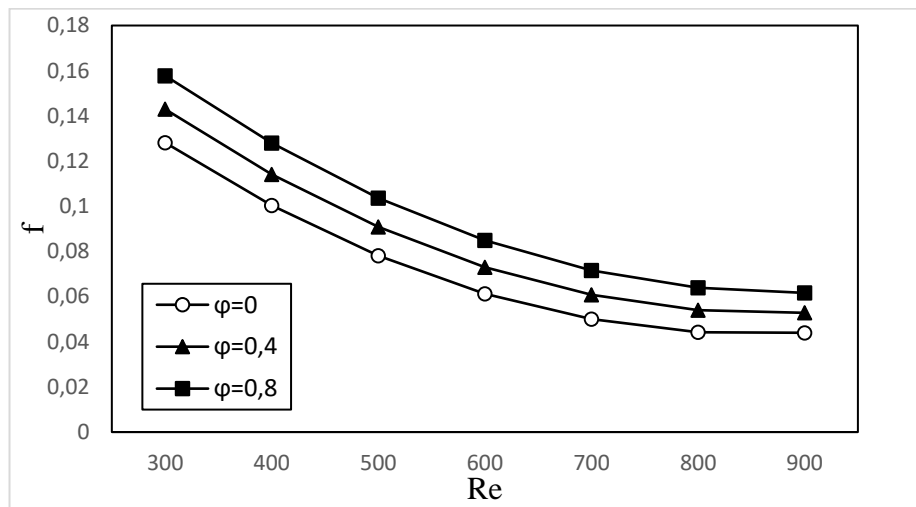
Şekil 4.10.  $\phi = 0,8$  için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi

Şekil 4.5, 4.7 ve 4.9'da mini kanal çapının Nusselt sayısı üzerindeki etkisini incelemek için hacimsel partikül oranı sabit tutulmuştur. İş akışkanının tüm hacimsel partikül oranları için kanal çapındaki artışla birlikte Nusselt sayısında da artış olduğu görülmüştür. Reynolds sayısının artmasıyla Nusselt sayısında da artış görülmüştür. En yüksek Nusselt sayısı 1,9 mm kanal çapı ve % 0,8 hacimsel partikül oranında 13,01

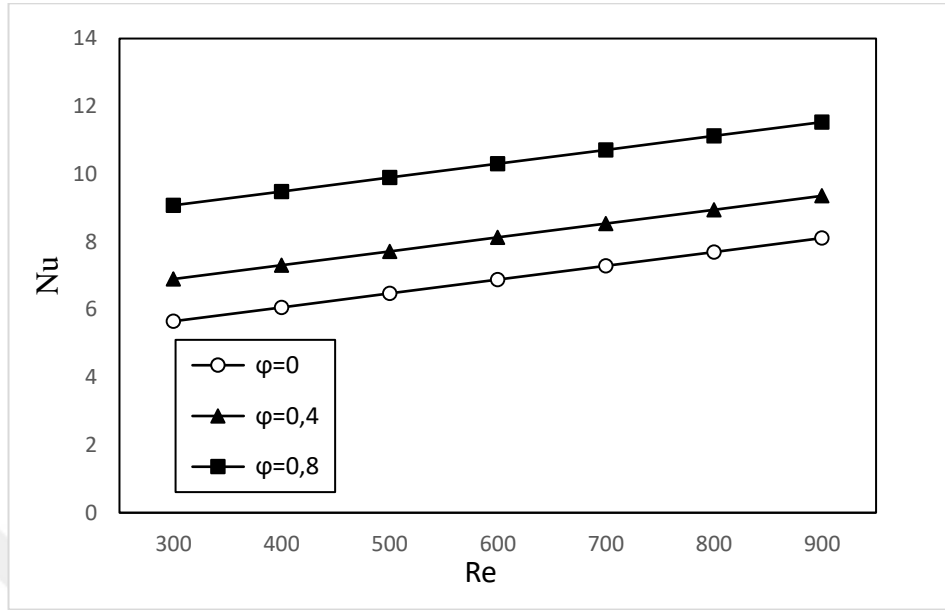
olarak elde edilmiştir. Şekil 4.6, 4.8 ve 4.10’da ise hacimsel partikül oranı sabit tutularak mini kanal çapının sürtünme faktörü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu grafiklerde Reynolds sayısı arttıkça sürtünme faktörünün azaldığı, kanal çapı arttıkça sürtünme faktörünün azaldığı görülmüştür. Hacimsel partikül oranı %0,8 için en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında, 1,2 mm kanal çapından 1,55 mm kanal çapına yükseltildiğinde sürtünme faktöründe %14’lük; 1,2 mm’den 1,9 mm’ye yükseltildiğinde sürtünme faktöründe %28.01’lik azalış meydana gelmiştir.



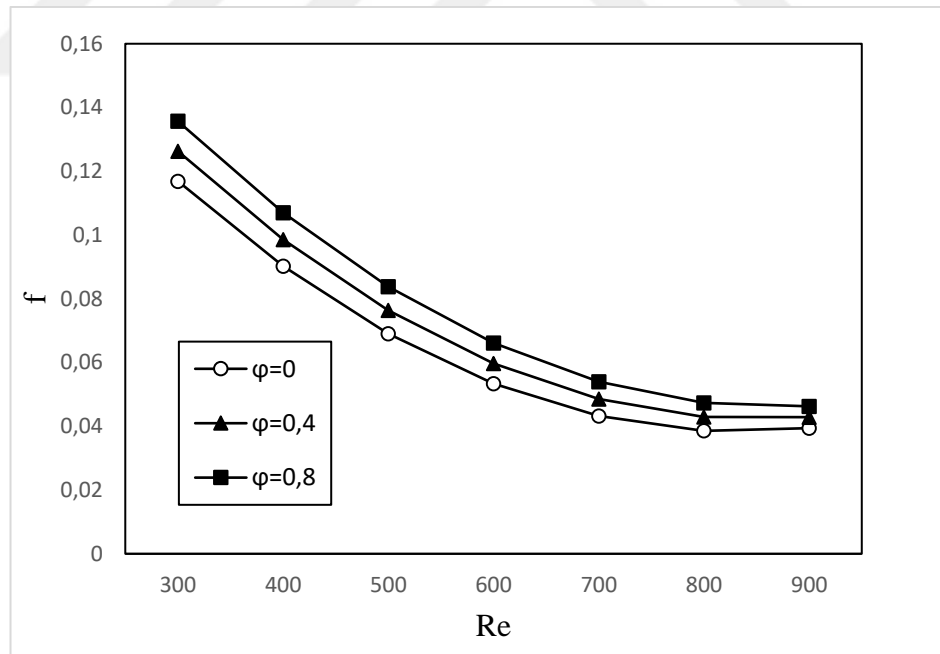
Şekil 4.11. D=1,2 mm için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi



Şekil 4.12. D= 1,2 mm için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi

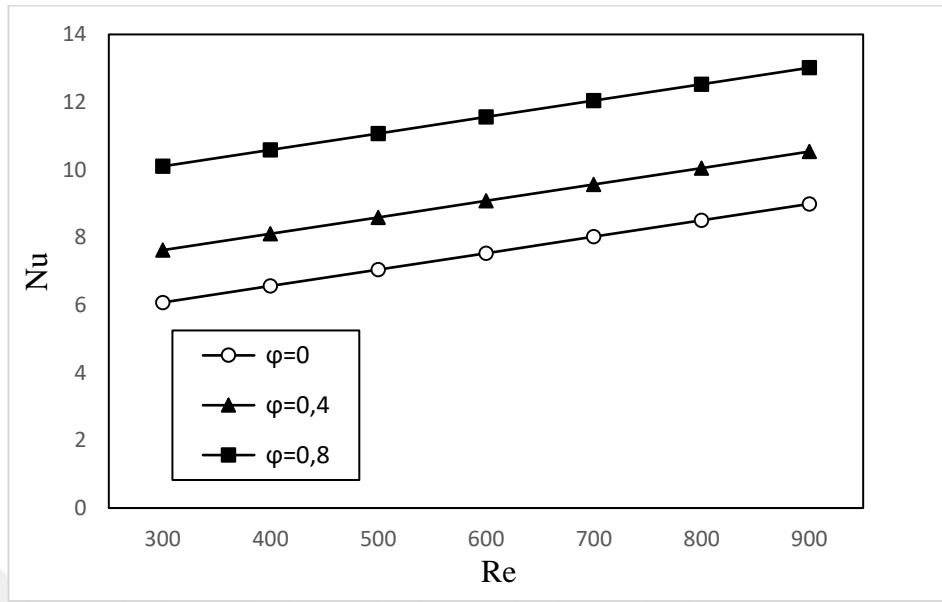


Şekil 4.13. D=1,55 mm için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi

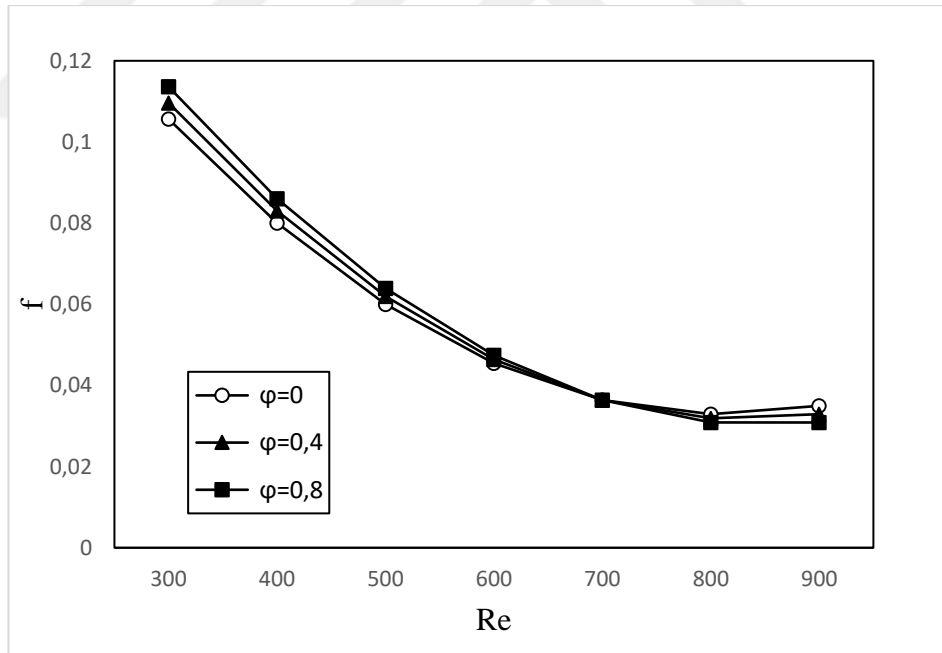


Şekil 4.14. D= 1,55 mm için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi





Şekil 4.15. D=1,9 mm için, Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi



Şekil 4.16. D= 1,9 mm için, Sürtünme faktörü (f) ve Reynolds sayısı (Re)'nin değişimi

Şekil 4.11, 4.13 ve 4.15'te kanal çapı sabit tutularak hacimsel partikül oranının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. İş akışkanının tüm mini kanal çaplarında hacimsel partikül oranının artmasıyla birlikte Nusselt sayısı da artmıştır. En yüksek artışı örnek

alırsak, 1,9 mm kanal çapına sahip mini kanalda en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,4 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık %25,46; %0,8 hacimsel partikül oranında yaklaşık %66,24 artış olmuştur.

Şekil 4.12, 4.14 ve 4.16'da kanal çapı sabit tutularak hacimsel partikül oranının sürtünme faktörü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Partikülün hacimsel oranındaki artış sürtünme faktörünün de artmasına sebep olmuştur.

Şekil 4.12'yi örnek olarak incelersek en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında 1,2 mm kanal çapına sahip mini kanalda %0,4 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre sürtünme faktöründe yaklaşık %11,56; %0,8 hacimsel partikül oranında yaklaşık %23,13 artış olduğu görülmüştür.

#### **4.4. Optimizasyon**

Bu çalışmanın amacı farklı çaplardaki mini dairesel borularda SiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanlarının ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerini analiz etmek ve tasarım değişkenlerinin optimum değerlerini bulmaktır.

Optimizasyonda hedef fonksiyonları olarak Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü seçilmiştir. Nusselt sayısının maksimum olması, sürtünme faktörünün ise minimum olması hedeflenmektedir. Çünkü, Nusselt sayısının maksimum olması ısı transferinin de maksimum olması anlamına gelmektedir. Benzer şekilde, sürtünme faktörünün minimum olması da basınç düşümünün minimum olması anlamına gelmektedir. Basınç düşümünün minimum olması ise pompalama gücünün azalması ve enerji sarfiyatının azalmasına yol açmaktadır.

Bu tez çalışmasında hedef fonksiyon olarak Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü seçilerek her iki hedef fonksiyonun da minimum olması amaçlanarak tasarım parametrelerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Nusselt sayısını azalan yönde değiştirebilmek için

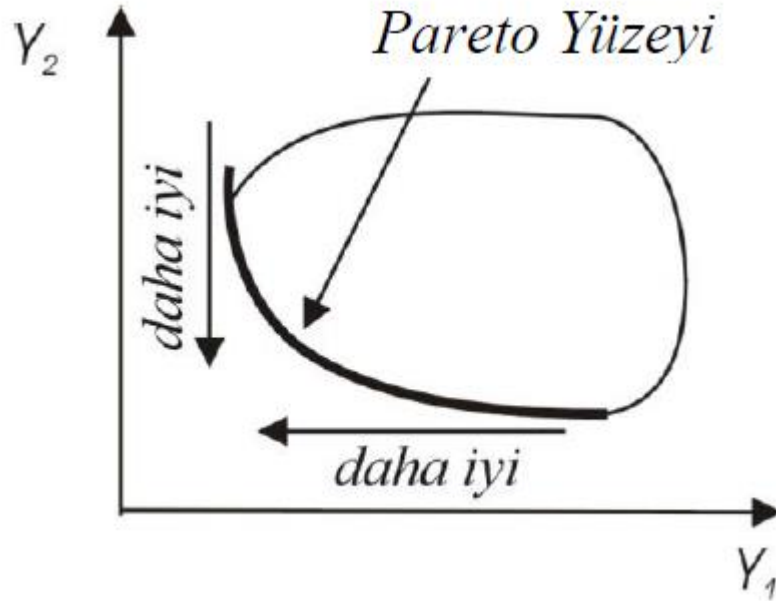
Nusselt sayısı değerleri -1 ile çarpılmıştır. Ancak, optimizasyon probleminin tanımlanmasında Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü açık fonksiyonlar olmadığından yani tasarım değişkenlerine bağlı bağıntılar halinde verilemediğinden YYY ile elde edilen modeller optimizasyon tanımlamasında hedef fonksiyon olarak kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında hedeflenen tasarım optimizasyonu Eşitlik 4.7'deki gibidir.

$$X = [Re, \phi, D] \quad (4.7)$$

$$\min Y_1=f \text{ ve } \min Y_2=-Nu \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8 Reynolds sayısının 300 ile 900 arasında olduğu, kanal çapının 1.2 mm ile 1.9 mm arasında olduğu ve partikül hacimsel oranının 0 ile 0.008 arasında olduğu durumlarda geçerlidir.

Bu alışma çok hedefli bir optimizasyon problemi içermektedir. Hedeflerden birisi ısı transferinin en yüksek olduğu durumun saptanması, diğeri ise basınç düşümünün minimum olduğu durumun saptanmasıdır. Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde hedef fonksiyonları minimum ya da maksimum yapacak bir çözüm seti elde edilmeye çalışılır. Bu zm seti literatürde Pareto optimal olarak adlandırılır (Subaşı 2010, Myers *et al.* 1995). Pareto optimal çözümleri ile bir pareto optimal yüzeyi oluşturulur. rnek bir pareto optimal yüzeyi Şekil 4.17'de verilmiştir.

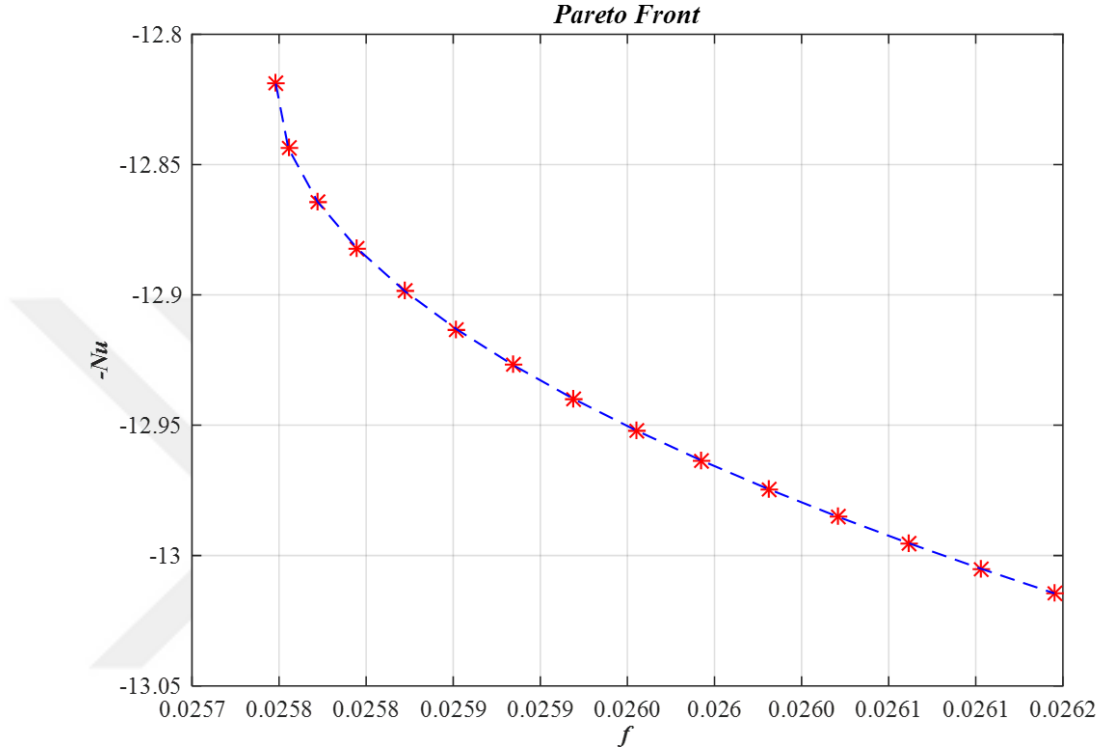


**Şekil 4.17.** Örnek bir pareto optimal yüzeyi (Subaşı 2010).

Pareto optimal çözümler matematiksel açıdan çok amaçlı optimizasyon problemlerinin yakın bir çözümü olarak kabul edilebilir. Bu çözümler içinden ideale en yakın olan seçilmeye çalışılır. Bu seçim işlemi bir karar verme birimi tarafından gerçekleştirilir. Karar verici (KV), sistemi değiştirmek için, kendisinde otorite olan ve sorumluluk taşıyan kişidir. KV, eldeki bilgilere göre mevcut çözüm alternatiflerini inceleyerek, optimumu belirleyen kişi ya da gruplar olabilir. KV'nin problemi daha iyi kavradığı ve farklı çözümler arasındaki tercih ilişkilerini ifade edebildiği varsayılır. Son çözümden KV sorumludur. Çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü, KV-Analist işbirliğinde gerçekleştirilir. Analist, çözüm sürecinin matematiksel ve teorik yönünden sorumlu olan kişi ya da bilgisayar programlarıdır. Analist, çözüm seçeneklerini oluşturur ve KV'nin önerilerine göre seçim yapılır. Çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü ile, pareto optimal olan ve KV'nin gereksinimlerini yerine getirecek, uygun bir çözümün bulunması anlaşılır. Böyle bir çözümün olduğu varsayılır ve o çözüme KV'nin son çözümü denilir (Köksoy vd 2005).

Bu çalışmanın verilerine ait bir pareto optimal yüzeyi elde edebilmek için Normal Sınır kesişimi (Normal Boundary Intersection) kullanılmıştır (Das *et al.* 1998). Pareto optimal

yüzeyi Şekil 4.18’te sunulmuştur. Çözüm kümesi ve amaç fonksiyonlarının aldığı değerler ise Çizelge 4.8’de sunulmuştur.



**Şekil 4.18.** Pareto yüzeyi

**Çizelge 4.8.** Çözüm kümesi ve amaç fonksiyonlarının aldığı değerler

<b>Re</b>	<b>D</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Nu</b>	<b>f</b>
900.00	1.9	0.80	-13.015	0.02620
898.05	1.9	0.80	-13.005	0.02615
896.03	1.9	0.80	-12.995	0.02611
893.94	1.9	0.80	-12.985	0.02607
891.77	1.9	0.80	-12.975	0.02603
889.50	1.9	0.80	-12.964	0.02599
887.12	1.9	0.80	-12.952	0.02596
884.62	1.9	0.80	-12.940	0.02592
881.96	1.9	0.80	-12.927	0.02588
879.14	1.9	0.80	-12.913	0.02585
876.09	1.9	0.80	-12.898	0.02582
872.76	1.9	0.80	-12.882	0.02580
869.06	1.9	0.80	-12.864	0.02577
864.83	1.9	0.80	-12.844	0.02576
859.72	1.9	0.80	-12.819	0.02575

Çizelge 4.8’de verilen değerler Eşitlik 4.8 ile tanımlanan optimizasyon probleminin bir çözümüdür. Bu çözümler arasından uygun olan birinin seçimi KV tarafından yapılır. Çizelge 4.8 incelendiğinde D ve  $\phi$  için optimum değerlerinin sırasıyla 1.9 ve 0.8 olduğu ve dolayısıyla değişmediği, hedef fonksiyonlarının değerlerinin sadece Re sayısı ile değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla KV tarafından yapılacak seçim yalnızca Re sayısının değişimini dikkate alarak gerçekleştirilecektir.

## 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında 1,2 mm, 1,55 mm ve 1,9 mm çapa sahip dairesel kesitli mini kanalda ısı transferi ve sürtünme karakteristikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmada iş akışkanı olarak hacimsel partikül oranları %0, %0,4 ve %0,8 olan saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı kullanılmıştır. Reynolds sayısı 300-600-900 olarak seçilmiştir. Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) yardımıyla sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı için Reynolds sayısı, kanal çapı ve partikül hacimsel oranının bir fonksiyonu olarak modeller kurulmuştur. Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünü minimum yapacak tasarım değişkenlerini belirlemek için çok amaçlı optimizasyon yapılmıştır. Deneysel sonuçlarında elde edilen önemli bulgular aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Hazırlanan nanoakışkanlara yaklaşık 7 saat süreyle ultrasonik homojenizatörde karıştırma işlemi uygulanarak çökelme ve topaklanma gibi problemlerin ortadan kalktığı görülmüştür.
- Isı transferi için deneysel sonuçlar ile literatürde kullanılan modellerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir
- SiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanı farklı hacimsel oranlarda saf suya göre ısı transferinde artışa sebep olmuştur.
- Hausen korelasyonu sabit ısı akısı sınır şartında dairesel borularda termal olarak gelişen, hidrodinamik olarak gelişmiş akışlar için kullanılıp, Hausen korelasyonu ile deneysel Nusselt sayıları arasında maksimum %8'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir.
- Nusselt sayısının yüksek olması taşınım ile ısı transferinin de yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Nusselt sayısı üzerinde partikül hacimsel oranı %52.59 ile en yüksek etkiye, %27.07 ile Reynolds sayısı ikinci en yüksek etkiye ve %16.31 ile kanal çapı üçüncü yüksek etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Sürtünme faktörünün yüksek olması basınç düşümünün de yüksek olduğu anlamına gelir. Sürtünme faktörü üzerinde Reynolds sayısı %76.8 ile en yüksek etkiye, %7.26

ile kanal çapı ikinci en yüksek etkiye ve %1.67 ile partikül hacimsel oranı üçüncü yüksek etkiye sahiptir.

- Kanal çapı sabit tutularak hacimsel partikül oranının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Partikülün hacimsel oranındaki artış Nusselt sayısının artmasını sağlamıştır.
- En düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında 1,2 mm kanal çapına sahip mini kanalda %0,4 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık %11,66 ; %0,8 hacimsel partikül oranında yaklaşık % 45,57 artış meydana gelmiştir.
- 1,55 mm kanal çapına sahip mini kanalda en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,4 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık % 22,04 ; %0,8 hacimsel partikül oranında yaklaşık % 60,54 artış meydana gelmiştir.
- 1,9 mm kanal çapına sahip mini kanalda en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,4 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık % 25,46 ; %0,8 hacimsel partikül oranında yaklaşık % 66,24 artış meydana gelmiştir.
- Kanal çapı sabit tutularak hacimsel partikül oranının sürtünme faktörü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Partikülün hacimsel oranındaki artış sürtünme faktörünün de artmasına sebep olmuştur.
- En düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında 1,2 mm kanal çapına sahip mini kanalda %0,4 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre sürtünme faktöründe yaklaşık %11,56 ; %0,8 hacimsel partikül oranında yaklaşık % 23,13 artış meydana gelmiştir.
- 1,55 mm kanal çapına sahip mini kanalda en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,4 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre sürtünme faktöründe yaklaşık %8,04 ; %0,8 hacimsel partikül oranında yaklaşık % 16,08 artış meydana gelmiştir.
- 1,9 mm kanal çapına sahip mini kanalda en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,4 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre



sürtünme faktöründe yaklaşık % 3,76 ; %0,8 hacimsel partikül oranında yaklaşık % 7,53 artış meydana gelmiştir.

- Kanal çapının Nusselt sayısı üzerindeki etkisini incelemek için hacimsel partikül oranı sabit tutulmuştur. Tüm hacimsel partikül oranlarında kanal çapı arttıkça Nusselt sayısında artış olduğu gözlemlenmiştir.
- En düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında saf su için ( $\phi=0$ ), 1,2 mm kanal çapından 1,55 mm kanal çapına yükseltildiğinde Nusselt sayısında %8,08'lik artış olurken 1,2 mm'den 1,9 mm'ye yükseltildiğinde Nusselt sayısında %16,16'lık artış meydana gelmiştir.
- Hacimsel partikül oranı %0,4 için en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında, 1,2 mm kanal çapından 1,55 mm kanal çapına yükseltildiğinde Nusselt sayısında %11,72'lik artış olurken 1,2 mm'den 1,9 mm'ye yükseltildiğinde Nusselt sayısında %23,44'lük artış meydana gelmiştir.
- Hacimsel partikül oranı %0,8 için en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında, 1,2 mm kanal çapından 1,55 mm kanal çapına yükseltildiğinde Nusselt sayısında %12,73'lük artış olurken 1,2 mm'den 1,9 mm'ye yükseltildiğinde Nusselt sayısında %25,46'lık artış meydana gelmiştir.
- Kanal çapının sürtünme faktörü üzerindeki etkisini incelemek için hacimsel partikül oranı sabit tutulmuştur. Kanal çapı arttıkça sürtünme faktörünün azaldığı gözlemlenmiştir.
- En düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında saf su için ( $\phi=0$ ), 1,2 mm kanal çapından 1,55 mm kanal çapına yükseltildiğinde sürtünme faktöründe %8,78'lik azalış olurken 1,2 mm'den 1,9 mm'ye yükseltildiğinde sürtünme faktöründe %17,56'lık azalış meydana gelmiştir.
- Hacimsel partikül oranı %0,4 için en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında, 1,2 mm kanal çapından 1,55 mm kanal çapına yükseltildiğinde sürtünme faktöründe %11,66'lık azalış olurken 1,2 mm'den 1,9 mm'ye yükseltildiğinde sürtünme faktöründe %23,33'lük azalış meydana gelmiştir.
- Hacimsel partikül oranı %0,8 için en düşük Reynolds sayıları göz önüne alındığında, 1,2 mm kanal çapından 1,55 mm kanal çapına yükseltildiğinde sürtünme faktöründe

% 14'lük azalış olurken 1,2 mm'den 1,9 mm'ye yükseltildiğinde sürtünme faktöründe %28.01'lik azalış meydana gelmiştir.

- Bütün hacimsel oranlarda nanoakışkanların basınç düşümü saf suyunkinden yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
- En düşük Reynolds sayılarında Nusselt sayısı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- Optimum değerler Reynolds sayısı 859-900 arasında, kanal çapı 1.9 mm ve partikül hacimsel yüzdesi ise 0.008 olarak elde edilmiştir.



**KAYNAKLAR**

- Akhavan-Zanjani, H., Saffar-Avval, M., Mansourkiaei, M., Ahadi, M., Sharif, F., 2014. Turbulent convective heat transfer and pressure drop of graphene-water nanofluid flowing inside a horizontal circular tube. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 35, 1230-1240.
- Anderson, M.J., Whitcomb, P.J., 2004, RSM Simplified: Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments. <https://www.statease.com/pubs/rsmsimpexcerpts--chap1.pdf>
- Anoop, K., Sundararajan, T., Das, S.K., 2009. Effect of Particle Size on the Convective Heat Transfer in Nanofluid in the Developing Region, *Int. J. Heat Mass Tran.*, 52, 2189-95.
- Anvari A.R., Lotfi R., Rashidi A.M. and Sattari S., "Experimental research on heat transfer of water in tubes with conical ring inserts in transient regime", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38: 668–671, (2011).
- Avcı, M. 2008. Mikrokanallarda akış ve ısı transferi. Karadeniz Teknik Üniversitesi FenBilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Azari, A., Kalbasi, M., Derakhshandeh, M., Rahimi, M. 2013. An Experimental Study on Nanofluids Convective Heat Transfer Through a Straight Tube under Constant Heat Flux, Fluid dynamics and transport phenomena, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 21:1082—1088.
- Ceylan, A., Jastrzembki, K., Shah, S.I., 2006. Enhanced solubility Ag-Cu nanoparticles and their thermal transport properties. *Metall. Mater. Trans. A*, 37A 2033-2038.
- Choi US., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME FED*, 231, 99–103,
- Chopkar, M., Das, P.K., and Manna, I. 2006. Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications. *Scripta Materialia*, 55(6): 549–552.
- Chun BH, Kang HU, Kim SH., 2008. Effect of alumina nanoparticles in the fluid on heat transfer in double-pipe heat exchanger system, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 25 (5), 966–971
- Corcione, M. Cianfrini, M. Quintino, A. 2012. Heat transfer of nanofluids in turbulent pipe flow. *International Journal of Thermal Sciences*, 56:58-69.
- C.X. Lin, M.A. Ebadian, "The effects of inlet turbulence on development of flow and heat transfer in helically coiled pipe", *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 739–751, 1999.
- Das I. and Dennis, J.E., 1998. Normal-boundary intersection: a new method for generating the pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. *SIAM J. Optim.* 8, 631-657.
- Das, S. K., Choi, S. U. S., Yu, W. and Pradeep, T., 2008. *Nanofluids Science and Technology*, ISBN 9780-470-07473-2 (cloth), John Wiley & Sons, Inc., USA.

- Ding, Y., Wen, D., 2005. Particle Migration in a Flow of Nanoparticle Suspensions, *Powder Technol.*, 149, 84-92.
- Gherasim, I., Roy, G., Nguyen, C.T., Vo-Ngoc, D. 2009. Experimental investigation of nanofluids in confined laminar radial flows, *International Journal of Thermal Sciences*, 48:1486–1493.
- Ghozatloo, A., Shariaty-Niasar, M. and Rashidi, A.M., 2013. Preparation of nanofluids from functionalized graphene by new alkaline method and study on the thermal conductivity and stability. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 89-94.
- He Y., Jin Y., Chen H., Ding Y., Cang D., Lu H., 2007. Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, 2272– 2281.
- Heris, S.Z., Etemad, S.Gh., Esfahany, M.N., 2006. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33, 529–535.
- Heyhat, M.M., Kowsary, F., Rashidi, A.M., Momenpour, M.H., Amrollahi, A. 2013. Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in fully developed flow regime, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44:483–489.
- Hwang, K.S., Jang, S.P., Choi, S.U.S., 2009. Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids in fully developed laminar flow regime. *International Journal of Heat Mass Transfer* 52, 193–199.
- Jung, J. Y., Oh, H. S., Kwak, H. Y., 2009. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. *International Journal of Heat Mass Transfer* 52, 466–472.
- Keleşoğlu 2010. Yön değiştiren kanal akışlarında ısı transferinin incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi. İSTANBUL
- Khanafer, K., Vafai, K. ve Lightstone, M., 2003. Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids, *Int. J. Heat and Mass Trans.*, Cilt No: 46, Sayfa No: 3639–3653.
- Kim, D., Kwon, Y., Cho, Y., Li, C., Cheong, S., Hwang, Y., Lee, J., Hong, D., Moon, S., 2009. Convective Heat Transfer Characteristics Of Nanofluids Under Laminar And Turbulent Flow Conditions, *Current Applied Physics*, Vol. 9(2), e119–e123.
- Köksoy, O. ve Hocaoğlu, G., 2005. Taguchi probleminin çok amaçlı optimizasyon çözümleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18(4), 613-626.
- Lee, S., Choi, S.-S., Li and, S., and Eastman, J.A. 1999. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Heat transfer*, 121(2): 280–289. American Society of Mechanical Engineers.
- Li Y., Zhoua J., Tung S., Schneider E., Xi S., 2009. A review on development of nanofluid preparation and characterization, 196, 89–101.
- Li, Q., Xuan, Y., 2002. Convective Heat Transfer and Flow Characteristics of CuWater Nanofluid, *Sci. China Ser. E*, 45, 408-16.
- Li, X., Zhu, D., Wang, X., Wang, N., Gao, J. and Li, H., 2008. Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids. *Thermochimica Acta*, 469 (1), 98-103.

- Maiga, S.E.B., Palm, S.J., Nguyen, C.T., Roy, G. ve Galanis, N., 2005. Heat Transfer Enhancements by Using Nanofluids in Forced Convection Flows, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Cilt No: 26, Sayfa No: 530–546.
- Masuda H., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N., 1993. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of 7-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles), *Netsu Bus-sei (Japan)* 7, 227–233.
- Myers R.H., Montgomery D.C., 1995. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. New York: John Wiley.
- Pak, B.C., Cho, Y.I., 1998. Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles, *Exp. Heat Transfer*, 11, 151.
- Patel, H.E., Das, S.K., Sundararagan, T., Nair, A.S., Geoge, B., Pradeep, T., 2003. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids, Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. *Applied Physics Letters*, 83, 2931–2933.
- Promvongse, P., Eiamsa-ard, S., “Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator”, *Energy Conversion and Management*, 48: 2867-2882 (2006).
- Rea, U., McKrell, T., Hu, L.W., Buongiorno, J., 2009. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52, (7-8), 2042-2048.
- Subaşı, A., 2010. Yanıt yüzey yöntemi yardımı ile ısı değiştirici optimizasyonu. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Y. Lisans Tezi Erzurum.
- Teng, T.-P., Hung, Y.-H., Teng, T.-C., Mo, H.-E., and Hsu, H.-G. 2010. The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 30(14–15): 2213–2218. Elsevier.
- Wen, D., Ding, Y. 2004. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47, 5181-5188.
- Yu, W., Timofeeva, E.V., Singh, D., France, D.M. Roger, Smith, K. 2013. Investigations of heat transfer of copper-in-Therminol 59 nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 64:1196–1204.
- Zamzamian, A, Oskouie SN, Doosthoseini A, Joneidi, Pazouki A M., 2011. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35 (3), 495–502.

## ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında İngiltere’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden, 2012 yılında ise Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.

2013 yılından itibaren DSI’de Makine Mühendisi olarak görev yapmaktadır.