



**MİNİKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA  
TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Murat CEYLAN**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Prof. Dr. Bayram ŞAHİN  
Dr. Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK  
2018  
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MİNİKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA TAŞINIMLA ISI  
TRANSFERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Murat CEYLAN**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN  
İkinci Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Erzurum**

**2018**

**Her hakkı saklıdır.**

**T.C.**  
**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**TEZ ONAY FORMU**

---

**MİNİKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA TAŞINIMLA ISI  
TRANSFERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Bayram ŞAHİN ve Dr. Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK danışmanlığında, Murat CEYLAN tarafından hazırlanan bu çalışma 09.07.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Başkan:	Prof. Dr. Bayram ŞAHİN	<i>İmza:</i>
Üye :	Dr. Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK	<i>İmza:</i>
Üye :	Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY	<i>İmza:</i>
Üye :	Prof. Dr. Kadir BAKIRCI	<i>İmza:</i>
Üye :	Dr. Öğr. Üyesi Şendoğan KARAGÖZ	<i>İmza:</i>

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

**Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

09.07.2018

Murat CEYLAN

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## MİNİKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Murat CEYLAN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK

Endüstriyel gelişmeler ile birlikte mekanik veya elektronik cihazların mini ve mikro boyutlarda üretilebilmesi mümkün hale gelmiştir. Boyutlardaki küçültme cihazların kullanımı esnasında açığa çıkan ısı enerjisinin artmasına sebep olmakta yani artan soğutma yüklerini beraberinde getirmektedir. Bu durum ısı enerjisinin daha efektif biçimde sistemden uzaklaştırmasını gerekli kılmıştır. Yüksek miktarda ısı çekebilmeleri ve yüksek yüzey alanı/hacim oranlarından dolayı minikanallar ısı transferi kritik olan sistemler için önemlidir. Yüksek miktarda ısı çekebilmek için boyutlardaki küçültmenin yanı sıra bir diğer seçenek iş akışkanının ısı performansını iyileştirmektir.

Bu çalışmada mini kanallarda nanoakışkanların karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada sırasıyla 1,21 mm, 1,5 mm ve 1,9 mm çapa sahip dairesel kesitli mini kanallar kullanılmıştır. Deneyler iş akışkanı olarak sırasıyla saf su ve hacimsel partikül oranları %0,25, %0,75 ve %1,25 olan saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan nanoakışkanlarının 20-60°C sıcaklık aralığında ısı iletkenlik ve viskozite ölçümleri yapılmıştır. Karma taşınım mekanizmasında çalışabilmek için deneyler esnasında Reynolds sayısı aralığı 15-65 tutulmuştur.

**2018, 131 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** SiO<sub>2</sub>, Minikanal, Isı Transferi, Karma Taşınım

## **ABSTRACT**

### **MASTER THESIS**

# **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER OF NANOFLUIDS IN MINICHANNELS**

Murat CEYLAN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Second Supervisor: Assist. Prof. Eda Feyza AKYÜREK

Industrial developments have made it possible to produce mechanical or electronic devices in mini and micro dimensions. The reduction in size causes the increase in the heat energy that is released during the use of the devices, which leads to increased cooling loads. This makes it necessary to remove heat energy more effectively from the system. Minichannels are important for systems that heat transfer is critical because they can remove heat energy highly and they have high surface area/volume ratio. Another option is to improve the thermal performance of the work fluid as well as reduce the size in order to be able to be removed a high amount of heat.

In this study, heat transfer characteristics of nanofluids in minichannels by mixed convection are investigated experimentally. Circular cross section minichannels with diameters of 1,21 mm, 1,5 mm and 1,9 mm, respectively, were used in the study. Experiments were carried out with purified water based SiO<sub>2</sub> nanofluid, which is pure water and nanoparticle volume ratios of 0,25%, 0,75% and 1,25%, respectively, as the working fluid. The thermal conductivity and viscosity measurements of nanofluids were made at 20-60°C temperature range. The Reynolds number range was held at 15-65 during the experiments in order to work under mixed convection conditions.

**2018, 131 pages**

**Keywords:** SiO<sub>2</sub>, Minichannel, Heat Transfer, Mixed Convection

## TEŞEKKÜR

Çalışmanın her aşamasında teşvik, destek ve yardımlarını gördüğüm, bilgi ve tecrübelerini bana aktaran değerli danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Bayram ŞAHİN ve Dr. Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK'e teşekkür ederim. Ayrıca yapıcı eleştiriden ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY'a ilgisinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında fikir ve düşüncelerini esirgemeyen çok sevgili ekip arkadaşlarım Sayın Öğr. Gör. Kadir GELİŞ'e, Sayın Arş. Gör. Rahim Aytuğ ÖZER'e, Sayın Arş. Gör. Emre MANDEV'e, Sayın Arş. Gör. Orhan YILDIRIM'a destek ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca Erzurum Teknik Üniversitesi mesai arkadaşlarıma manevi desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın her aşamasında bana maddi ve manevi destek olan sevgi ve desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve de duaları ile yanımda olan kıymetli büyüklerime şükranlarımı sunarım.

**Murat CEYLAN**

**Temmuz, 2018**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Isı Transferi Nedir? .....	3
1.1.1. Isı transferi mekanizmaları.....	3
1.1.2. İletim ile ısı transferi .....	4
1.1.3. Taşınım ile ısı transferi.....	6
1.1.4. Işınım ile ısı transferi.....	9
1.1.5. Isı transferini artırma yöntemleri .....	10
1.2. Nanoakışkanlar.....	12
1.2.1. Nanoakışkanların çeşitleri.....	13
1.2.2. Nanoakışkanların hazırlanması .....	14
1.2.3. Nanoakışkanların kararlılığı.....	14
1.3. Minikanal Tanımı.....	15
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	17
2.1. Karma Taşınım.....	17
2.2. Nanoakışkanlar ve Termofiziksel Özellikleri .....	21
2.2.1. Isıl iletkenlik .....	21
2.2.2. Viskozite .....	29
2.2.3. Isıl iletkenlik ve viskozite modelleri .....	33
2.3. Nanoakışkanların Isıl İletkenliği Arttıran Mekanizmalar .....	39
2.3.1. Nanopartiküllerin Brownian hareketi.....	39
2.3.2. Nanopartiküllerin Kümelenmesi .....	40
2.3.3. Nanopartiküller etrafında sıvı katmanlaşması.....	42



2.4.4. Nanopartiküllerde balistik fonon iletimi .....	43
2.5.5. Yakın alan radyasyonu .....	44
2.2.6. Nanoakışkanların ısı transferi .....	44
2.4. Mini ve Mikrokanallarda Taşınımın Isı Transferi .....	48
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	56
3.1. Deneysel Materyaller .....	57
3.1.1. Hassas terazi .....	58
3.1.2. Ultrasonik homojenizatör .....	58
3.1.3. Viskozimetre .....	59
3.1.4. Isıl iletkenlik ölçer .....	60
3.1.5. Pompa .....	60
3.1.6. Akışkan besleme haznesi .....	61
3.1.7. Debimetre .....	61
3.1.8. Serpantin ve sirkülatörlü su banyosu .....	62
3.1.9. Güç kaynağı .....	63
3.1.11. Veri okuma kartı .....	63
3.1.12. Isıl çiftler .....	64
3.2. Test Bölgesi .....	68
3.3. Hesaplamalar ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi .....	69
3.3.1. Nanoakışkan hazırlanması ile ilgili hesaplamalar .....	69
3.3.2. Isı transferi hesaplamaları .....	71
3.3.3. Belirsizlik analizi .....	73
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	80
4.1. Isı Transfer Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması .....	80
4.2. Karma Taşınım Bulguları .....	83
5. SONUÇ ve ÖNERİLER .....	110
KAYNAKLAR .....	114
ÖZGEÇMİŞ .....	131

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$k$	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m.K)
$Q$	Isı miktarı (W)
$A$	Isı transferi yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
$T$	Sıcaklık (°C)
$h$	Isı taşınım katsayısı (W/m <sup>2</sup> .K)
$\sigma$	Stepfan-Boltzmann sabiti (W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )
$\lambda$	Ortalama serbest yol (m)
$D$	Çap (m)
$V$	Gerilim (V)
$I$	Akım (A)
$U$	Ortalama hız (m/s)
$\beta$	Hacimsel genişleme katsayısı (1/K)
$g$	Yerçekimi ivmesi (m/s <sup>2</sup> )
$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$	Dinamik viskozite (kg/m.s)
$\nu$	Kinematik viskozite (m <sup>2</sup> /s)
$\varphi$	Hacimsel partikül oranı
$\Phi$	Doğal taşınım parametresi
°	Derece
m	Metre
mm	Milimetre

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
MEMS	Mikro elektro-mekanik sistemler
Re	Reynolds sayısı
Gr	Grashof sayısı
Nu	Nusselt sayısı
Ri	Richardson sayısı
Gz	Graetz sayısı
Ra	Rayleigh sayısı
Cm	Nanoakışkan kütleli oranı

<b><u>Alt İndisler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
s	Yüzey
$\infty$	Ortam
L	Lokal
h	Hidrolik
eff	Efektif
b	Temel akışkan
nf	Nanoakışkan
p	Partikül
cl	Kümelere
l	Nanotabaka
g	Giriş
ç	Çıkış
f	Zorlanmış
ort	Ortalama
bulk	Bulk sıcaklıkta
duvar	Yüzey sıcaklığında

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Isı transferi mekanizmaları .....	4
Şekil 1. 2. Bir maddenin farklı fazlarda ısı iletim mekanizmaları .....	5
Şekil 1. 3. Akışkan hareketinin sağlanma şekline göre taşınım ile ısı transferi.....	6
Şekil 1. 4. Doğal taşınım ile ısı transferi .....	8
Şekil 2. 1. Efektif ısı iletkenliklerin hacimsel partikül oranı ile değişimi .....	24
Şekil 2. 2. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklıkla değişimi .....	31
Şekil 2. 3. Yüksek iletkenlik yolu (Özerinç et al. 2010).....	40
Şekil 2. 4. Nanopartikül etrafında oluşan katmanlı yapı (Özerinç et al. 2010).....	42
Şekil 2. 5. Deneysel bir çalışmada kullanılan mikrokanal geometrileri .....	50
Şekil 3. 1. Mini kanal deney düzeneği .....	56
Şekil 3. 2. Hassas terazi.....	58
Şekil 3. 3. Ultrasonik homojenizatör .....	59
Şekil 3. 4. Viskozimetre .....	59
Şekil 3. 5. Isıl iletkenlik ölçer .....	60
Şekil 3. 6. Pompa .....	61
Şekil 3. 7. Akışkan besleme haznesi .....	61
Şekil 3. 8. Debimetre.....	62
Şekil 3. 9. Serpantin ve sirkülatörlü su banyosu .....	62
Şekil 3. 10. Güç kaynağı .....	63
Şekil 3. 11. Veri okuma kartı .....	63
Şekil 3. 12. K tipi ısı çift .....	64
Şekil 3. 13. Test bölgesi şematiği .....	68
Şekil 3. 14. Farklı akışkanlar için ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi .....	76
Şekil 3. 15. Farklı sıcaklıklarda ısı iletkenliğinin hacimsel partikül oranı ile değişimi....	76
Şekil 3. 16. Farklı akışkanlar için viskozitenin sıcaklıkla değişimi.....	78
Şekil 4. 1. Saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması (D=1,21 mm) .	81
Şekil 4.2. Saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması (D=1,5 mm) ....	81
Şekil 4. 3. Saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması (D=1,9 mm) ...	82
Şekil 4. 4. Isı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (D=1,21 mm).....	83
Şekil 4. 5. Isı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (D=1,5 mm).....	84
Şekil 4. 6. Isı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (D=1,9 mm).....	84

Şekil 4. 7. Saf Su için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi .....	86
Şekil 4. 8. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi .....	86
Şekil 4. 9. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi .....	87
Şekil 4. 10. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi .....	87
Şekil 4. 11. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	88
Şekil 4. 12. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	89
Şekil 4. 13. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	89
Şekil 4. 14. Saf su için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi .....	91
Şekil 4. 15. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi .....	91
Şekil 4. 16. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi .....	92
Şekil 4. 17. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi .....	92
Şekil 4. 18. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	93
Şekil 4. 19. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	94
Şekil 4. 20. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	94
Şekil 4. 21. Saf Su için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	95
Şekil 4. 22. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	95
Şekil 4. 23. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	96

Şekil 4. 24. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	96
Şekil 4. 25. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Reynolds sayısı ile değişimi .....	97
Şekil 4. 26. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Reynolds sayısı ile değişimi .....	98
Şekil 4. 27. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Reynolds sayısı ile değişimi .....	98
Şekil 4. 28. Saf su için tüm kanal çaplarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Reynolds sayısı ile değişimi .....	99
Şekil 4. 29. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Reynolds sayısı ile değişimi .....	99
Şekil 4. 30. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Reynolds sayısı ile değişimi .....	100
Şekil 4. 31. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Reynolds sayısı ile değişimi .....	100
Şekil 4. 32. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	101
Şekil 4. 33. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	102
Şekil 4. 34. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	102
Şekil 4. 35. Saf Su için tüm kanal çaplarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	103
Şekil 4. 36. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	103
Şekil 4. 37. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	104
Şekil 4. 38. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO <sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	104
Şekil 4. 39. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için $\Phi/Gz$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	106

Şekil 4. 40. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için $\Phi/Gz$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	106
Şekil 4. 41. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için $\Phi/Gz$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	107
Şekil 4. 42. Saf Su için tüm kanal çaplarında $\Phi/Gz$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	107
Şekil 4. 43. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı $SiO_2$ nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında $\Phi/Gz$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	108
Şekil 4. 44. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı $SiO_2$ nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında $\Phi/Gz$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	108
Şekil 4. 45. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı $SiO_2$ nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında $\Phi/Gz$ teriminin Grashof sayısı ile değişimi .....	109

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. 1. Isı transferini arttırmak için aktif ve pasif yöntemler .....	11
Çizelge 1. 2. Kanalların boyutlarına göre sınıflandırılması .....	16
Çizelge 2. 1. Klasik ısı transferi akışkanları ve bazı katı malzemeler için ısı iletkenlikler .....	22
Çizelge 2. 2. Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri için birkaç örnek .....	25
Çizelge 2. 3. Nanoakışkanların ısı iletkenlik özet çizelgesi.....	27
Çizelge 2. 4. Nanoakışkan viskozitesi özet çizelgesi.....	32
Çizelge 2. 5. Su ve EG bazlı nanoakışkanların deneysel bağıl viskoziteleri .....	33
Çizelge 2. 6. Isıl iletkenlik modelleri özet çizelgesi (Angayarkanni and Philip 2015)...	34
Çizelge 2. 7. Nanoakışkanların viskozite modelleri sayısal çalışmalar (Azmi et al. 2016b) .....	37
Çizelge 2. 8. $Re=100$ 'de ve %1 hacimsel oranda nanopartiküllerin saf su içerisinde basınç düşümü ve ortalama Nusselt sayıları .....	46
Çizelge 2. 9. Su bazlı nanoakışkanların ısı transferi özet çizelgesi .....	47
Çizelge 2. 10. Mini/mikrokanallar için deneysel ve sayısal çalışmalar özet çizelgesi ...	52
Çizelge 3. 1. Isıl çiftlere ait kalibrasyon eğrileri ve denklemleri .....	65
Çizelge 3. 2. Belirsizlik analizi sonuçları.....	74
Çizelge 3. 3. Hazırlanan nanoakışkanlar için gerekli partikül ve temel akışkan miktarları (1000 mL nanoakışkan için).....	75
Çizelge 3. 4. $SiO_2$ nanopartikül özellikleri.....	75



### 1. GİRİŞ

Minyatürleştirme, son zamanlarda birçok gelişmiş teknolojinin yanı sıra geleneksel endüstriler için de anahtar sözcük haline gelmiştir. Örnek vermek gerekirse minyatürleştirilmiş sistemler elektronik, kimyasal, ilaç ve tıbbi endüstriler gibi ticari sektörlerde olduğu kadar biyolojik ve kimyasal savaş savunması için askeri sektörde de aşamalı olarak kullanılmaktadır.

Mikro ölçekli termal, akışkan ve kimyasal sistemlerin ortaya çıkması ile ultra kompakt ısı değiştiricileri, minyatür ve mikro pompalar, minyatür kompresörler, mikro türbinler, mikro reaktörler, dağıtılmış güç üretimi için mikro termal sistemlerin geliştirilmesi birçok araştırmacı, araştırma enstitüsü ve yatırım ajansının önemli bir gündemi haline gelmiştir. Minyatürleştirme, yalnızca kompakt sistemler üretme açısından değil, aynı zamanda elektronik aygıtların mikro boyutlarda akışa sahip olan bileşen ve sensörlerinin soğutulması durumu gibi, çok daha küçük kanal boyutlarına sahip zorlu akışkan akışı için zorunlu hale gelmiştir. Buna ek olarak, mini ve mikro kanalları kullanarak doğru minyatürleştirmenin daha yüksek sistem verimliliğine neden olabileceği gösterilmiştir (Matos and Valerio 2009).

Kanal içerisindeki akışkan akışı birçok doğal ve insan yapımı sistemin temelindedir. Kanal duvarı boyunca gerçekleşen ısı ve kütle transferi, beyin, akciğerler, böbrekler, bağırsaklar, kan damarları gibi biyolojik sistemlerde ve ısı değiştiriciler, nükleer reaktörler, tuz giderme üniteleri, hava ayırma ünitesi gibi birçok insan yapımı sistemde sıklıkla karşımıza çıkar (Kandlikar et al. 2005).

Endüstriyel gelişmeler ile birlikte ısı transferi üzerindeki iyileştirme gayretleri artarak devam etmektedir. Isı transferi nasıl iyileştirilir sorusuna aktif, pasif yöntem olarak sınıflandırılan ısı transferi iyileştirme yöntemleri içerisinde yanıt bulunabilir. Sisteme harici bir güç kaynağından enerji verilmesi ile ısı transferinde iyileşmenin sağlandığı yöntem aktif yöntem olarak, dışardan enerji gerektirmeyen genellikle sistem içine eleman eklenmesi, geometrik şekil değişiklikleri ile sistem üzerinde ısı transferi iyileştirmesinin sağlandığı yöntem pasif yöntem olarak adlandırılır.

## 1. GİRİŞ

---

Nanoakışkan kullanımı ısı transferi üzerindeki iyileştirme gayreti için pasif yöntem olarak son yıllarda oldukça göze çarpan bir alternatif olmuştur (Geliş 2013).

Bununla birlikte, mini ve mikro kanallardaki akışkan akışı olayı, alışlagelmiş boyutlara sahip kanallardaki akışkan akışındakilerden oldukça farklıdır. Bu nedenle, bu temel unsurları anlamak çok önemlidir. Alışlagelmiş kanallar ya da makro ölçekli kanallara kıyasla mini ve mikro kanallardaki akışkan akış olaylarının önemli farklılıklarından dolayı, mini ve mikro ölçekli kanallar ile makro boyutlu kanallar arasındaki ayırım konusunda önemli olan husus açıklığa kavuşturulmalıdır. Bununla birlikte, henüz literatürde açık bir şekilde evrensel bir anlaşma tespit edilmemiştir.

Nano boyuttaki parçacıkların kullanımı, ilk olarak yıllar önce Argonne National Laboratory' de bir araştırma grubu tarafından sürekli olarak incelenmiştir. 1995'te Choi muhtemelen nanometre boyutlarında partiküllere sahip akışkanları 'nano-akışkanlar' olarak isimlendiren ilk kişi olmuştur. Ortaya çıkarılan bu yeni türdeki akışkanların ısı özellikleri ve ısı transferi uygulama alanlarındaki performansları incelenmeye başlamıştır. Yüksek ısı iletkenliğe sahip, nano ölçekli katı partiküllerin (alüminyum, bakır, gümüş, vs.) alışlagelmiş ısı transferi akışkanının içine katılmasıyla elde edilen yeni ısı transferi akışkanına “nanoakışkan” ismi verilmiştir (Daungthongsuk and Wongwises 2007).

Isı transferi hızı dairesel bir boru için  $D$  çapı ile değişen yüzey alanına bağlı iken debi  $D^2$  ile doğru orantılı olan kesit alanına bağlıdır. Burada boru yüzey alanı/hacim oranı dikkate alındığında bu oran  $1/D$  olarak değişir. Açıkça görüldüğü üzere, çap azaldıkça yüzey alanı/hacim oranı artar. Yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip minikanallar ile nano akışkanların birlikte kullanılması daha yüksek verimli ısı değiştirici tasarımına imkân verecektir.

Bu çalışmada minikanallarda nanoakışkanların karma taşınımıyla ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada sırasıyla 1,21 mm, 1,5 mm ve 1,9 mm çapa sahip mini boru kullanılmıştır. Deneyler iş akışkanı olarak sırasıyla saf su ve hacimsel partikül oranları %0,25, %0,75 ve %1,25 olan saf su bazlı  $SiO_2$  nanoakışkanı ile gerçekleştirilmiştir.

Karma taşınım mekanizmasında çalışabilmek için deneyler esnasında Reynolds sayısı aralığı 15-65 tutulmuştur. Seçilen parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Karma taşınım koşullarında (düşük Reynolds sayılarında) deneysel verilerin elde edilmesi ve karşılaştırılmasındaki güçlükler sebebiyle bu konudaki deneysel çalışma sayısının oldukça az olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın amacı minikanallarda nanoakışkan kullanarak karma taşınım ile ısı transferi performansını incelemek ve minikanallarda karma taşınım literatürüne katkı sağlamaktır.

### 1.1. Isı Transferi Nedir?

Kavram olarak ısı tek başına bir anlam çağrıştırmamakla beraber iki ortam arasında transfer edilirken anlam kazanan bir enerji türüdür. Kütle transferi gerçekleşmesini sağlayan potansiyel konsantrasyon farkı, elektrik akımı oluşmasını sağlayan potansiyelin gerilim olması gibi ısı enerjisi transferi oluşmasını sağlayan potansiyel sıcaklık farkı olmuştur. Buradan hareketle, aralarında sıcaklık farkına sahip birbirini gören veya temas halinde bulunan ortamlar arasında gerçekleşen ısı enerjisi aktarımı ısı transferi ismini alır. Isı transferi yönü her zaman yüksek sıcaklığa sahip ortamdan düşük sıcaklıktakine doğrudur. Isı transferi uygulamaları günlük hayatımızın hemen hemen her alanında karşımıza çıkmaktadır. Günlük hayatımız göz önüne alındığında elektrikli ev aletleri, elektronik aygıtlar, bilgisayarlar, insan vücudu, iklimlendirme sistemleri; mühendislik alanları göz önüne alındığında buhar ve gaz türbinleri, güneş enerjisi sistemleri, motorlar, enerji santralleri gibi birçok yerde ısı transferi karşımıza çıkmaktadır.

#### 1.1.1. Isı transferi mekanizmaları

Isı transferi üç farklı biçimde gerçekleşebilir: iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışınım (radyasyon). Bu üç farklı ısı transferi mekanizmasının gerçekleşmesi için bir sıcaklık farkı gerekir ve tümünde ısı transferi yönü yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktakine doğrudur.

## 1. GİRİŞ

Parçacıklar arası etkileşim sebebiyle gerçekleşen, enerjinin maddenin daha yüksek enerjili parçacıklarından bitişiklerinde yer alan daha düşük olanlara aktarılması iletim ile ısı transferidir.

Katı bir yüzey ile bitişğinde olan hareketli sıvı veya gaz akışkan arasında gerçekleşen enerji transferi taşınım ile ısı transferidir.

Maddeden elektromanyetik dalga ve fotonlar şeklinde yayılan atom veya moleküllerin elektronik düzenlerindeki değişme sonucunda gerçekleşen enerji transferi ışınım ile transferidir (Cengel 2014).



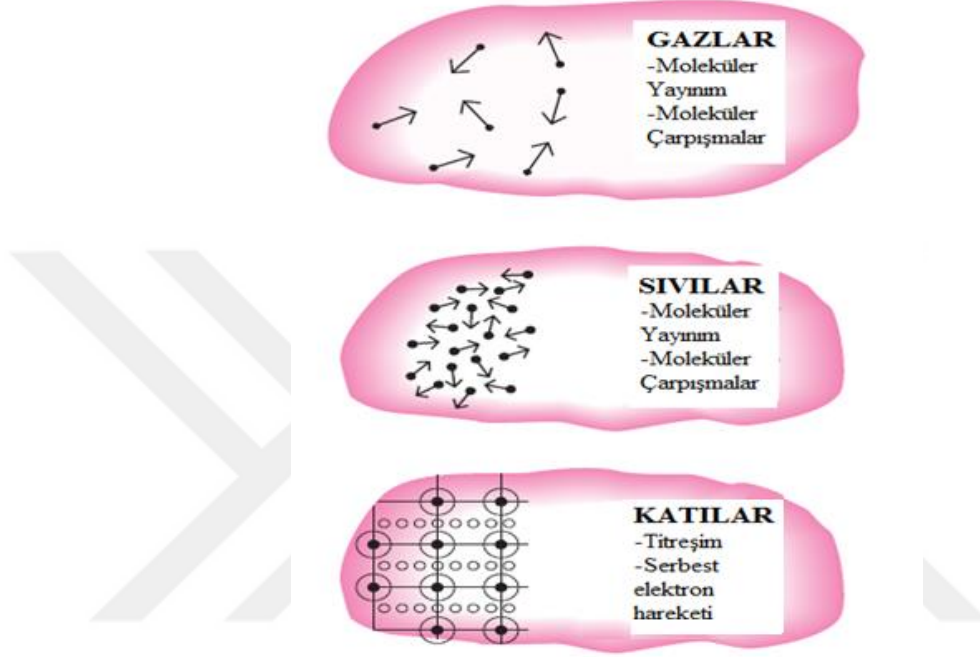
Şekil 1. 1. Isı transferi mekanizmaları

### 1.1.2 İletim ile ısı transferi

İletim, parçacıklar arası etkileşim sebebiyle gerçekleşen, enerjinin maddenin daha yüksek enerjili parçacıklarından bitişiklerinde yer alan daha düşük olanlara aktarılması olayıdır ve durgun bir ortam içinde gerçekleşir. Sıfırdan farklı sıcaklık gradyanının bulunduğu ortamlarda homojen bir sıcaklık dağılımı olmaz ve sıcaklık farkına sahip bölgeler arasında yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru ısı transferi meydana gelir. Isı enerjisi transferi atom ve moleküllerle sağlanır.

## 1. GİRİŞ

Isı enerjisi aktarımı katılarda atomlar arası mesafenin küçük olması sebebiyle sadece titreşim biçiminde meydana gelen hareketlerle meydana gelirken, daha az moleküler arası etkileşime sahip olan sıvılarda moleküllerin çarpışmaları esnasında gerçekleşir. Gazlarda ise sıvı ortamlardaki gibi çarpışma sonucu ısı enerjisi aktarımı oluşur (Şekil 1.2).



Şekil 1. 2. Bir maddenin farklı fazlarda ısı iletim mekanizmaları

İletimle ısı transferinde sıcaklık farkı, ısı transferi yüzey alanı, ısı transferinin gerçekleştiği bölgeler arasındaki uzaklık ve ortamın ısı iletim katsayısı etkili olan parametrelerdir. Bu parametreleri kapsayan Fourier ısı iletim kanunu aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Fourier ısı iletim kanunundan kararlı hal durumunda bir boyutlu ısı iletiminde yararlanılır. Eşitlik 1.1' de,  $\frac{dT}{dx}$  x yönündeki sıcaklık gradyanı, A ısı transferi yüzey alanı ve k ise ilgili ortamın ısı iletim katsayısıdır.

## 1.1.3. Taşınım ile ısı transferi

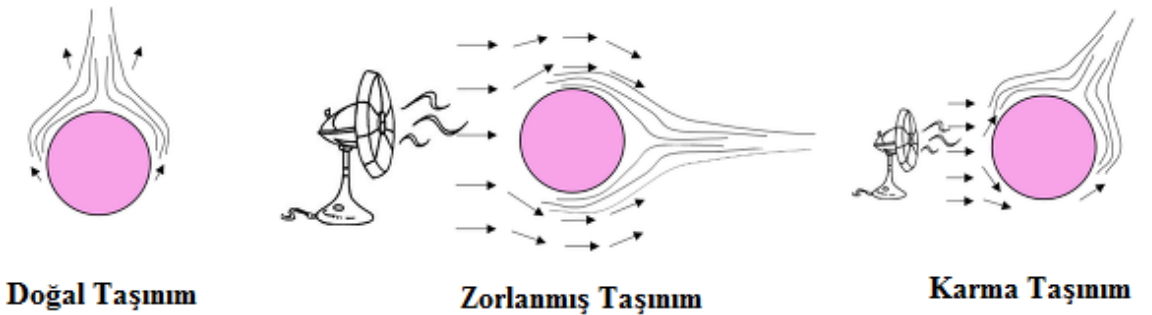
Sıcaklık farkına sahip durgun bir ortamla (katı yüzey) hareketli akışkan arasında gerçekleşen ısı transferi mekanizmasıdır. Ortamlardan birinin hareketli olması önemlidir. Bu koşul sağlanmazsa iletim mekanizmasından bahsetmek gerekir. Taşınım ile ısı transferi mekanizmasında hareketli akışkan molekülleri yüzeye temasları sonucu kazandıkları enerjiyi akışkan boyunca aktarırlar. Taşınım ile ısı transferinde sıcaklık farkı, ısı transferi yüzey alanı, ısı taşınım katsayısı etkili olan parametrelerdir. Newton Soğutma yasası ile ifade edilen ısı taşınım eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (1.2)$$

Eşitlik 1.2' de verilen Newtonun Soğutma Yasası'nda  $h$  ısı taşınım katsayısı,  $A$  ısı transferi yüzey alanı,  $T_s$  yüzey sıcaklığı ve  $T_\infty$  ortam sıcaklığıdır.

Taşınım ile ısı transferinde hareketli akışkana hareketin nasıl verildiği önemlidir. Bu çalışmada yer alan taşınım ile ısı transferi akışkana hareketin sağlanma şekline göre üç biçimde meydana gelir;

- 1- Doğal Taşınım
- 2- Zorlanmış Taşınım
- 3- Karma Taşınım



Şekil 1. 3. Akışkan hareketinin sağlanma şekline göre taşınım ile ısı transferi

## 1. GİRİŞ

---

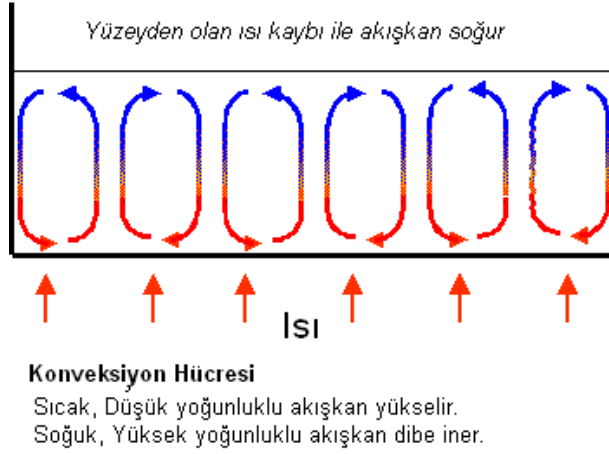
Doğal taşınım ile ısı transferinde akışkan hareketi akışkan içindeki kaldırma kuvvetleri ile meydana gelir. Bu kuvvet akışkan içindeki yoğunluk gradyanı ile yoğunlukla orantılı bir gövde kuvvetinin birlikte olmalarının sonucu ortaya çıkar. Genellikle gövde kuvveti yerçekimi kuvvetidir. Bir akışkan içinde yoğunluk gradyanını ortaya çıkarabilecek farklı durumlar olmakla birlikte en genel olanı bir sıcaklık gradyanına bağlı yoğunluk farklılığıdır. Gazların ve sıvıların yoğunluklarının sıcaklığa bağlı olduğu bilinmektedir. Yoğunluk genellikle artan sıcaklıkla birlikte, akışkanın genişlemesinden dolayı azalır.

Zorlanmış taşınım fan, pompa gibi dış etkiler yardımıyla meydana gelirken, doğal taşınım sıcaklık ve yoğunluk farkına bağlı olan kaldırma kuvveti etkisiyle meydana gelir. Bu sebeple zorlanmış taşınımındaki akış hızları yüksek, doğal taşınımındaki akış hızları ise hayli düşüktür (Incropera et al. 2010). Doğal, zorlanmış ve karma taşınım mekanizmalarının gerçekleşme durumu aşağıda yer alan eşitsizliğin sol tarafındaki ifadede yer alan ve kaldırma kuvvetlerinin, atalet kuvvetlerine oranı olarak tanımlanan Richardson sayısına göre belirlenir.

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \gg 1 \quad (1.3)$$

Bu oranda  $Gr_L$ ; Grashof sayısı olarak isimlendirilen boyutsuz bir sayıdır. Grashof sayısı, akışkan üzerine etkiyen kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranının bir göstergesidir.  $Re_L$  ise bir akışkan parçacığı üzerine etkiyen atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranını belirten Reynolds sayısıdır. Eğer  $Gr_L$  ile  $Re_L$  arasında yukardaki koşul sağlanırsa, akışta zorlanmış taşınımın etkileri göz ardı edilebilir.

Pek çok mühendislik uygulamasında doğal taşınım ile ısı transferi ile karşılaşıldığından konunun daha iyi kavranması tasarımcılar için büyük öneme sahiptir. Doğal taşınım ile ısı transferi, yaşam alanları için ısı konforu, enerji etkinliğine sahip bina tasarımı, ısı değiştiriciler, güneş enerjisi sistemleri, nükleer reaktörlerin soğutulması gibi pek çok konuda etkin biçimde uygulama alanına sahiptir. Ayrıca son yıllarda azalan mevcut doğal kaynaklar ve enerji etkin tasarım parametrelerinin önem kazandığı göz önüne alındığında doğal taşınım ile ısı transferinin önemi artış göstermiştir.



Şekil 1. 4. Doğal taşınım ile ısı transferi

Zorlanmış taşınım ile ısı transferinde genel olarak fan, pompa gibi ek bir enerji ihtiyacı meydana gelir. Zorlanmış taşınım ile ısı transferinde aşağıdaki koşul sağlandığında doğal taşınım etkileri göz ardı edilir.

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \ll 1 \quad (1.4)$$

Zorlanmış taşınım gerçekleşirken iki farklı akıştan bahsedilebilir. Gerçekleşen akış; bir boru demeti, levha gibi yüzey üzerinde sınırlandırılmayan serbest bir akışkan hareketi gerçekleştiği zaman dış akış, kanal veya boru içi akış gibi akışkan hareketi yüzeyler tarafından sınırlandırılıyorsa iç akış olarak değerlendirilir.

Taşınım ile ısı transferinde genellikle zorlanmış taşınımdan söz ederken, doğal taşınımın etkileri göz ardı edilir. Aslında bu bir kabuldür. Kararsız bir sıcaklık gradyanı varsa doğal taşınımın gerçekleşmesi muhtemeldir. Düşük Re sayıları için doğal taşınımın göz ardı edilmesi hataya yol açmaktadır. Doğal ve zorlanmış taşınımın birlikte gerçekleştiği karma taşınım aşağıdaki koşul için söz konusudur.

$$0,01 < \frac{Gr_L}{Re_L^2} < 10 \quad (1.5)$$



Kaldırma kuvvetinin zorlanmış akıştaki ısı transferi üzerindeki etkisi, bu kuvvetin yönü ile akış yönü arasındaki farktan önemli derecede etkilenir. Kaldırma kuvvetinin etkili olduğu, zorlanmış akışla ilgili detaylı incelenmiş üç özel durum; aynı yönlü (destekleyen akış), karşı yönlü (engelleyen akış) ve dik yönlü (çapraz) hareket durumlarıdır.

Örnek vermek gerekirse, ısıtılmış dikey bir levha üzerinde yukarı ve aşağı doğru zorlanmış akışlar, sırasıyla destekleyen akış ve engelleyen akış durumlarıyla eşleşir. Çapraz akış içinse ısıtılmış bir silindir, küre veya yatay bir levha üzerindeki yatay akış örnek gösterilebilir. Destekleyici ve çapraz akışlarda kaldırma kuvveti, sadece zorlanmış taşınım olması durumundaki ısı geçişini artırıcı etkiye sahiptir. Karşı akışlarda ise ısı transferini azaltıcı yönde etki gösterir.

Zorlanmış ve doğal taşınımın birlikte görüldüğü problemlere 1970 sonları ve 1980 ortaları arasında oldukça önem gösterilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, laminer zorlanmış taşınım akışlarında kaldırma etkilerinin ısı geçişini önemli oranda artırabileceği, fakat zorlanmış taşınımın türbülanslı olması halinde bu artışın göz ardı edilebileceğinden bahsedilmektedir (Incropera et al. 2010).

### 1.1.4. Işınım ile ısı transferi

Bu ısı transferi mekanizmasında ısı enerjisi elektromanyetik dalgalar veya tanecikler yoluyla transfer edilir. Işınım ile ısı transferi iletim ve taşınımından farklı olarak bir aracı ortam gerektirmez. Işınım hacimsel bir olay olduğundan; bütün katılar, sıvılar ve gazlar, ışınımı değişen seviyelerde yayma, soğurma veya geçirme özelliğine sahiptir. Işınım ile ısı transferi cismin yüzey alanına, yayıcılığına ve de yüzey-çevre sıcaklığına bağlıdır ve Stefan-Boltzmann yasası ifade edilir. Eşitlik 1.6'da gösterilen  $\epsilon$  ısı kaynağının yayma oranı ve  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  değeri Stefan Boltzmann sabitidir (Cengel 2014).

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (1.6)$$

### 1.1.5. Isı transferini arttırma yöntemleri

İçinde bulunduğumuz yüzyılda bilgisayar, elektronik ve haberleşme teknolojilerinde büyük gelişmeler olmuştur ve olmaya devam etmektedir. Hayatın her alanında enerji ihtiyacının artması enerjinin daha etkin ve verimli kullanımı konusundaki çalışmaları artmaya teşvik etmektedir. Buradan yola çıkarak enerjinin daha etkin ve verimli kullanımı alternatif bir enerji kaynağı olarak kabul edilebilir.

Endüstri ve teknolojinin neredeyse bütün alanlarında kullanılan ısı değiştirici ve soğutucuların ısı performansını iyileştirmeyi amaçlayan çok sayıda çalışma görülür. Isı transferini iyileştirmeyi amaçlayan bu çalışmalar genellikle aktif, pasif ve karma yöntemler olarak sınıflandırılabilir.

Isı transferi için kullanılan akışkana ya da ortama dışardan enerji verilmesiyle ısı transferinde iyileşme gerçekleştiren yöntem aktif, dışardan enerji vermeden ısı transferinde iyileşme gerçekleştiren yöntem ise pasif yöntemdir. Isı transferi arttırmak amacıyla mekanik yardımcı eleman kullanımı, yüzey ve akışkanın titreştirilmesi, mekanik parçalarla akışın karıştırılması ve akış ortamında elektrostatik etki oluşturulması gibi yöntemler aktif yöntem örneği olarak gösterilebilir. Isı transfer yüzey alanının işlenmesiyle; yüzeyin kaplanması, pürüzlendirilmesi, akış alanı içine akış elemanları yerleştirilmesi de pasif yöntem örnekleri olarak gösterilebilir.

Dışardan enerji verilmesine ihtiyaç duyulmaması açısından pasif yöntemler avantajlı gibi görünmesine rağmen ısı transferinde önemli artış sağlamalarının yanısıra akış alanında önemli ölçüde basınç düşümüne sebep olabilirler. Bu sebeple pasif yöntemlerde akış alanında oluşan basınç düşümünü yenmek için sistemde kullanılan pompa vb. elemanların çektiği enerji miktarı arttırılmaktadır (Çomaklı et al. 2007). Aktif ve pasif yöntemler ile ısı transferi arttırma yolları Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. 1. Isı transferini arttırmak için aktif ve pasif yöntemler

<b>Aktif Yöntemler</b>	<b>Pasif Yöntemler</b>
Mekanik Yardımcılar	İşlenmiş Yüzeyle
Yüzey Titreşimi	Pürüzlü Yüzeyle
Akışkan Titreşimi	Genişletilmiş Yüzeyle
Elektrostatik Alanlar	Yerleşik İyileştirme
Emme veya Enjeksiyon	Dönmeli Akış Aygıtları
Jet Çarpması	Yüzey Gerilim Aygıtları
Manyetik Alanlar	Katkı Maddeleri

Etilen glikol (antifiriz), su, motor yağı gibi akışkanlar ısı değiştiricilerinde yararlanılan yaygın ısı transferi akışkanını örnekleridir. Isı transferini artırma yöntemleri kullanılmasına rağmen, bu yaygın akışkanların ısı transferi performanslarının düşük olması iyileşme verimini olumsuz etkilemektedir ve ayrıca ısı değiştiricinin az yer kaplayan küçük boyutlarda olmasına engel olmuştur. Buradan hareketle bu akışkanların içerisine ısıl iletkenliği temel akışkanınkinden büyük katı parçacıklar katılarak ısı transferi artışı hedeflenmiştir.

Daha önceki yıllarda üretim teknolojisinin sınırlı olmasından dolayı mikrometre ve milimetre boyutlarına sahip metal oksitli süspansiyonlarla ısı transferi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Fakat teorik olarak sağlam temellere sahip bu yaklaşım pratik olarak sonuçsuz kalmıştır. Isı transferi iyileştirmeyi amaçlayan çalışmalarda mikrometre ve milimetre boyutlarındaki parçacıkların kullanımı; mini/mikro kanallardan geçerken tıkanma, özellikle büyük boyutlara sahip parçacıklarda hızlı çökme, basınç düşüşünde artış, aşındırıcı etkiye sahip parçacıkların boru ve bileşenlerine zarar vermesi gibi problemleri ortaya çıkarmıştır.

Modern teknolojinin nano boyutlarda metal veya ametal parçacıkların üretilmesini mümkün kılması biraz önce değinilen olumsuz durumları önemsiz kılmıştır. Endüstriyel gelişmelerle birlikte ısı değıştircilerin gelişimi, ısı transferi akışkanlarının ısıl iletkenliğinin önemini ve yeni ısı transferi akışkanlarının (nanoakışkanlar) geliştirilebilmesi fikrini ortaya koymuştur.

### 1.2. Nanoakışkanlar

Nanoakışkanlar; temel akışkan ile kritik boyutları nanometre olan nanopartiküllerin karışımı ile elde edilen akışkan süspansiyonu olarak tanımlanabilir. Yapılan araştırmalar sonucunda nanoakışkanların alışlagelmiş akışkanlara göre çok daha iyi ısı transferi sağladığı gözlemlenmiştir. Bu artış partikül şekli, partikül boyutu, nanopartiküllerin hacimsel oranı, nanopartikül ve temel akışkanın ısıl özellikleri gibi çok sayıda faktöre bağlıdır. Nanoakışkanlar için başlıca özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Hadadian et al. 2013).

1. Nanoakışkanlarda gözlemlenen en önemli özellik, ısıl iletkenliğin tahmin edilenden hatta herhangi bir teorik tahminden anormal biçimde yüksek olmasıdır. Saf akışkanlarla karşılaştırıldığında nanoakışkanların ısıl iletkenliği sıcaklık artışına güçlü biçimde bağlıdır. Nanopartiküllerin geniş yüzey alanına sahip olması daha fazla ısı transferi gerçekleşmesine izin verir.

2. Temel akışkana göre nanoakışkanlar çok daha yüksek viskositeye sahiptir.

3. Kararlılık: Nanoakışkanlar küçük olduklarından hafiftirler ve bu sebeple çökme oranları daha düşüktür. Nanoakışkanları kararlı hale getiren maddeler kullanılarak aylar boyunca kararlılık sağlandığı gözlemlenmiştir.

4. Tıkanma yaşanmadan mini/mikro kanal soğutma; Nanoakışkanlar yalnızca ısı transferi için değil aynı zamanda yüksek ısı yüklerine ihtiyaç duyulan mini/mikro kanal uygulamaları için de idealdir. Mini/mikro kanal ve nanoakışkanların kombinasyonu daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip akışkan ve geniş ısı transferi alanı meydana getirir. Aynı durum mini/mikro kanalları tıkanmasından dolayı mikro partikül kullanarak gerçekleştirilemez.

5. Nanopartiküller çok küçüktür ve katı cidara uyguladıkları hareket gücü çok az olduğu için ısı değıştircileri, pompalar ve boru hatlarında daha az aşınma sağlar.

6. Nanoakışkanlar sürtünmeyi etkili bir şekilde düşürebildiklerinden sürtünme katsayısında azalma sağlar.

7. Nanoakışkan kullanılan ısı değiştirici sistemler daha küçük ve hafif olacak şekilde imal edildikleri için maliyet ve enerji tasarrufu sağlar.

8. Nanoakışkanlar daha etkin akış ve yağlama, soğutma ve ısıtmanın gerçekleştirildiği elektronik, nükleer, biyomedikal ölçüm, taşımacılık ve endüstriyel soğutma gibi kritik uygulama alanlarında karşımıza çıkar.

### 1.2.1.Nanoakışkanların çeşitleri

Nanopartikül çeşitine göre nanoakışkanlar seramik, saf metal, alaşım ve karbon esaslı olmak üzere dört grupta ele alınır. Nanopartiküllerin farklı temel akışkanlarla birleştirilmesiyle çeşitli nanoakışkanlar elde edilir (Hadadian et al. 2013).

1.Seramik nanoakışkanlar: Nanoakışkan hazırlamak için faydalanılan ilk partikül türünün seramik olmasıyla beraber üretimi zor değildir ve çözelti içinde kimyasal olarak kararludur.  $Al_2O_3$ , CuO gibi oksitli SiC gibi oksitsiz ve oksitli oksitsizin birleşimi olarak üç farklı grupta sınıflandırılır. Bu grupların arasında en fazla ilgi oksitli seramik nanoakışkanlar üzerinde olmuştur.

2.Saf metal nanoakışkanlar: Oksit seramik nanopartikülleri içeren nanoakışkanlara göre saf metal içeren nanoakışkanlarla yapılan çalışmalar daha az olmasına rağmen sonuçlar umut verici olmuştur. Saf metal nanoakışkanların aynı hacimsel orana sahip oksit seramik nanoakışkanlardan daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir.

3.Alaşım nanoakışkanlar: Farklı metallerle metalleri alaşımlama teknolojik olarak daha kullanışlı yeni materyaller geliştirmenin bir yoludur. Alaşım nanoakışkanlarla ilgili yapılan çalışma sayısı azdır.

4.Karbon esaslı nanoakışkanlar: Metallerle karşılaştırıldığında yüksek ısı iletkenlikleri ve düşük yoğunlukları karbon esaslı maddelerin nanoakışkanlar için kullanımını ilgi çekici hale getirir. Metal veya metal oksitlerle karşılaştırıldığında, karbon nano tüpler daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir.

### 1.2.2. Nanoakışkanların hazırlanması

Akışkanların ısı iletkenliğini arttırmak için nanoakışkanların hazırlanması kilit adımdır. Nanoakışkanların hazırlanması esnasında faydalanılan iki yöntem mevcuttur.

1. Tek adım yöntemi: Nanopartiküllerin hazırlanmasını nanopartiküllerin sentezi ile birleştiren bir süreçtir. Nanopartiküller doğrudan fiziksel buhar biriktirme tekniği veya sıvı kimyasal yöntemi kullanılarak hazırlanır. Bu yöntemde, nanopartikülün kurutulması, depolanması, taşınması ve dağılması önlenir böylece nanopartikülün topaklanması engellenir ve akışkanların kararlılığı artırılır. Bu yöntem için dezavantaj ise yalnızca düşük basınçta sahip akışkanlar için uygun oluşudur.

2. İki adım yöntemi: Önceden hazırlanmış olan nanopartiküllerin temel akışkan içerisine uygun yöntemlerle katıldığı bir süreçtir. Öncelikle nanopartiküller kuru toz halinde imal edilir. Daha sonra nanopartiküller temel akışkan içerisine ilave edilir. Bu noktada anlaşıldığı üzere nanopartikül üretimi ile nanoakışkan hazırlanmasının farklı zamanlarda gerçekleşir. Bundan dolayı nanopartiküllerin topaklanması hem nanopartiküllerin üretimi hem de nanoakışkan hazırlanması esnasında gerçekleşebilir. Topaklanma sadece kanallarda tıkanma ve birikmeye neden olmaz, aynı zamanda ısı iletkenliği de azaltır. Bu sebeple bu yöntem uygulanırken partikül birikimini en aza indirmek ve süspansiyonun kararlılığını sağlamak önemli sorunlardır. Topaklanmayı engellemek ve nanoakışkanın kararlılığını arttırmak için süspansiyonun pH değerini değiştirmek, ultrasonik titreşimler kullanmak ve karışıma yüzey aktif maddeler ilave etme yöntemleri kullanılır. İki adım yöntemi günümüzde nanopartiküllerin hazır halde alınabilir oluşundan dolayı tek adım yöntemine kıyasla daha çok tercih edilmektedir (Akyürek 2014).

### 1.2.3. Nanoakışkanların kararlılığı

Nanoakışkan üretiminde, çok güçlü Van der Waals etkileşimleri ve akışkanların içindeki partiküllerin hızlı çökmesi nedeniyle çözeltide partiküllerin topaklanması gibi çeşitli zorluklarla karşı karşıya kalınır. Nanoakışkan hazırlanırken akışkanın kimyasında değişme olmaması ve partikül topaklanmasının azaltılmasına dikkat edilmeli ve çözelti dayanıklılığı ve kararlılığı hassasiyetle sağlanmalıdır.

Nanoakışkanın kararlılığı, süspansiyon haline getirilmiş temel akışkan ve partikülün morfolojisi, kimyasal yapısı gibi özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir (Hwang et al. 2007). Araştırmacılar kararlılık problemini aşmak için süspansiyonun pH değerini değiştirilmesini ve yüzey aktif maddelerin kullanılmasını önermişlerdir.

### 1.3. Minikanal Tanımı

Bir kanal, önce akışkanı kanal duvarlarıyla yakın temasa geçirmek ve sonrasında taze akışkanı duvarlara getirmek ve taşıma işlemi gerçekleştikçe akışkanı duvarlardan uzaklaştırmak olmak üzere iki hedefi başarmak için olanak tanır. Genellikle, transfer işlemleri kanal duvarları üzerinde meydana gelirken, kütle akışı kanalın kesit alanı boyunca gerçekleşir. Bu yüzden kanal kesiti sıvıyı kanal duvarlarına ve kanal duvarlarından uzaklaştırmak için bir yol görevi görür.

Bazı araştırmacılar mini ve mikro kanallardaki akışkan akışıyla ilgili mevcut araştırmalarda klasik teorilerin mini ve mikro kanallar için sonuç verdiğine karar verirken, diğer bazı araştırmacılar ise klasik teorilerin iyi sonuçlar vermediğini göstermişlerdir. Bu uyumsuzlukların netleştirilmesi önem arz etmektedir. Kanal boyutu küçüldükçe, doğrulama için sıvı, enerji ve kütle transferine ilişkin bazı genelleşmiş teorilerin tekrar gözden geçirilmesi gerekir. Mini ve mikro ölçekte genelleşmiş teorilerinden ayrılmakla sorumlu iki temel unsur vardır. Örneğin, mini ve mikro kanallardaki akışkan akış modellemesindeki farklılıklar aşağıda belirtilen ifadelerin sonucu olarak ortaya çıkabilir;

(i) akışkan akışı için süreklilik varsayımından sapma gibi temel süreçteki bir değişim veya elektrokinetik kuvvetler gibi bazı ilave kuvvetlerin artan bir etkisi

(ii) borulardaki akışkan akışı için giriş ve çıkış kayıp katsayıları gibi daha büyük ölçeklerde yapılan deneylerden elde edilen ampirik katsayıların uygulanabilirliğine ilişkin belirsizlik

(iii) geometrik boyutlar ve çalışma parametrelerini içeren mini ve mikro ölçekteki ölçümlerde belirsizlik

## 1. GİRİŞ

Başlangıçta önemli olan konu mini ve mikro kanallardaki akışkan akışını incelerken mikro ölçekli kanallar ile makro ölçekli kanallar arasındaki ayrımın açıklığa kavuşturulması olmalıdır. Bununla birlikte, henüz literatürde açık bir şekilde evrensel bir anlaşma tespit edilmemiştir. Bunun yerine, bu konu hakkında çeşitli tanımlamalar vardır.

Çizelge 1.2’de bazı araştırmacılar tarafından küçük tonajlı ünitelerde soğutma endüstrisi, otomotiv, havacılık, hava ayırımı ve kriyojenik endüstrilerde kullanılan kompakt evaporatörler, mikroelektronik ve MEMS alanlarındaki soğutma elemanları gibi mühendislik uygulamaları ve uygulama alanlarına dayalı bir örnek göstermek için farklı sınıflandırmalara atfedilen aşağıdaki hidrolik çap aralıklarını tanımlanmıştır.

Çizelge 1. 2. Kanalların boyutlarına göre sınıflandırılması

<b>Araştırmacılar</b>	<b>Makrokanal (<math>D_h</math>)</b>	<b>Minikanal (<math>D_h</math>)</b>	<b>Mikrokanal (<math>D_h</math>)</b>
(Kandlikar 2002)	$D_h > 3 \text{ mm}$	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \text{ } \mu\text{m}$	$200 \text{ } \mu\text{m} \geq D_h > 10 \text{ } \mu\text{m}$
(Agopyan 2007)	$D_h > 6 \text{ mm}$	$100 \text{ } \mu\text{m} - 1 \text{ mm}$	$1 - 100 \text{ } \mu\text{m}$
(Çetin 2010)	$1 \text{ mm} < D_h < 6 \text{ mm}$	$100 \text{ } \mu\text{m} < D_h < 1 \text{ mm}$	$1 \text{ } \mu\text{m} < D_h < 100 \text{ } \mu\text{m}$



### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

#### 2.1. Karma Taşınım

MEMS uygulamalarında entegre sistemin çalışması sırasında artan sistem sıcaklıkları uygulamada önemli birçok soruna sebep olmaktadır. Isınan elektronik ekipmanların etkin soğutulması için karma taşınım mekanizmalarının kullanımına yaygın olarak rastlanmaktadır. Karma taşınım ısı transferi mekanizmasında ulaşılan ısı performans MEMS uygulamalarındaki ısınma sorununu çözmek açısından oldukça önemlidir. Literatürde yapılan çalışmalar bilim dünyasının bu konu üzerine yoğunlaştığını göstermektedir. Birçok araştırmacı tarafından geometrik parametrelerin yanı sıra Grashof ve Reynolds sayısı gibi doğal ve zorlanmış taşınım ile ısı transferi parametrelerinin ısı performans üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Brown and Gauvin (1965) tarafından silindirik bir hava kanalı ile yapılan çalışma karma taşınım mekanizması ile ısı transferi iyileştirmesi üzerine yapılan ilk çalışmalardan birisidir. Silindirik hava kanalında düşük hızlarda gerçekleştirilen çalışma sabit yüzey sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yer çekimi kuvvetinin karma taşınım mekanizmasındaki etkinliğini incelemek için silindirik hava kanalı yukarı doğru yönlendirilmiştir. Laminer destekleyici akışı yerel Nusselt sayısı ile ilişkilendirmişlerdir. Türbülanslı akış şartlarında tam gelişmiş akış bölgesinde yerel Nu sayısının aksenel konumdan bağımsız olarak Grashof sayısı ile değiştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Brown and Gauvin (1965) tarafından yapılan bir başka çalışmada karma taşınımında karşıt akış etkileri incelenmiştir. Hava akımı aşağı yönlü olacak şekilde 425-4650 kg/sa.m<sup>2</sup> aralığındaki debi değerlerinde tutulmuştur. Deneysel çalışma sonuçlarına göre destekleyici akıştan farklı olarak karşıt akışta, Gr sayısının 106 mertebeleri için yerel Nu sayısının grafik eğiminde ciddi bir artış gözlemlenmiştir.

Depew and August (1971) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yatay bir boruda laminer akış şartlarında karma taşınım etkileri araştırılmıştır. Topladıkları verilerden faydalanarak maksimum hata oranının %40 olduğu iki farklı korelasyon türetmişlerdir.

Tomcej and Nandakvmar (1986) tarafından Newtonian olmayan bir akışkanın karma taşınımıyla ısı transferi performansı incelenmiştir. Gerçekleştirilen sayısal çalışmada, kayma kuvvetlerinin etkili olduğu ikincil akış sebebiyle sıvılarda kayma inceltme etkisi gözlemlenmiştir. Ayrıca Grashof sayısının artmasıyla birlikte Nusselt sayısının sürekli artma eğiliminde olduğu belirtilmiştir.

Karma taşınım için önemli parametrelerden birisi de Prandtl sayısıdır. Chou and Hwang (1986) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada Prandtl sayısının dikdörtgen kesitli bir kanaldaki doğal ve zorlanmış taşınım etkileri incelenmiştir. Sabit ısı akısı sınır şartlarında gerçekleştirilen çalışmada Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ve Prandtl sayısına göre değişim eğrileri oluşturulmuştur.

Chou (1990) tarafından aksel olarak sabit ısı girişi ve homojen duvar sıcaklığı şartlarındaki bir kanal için laminer karma taşınımı sayısal olarak inceleyen başka bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Farklı en boy oranlarındaki dikdörtgen kesitli kanallarda gerçekleştirilen çalışmada gelişmiş hız ve sıcaklık bölgeleri belirlemek için yeni çözüm yöntemi bulunması amaçlanmıştır. Sınır şartı olarak sabit ısı akısı uygulanan önceki çalışmalarla karşılaştırıldığı zaman sabit yüzey sıcaklığı sınır şartında gerçekleştirilen çalışmada Nusselt sayısının dikkate değer biçimde arttığı gözlemlenmiştir. Sınır şartlarındaki değişimin sürtünme katsayısı üzerinde önemsenecek düzeyde etkisi olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Wu and Perng (1999) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada yatay olarak yönlendirilmiş ve blok halinde ısıtılan bir kanalda karma taşınımıyla ısı transferi iyileştirmesi incelenmiştir. Çalışmada, akış bölgesinde girdap oluşturmak için kanal içerisine eğik plaka yerleştirilmiştir. Plaka eğiminin ısı transferindeki etkisini incelemek için eğik plaka açısı  $30^{\circ}$ - $90^{\circ}$  arasında değiştirilmiştir. Kanal içerisinde girdap oluşumuna yönelik farklı açılarda plakalar yerleştirilmesinin karma taşınım ısı performansını önemli ölçüde arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Islam et al. (2001) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada dairesel halka kesitli bir boru içerisinde laminer akış için karma taşınımıyla ısı transferi incelenmiştir. Çalışmada iş akışkanı olarak hava ve saf su kullanılmıştır. Isı transferi parametreleri

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

Reynolds, Rayleigh ve Prandtl sayısı aralıkları sırasıyla  $200 \leq Re \leq 1000$ ,  $10^4 \leq Ra \leq 10^8$  ve  $0,7 \leq Pr \leq 5,42$  olacak şekilde seçilmiştir. Prandtl sayısındaki artışla birlikte Nusselt sayısının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Teamah et al. (2005) tarafından sonsuz izotermal yatay silindirler arasındaki laminer karma taşınım ile ısı transferi incelenmiştir. Isı transferi parametreleri Reynolds, Rayleigh ve Prandtl sayısı aralıkları sırasıyla  $Re = 0-2000$ ,  $Ra = 10^3-10^6$  ve  $Pr = 0,01-10$  olacak şekilde seçilmiştir. Ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısındaki artışla değişmediği ileri sürülmüştür.

Chong et al. (2007) tarafından ortasında ısıtılmış plaka bulunan dikdörtgen kesitli kanalın farklı açılarda konumlandırılmasıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre tam gelişmiş bölgedeki ortalama Nusselt sayısının giriş bölgesindeki ortalama Nusselt sayısından neredeyse iki kat daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama Nusselt sayısı ve basınç düşüşlerinin Reynolds sayısı değeri 1500'ün altına indiği zaman eğim açısı  $-60^\circ$ 'den  $+60^\circ$ 'ye değiştirilirken azaldığı görülmüştür. Reynolds sayısı değeri 1800'ü geçtiği zaman ise ortalama Nusselt sayısı ve basınç düşüşünün eğim açılarından bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır.

Mirmasoumi and Behzadmehr (2008) tarafından  $Su-Al_2O_3$  nanoakışkanı kullanılarak yatay bir boruda laminer karma taşınım etkilerinin incelendiği sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanın termal ve hidrodinamik davranışlarını gözlemlemek için iki fazlı karışım modeli kullanılmıştır. Geniş aralıklarda belirlenen Reynolds ve Grashof sayılarında gerçekleştirilen çalışmada hacimsel partikül oranındaki artışla birlikte ikinci akış gücünün arttığı görülmüştür.

Zanchini (2008) tarafından sayısal olarak üniform duvar sıcaklığındaki düşey dairesel kesitli bir kanalda sıcaklığa bağlı bir viskoziteye sahip akışkanla kararlı ve laminer karma taşınım çalışması gerçekleştirilmiştir. Akışın tamamiyle aksel ve akışkan yoğunluğunun sıcaklığın lineer bir fonksiyonu olduğu varsayılmıştır. Boyutsuz basınç düşüşü, boyutsuz hız dağılımı ve Fanning sürtünme faktörlerine ait analitik ifadeler türetilmiştir.

Akbari et al. (2008) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada iş akışkanı olarak su ve  $Al_2O_3$  içeren nanoakışkanlardan faydalanılarak yatay ve eğimli borularda laminar karma taşınım incelenmiştir. Isı transfer katsayısının %0,4 hacimsel partikül oranı için saf suya göre %15 civarında arttığı gözlemlenmiştir. Basınç düşümü ve sürtünme katsayısının boru eğimi ile birlikte sürekli artış gösterdiği ve ısı transferi katsayısının eğim açısı  $45^\circ$  olduğu zaman maksimum değerine ulaştığı görülmüştür.

Mohammed (2009) tarafından farklı giriş geometrileri kullanılarak sabit ısı akısı şartlarında dairesel bir kanal içerisinde karma taşınım ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Kullanılan deney düzeneği farklı giriş geometrilerine sahip 30 mm iç çap ve 900 mm ısıtılan uzunluğa ( $L/D = 30$ ) sahip ısıtmalı bir bölüm olarak dairesel kesitli alüminyum bir borudan meydana getirilmiştir. Girişlerde ısıtılan boru ile aynı iç çapa sahip ancak  $L = 600$  mm ( $L/D = 20$ ),  $L = 1200$  mm ( $L/D = 40$ ),  $L = 1800$  mm ( $L/D = 60$ ),  $L = 2400$  mm ( $L/D = 80$ ) değerlerinde değişken uzunluklara sahip keskin kenarlı ve konik ağızlı başlıklardan faydalanılmıştır.  $L/D = 80$  olduğu giriş başlığı için yapılan değerlendirmeler sonucunda yüzey sıcaklık değerlerinin, düşük kütleli debi ve yüksek akış direncinden dolayı diğer giriş geometrilerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca konik ağızlı giriş geometrisi kullanılan test bölgesinde Nu sayısı değerlerinin diğer giriş geometrilerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Dogan and Sivrioglu (2010) tarafından yapılan deneysel çalışmada dikdörtgenel kanal üzerine yerleştirilmiş farklı yükseklik ve genişliklerdeki kanatçıklar ile karma taşınım ısı transferi incelenmiştir. İş akışkanı olarak hava kullanılan çalışma sabit ısı akısı sınır şartlarında gerçekleştirilmiştir. Sabit Reynolds sayısı ve değişken Rayleigh sayısı için elde edilen deney sonuçlarına göre karma taşınım ile maksimum ısı transferinin görüldüğü optimum kanat boşluğunun 8-9 mm olduğu görülmüştür.

Cherif et al. (2011) tarafından dikey dikdörtgen kanalda film buharlaşmasının karma taşınım ile ısı ve kütle transferi üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Buharlaşma olgusu uygulanan ısı akısı yoğunluğu ve besleme suyu sıcaklığı artırılarak veya besleme suyu kütleli debisi azaltılarak gerçekleştirilmiştir.

Izadi et al. (2013) tarafından dairesel halka kesitli bir boru boyunca Su- $Al_2O_3$  nanoakışkanı kullanarak karma taşınım ile ısı transferi incelenmiştir. Gerçekleştirilen sayısal çalışmada hacimsel partikül oranı ve Richardson sayısının ısı ve hidrodinamik parametreler üzerindeki etkisi geniş kapsamlı olarak ele alınmıştır.

### 2.2. Nanoakışkanlar ve Termofiziksel Özellikleri

Nanoakışkanların termofiziksel ve ısı transferi özelliklerini kapsayan bir literatür özeti olan bu bölümde nanoakışkanların ısı iletkenlik, viskozite ve termal performansını arttıran parametreler ve bu artışa sebep olan mekanizmalara değinilecektir. Ayrıca termofiziksel özelliklerin belirlenmesinde önerilen modellerden bahsedilecektir. Son yıllarda ilgi odağı olan bu konunun tümüyle özetlenmesinin mümkün olmadığını söylemek gerekir.

#### 2.2.1. Isıl iletkenlik

Akışkanın ısı performansı belirlenirken en önemli parametrelerden biri ısı iletkenliktir. Katı fazdaki metallerin ısı iletkenlik değeri akışkanların ısı iletkenliğinden yüksek olması sebebiyle, ilave (süspanse) edildiği akışkanın ısı iletkenlik ve ısı performansını artırması beklenir. Buna sebep olarak nanopartiküllerin katılması ile nanoakışkanın yüzey alanı, akışkanın ısı kapasitesi, akışkanın ısı iletkenliği, nanopartikül ve temel akışkan arasındaki etkileşim ve çarpışmanın artması gösterilebilir (Xuan and Li 2000).

Nanoakışkanların ısı iletkenliklerini ölçmek için kullanılan yöntemler 5 başlık altında toplanabilir.

1. Geçici sıcak tel metodu
2. Kararlı hal paralel plaka tekniği
3. Sıcak salınım tekniği
4. Optik yöntemler
5. Geçici düzlem kaynağı metodu

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yukardaki yöntemler içinde geçici sıcak tel metodu en sık kullanılandır. Bu metotta akışkan akım taşıyan metal ile elektriksel olarak ısıtılır ve telin elektrik sinyallerine karşı zaman ve sıcaklık tepkileri ölçülür. Daha sonra zamanın doğal logaritmasına karşılık grafiği çizilir ve grafiğin eğiminden ısıl iletkenlik değerine ulaşılır. Bu tez çalışmasında da geçici sıcak tel yöntemi ile ısıl iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Nanoakışkanlar için ısıl iletkenlik değeri nanopartikül boyutuna, nanopartikül şekline, temel akışkanın ısıl iletkenliğine, nanopartikülün ısıl iletkenliğine, hacimsel orana, pH değerine, en-boy oranına, sıcaklığa ve kümelenme etkisine bağlı değişim gerçekleştirmektedir. Bir nanoakışkanın ısıl iletkenliğindeki en önemli parametreler nanoakışkanı oluşturan temel akışkan ve nanopartiküllerin ısıl iletkenlikleri olarak göze çarpar.

Taha-Tijerina et al. (2016) tarafından daha önceki çalışmalar referans alınarak oluşturulan Çizelge 2.1’de nanoakışkan sentezinde sıklıkla kullanılan akışkan ve partiküllerin ısıl iletkenlikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Klasik ısı transferi akışkanları ve bazı katı malzemeler için ısıl iletkenlikler

Malzeme		Isıl İletkenlik [W/mK]	Kaynak
Klasik Akışkanlar	Saf su	~0,598-0,609	(Krato and Heath 1985), (Lee and Mudawar 2007),(Patel et al. 2003)
	Etilen glikol	~0,251	(Eastman et al. 1996),(Kim et al. 2007), (Liu et al. 2005)
	Motor yağı	~0,145	(Eastman et al. 1996),(Liu et al. 2005)
	Minarel yağı	~0,115	(Taha-Tijerina et al. 2012), (Godfrey and Herguth 1995)
	Gaz yağı	~0,139	(Iijima 1991)
	Toluen	~0,133	(Iijima 1991)
	R141b Soğutucu	~0,089	(Mahbubul et al. 2013)
Metalik Katılar	Alüminyum	237	(Perry and Green 2008)
	Bakır	398	(Perry and Green 2008)
	Altın	315	(Perry and Green 2008)
	Demir	80	(Perry and Green 2008)
	Nikel	91	(Perry and Green 2008)
	Gümüş	424	(Perry and Green 2008)

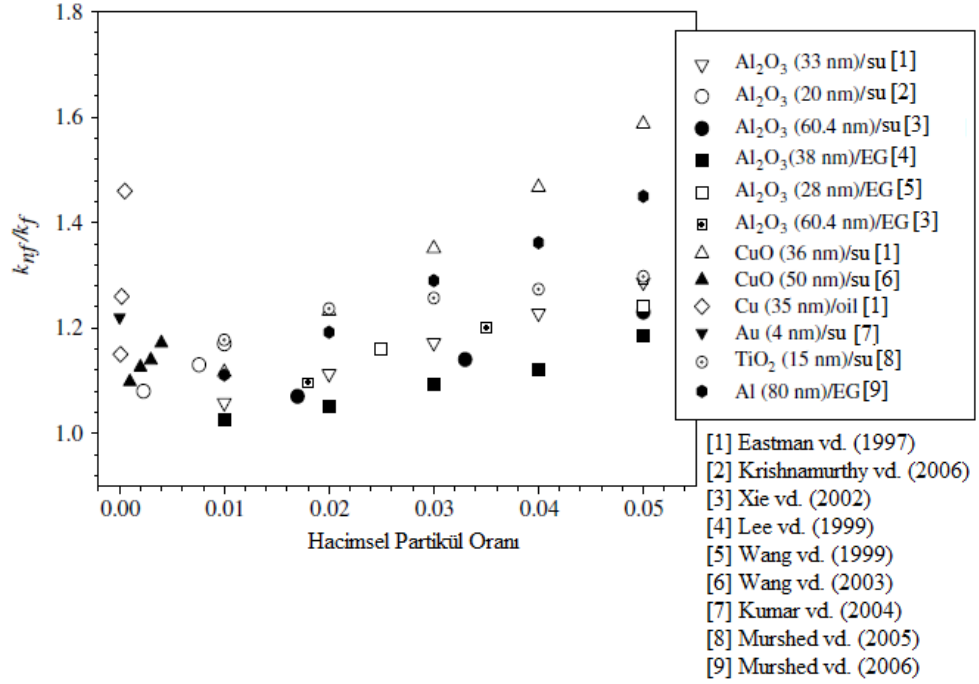
## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Malzeme		Isıl İletkenlik [W/mK]	Kaynak
Karbon Yapılar	Tek cidarlı nanotüpler (SWCNTs)	3000-6000	(Marquis and Chibante 2005), (Berber et al. 2000), (Che et al. 2000), (Osman and Srivastava 2001)
	Çok cidarlı nanotüpler (MWCNTs)	~3000	(Kim et al. 2001), (Hong et al. 2007)
	Karbon (elmas)	900-2320	(Speight 2005), (Kang et al. 2006)
	Karbon (grafit)	119-165	(Speight 2005)
	Grafen	~3000	(Balandin 2011), (Ghosh et al. 2008)
	Grafit	130-2000	(Callister et al. 2014)
Metalik Olmayan Katılar	Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	31-41	(Callister et al. 2014), (Dodd et al. 1994), (James et al. 2001)
	Alüminyum Nitrit (AlN)	319-550	(Slack et al. 1987)
	Bor Nitrit (h-BN)	~300	(Xu and Chung 2000), (Wang et al. 2009b)
	Bor Nitrür Nanotüpler (BNNTs)	~600-960	(Duclaux et al. 1992), (Lindsay and Broido 2012), (Chang et al. 2005)
	Bor Nitrür Nanoşeritler (BNNRs)	1700-2000	(Peimyoo et al. 2015)
	Bakır Oksit (CuO)	76.5	(Hwang et al. 2007)
	Molibden Disülfür (MoS <sub>2</sub> )	34,5±4	(Yan et al. 2014)
	Silisyum Karbür (SiC)	148	(Perry and Green 2008)
	Silisyum Oksit (SiO <sub>2</sub> )	1,4	(Wang et al. 2007b), (Hwang et al. 2006)
	Titanyum Oksit (TiO <sub>2</sub> )	8,4	(Kim et al. 2007)
Tungsten Disülfür (WS <sub>2</sub> )	32-53	(Peimyoo et al. 2015)	
Çinko Oksit (ZnO)	29	(Kim et al. 2007)	

Literatürdeki çalışmalarda nanoakışkanların ısı iletkenlikleri partiküllerin süspansiyon edildiği temel akışkanlar ile iki farklı şekilde karşılaştırılmıştır. Bunlardan ilki nanopartikül ilavesi ile temel akışkanın ısı iletkenliğindeki artışın yüzde kesri ile gösterilmesidir. İkinci olarak nanoakışkanın ısı iletkenlik değerinin temel akışkanın ısı iletkenliğine oranı (efektif ısı iletkenlik) ile gösterilmesidir. Efektif ısı iletkenliğin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$k_{eff} = k_{nf} / k_b \quad (2.1)$$

Şekil 2.1’de Murshed et al. (2008) tarafından hazırlanmış hacimsel partikül oranı ile efektif ısı iletkenliklerin değişimi grafiği verilmektedir. Grafikte verilen bütün efektif ısı iletkenlik değerlerinin 1’den büyük olduğu görülür. Bu durum nanopartiküllerin ısı iletkenlik değerinin her zaman temel akışkanlarınkinden büyük olmasından kaynaklanır.



Şekil 2. 1. Efektif ısı iletkenliklerin hacimsel partikül oranı ile değışimi

Giriş kısmında, partikül boyutlarının nanoakışkan ısı iletkenliği üzerinde etkili bir parametre olduğundan bahsedilmiştir. Bu hususun ortaya çıkarılmasında deneysel öncü çalışmalardan biri Chopkar et al. (2006) tarafından yapılmıştır. Deneysel çalışmaya konu olan nanopartiküllerin boyutları 10-80 nm aralığında değıştirilmiştir. Sonuç olarak ise nanopartikül boyutu ile nanoakışkan ısı iletkenliği arasında linner olmayan bir ilişki olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca partikül boyutu ile ısı iletkenlik arasındaki ilişkinin küçük partikül boyutlarında daha belirgin olduğu sonucuna varılmıştır.

Daha önce bahsedildiği üzere sıcaklık, hacimsel partikül oranı ve partikül boyutu nanoakışkanların ısı iletkenliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Teng et al. (2010) tarafından yapılan araştırmada Su-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoakışkanının ısı iletkenliği üzerinde sıcaklık, hacimsel partikül oranı ve partikül boyutunun etkileri irdelenmiştir. Yaptıkları çalışmada 20 nm, 50 nm, ve 100 nm partikül çapları kullanarak %0,5, %1, %1,5 ve %2 olmak üzere farklı hacimsel partikül oranlarında nanoakışkanlar hazırlayarak her bir nanoakışkan için 10°C, 30°C ve 50°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta ısı iletkenliğinin değışimini irdelenmişlerdir. Sonuç olarak ısı iletkenliğinin iyileştirilmesinde sıcaklık artışının küçük partikül boyutuna sahip nanopartiküller ile hazırlanan nanoakışkanlarda daha belirgin olduğu çıkarımına ulaşmışlardır.



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Li et al. (2009) tarafından nanoakışkanların sentez yöntemi, hacimsel partikül oranı ve yüzde ısıl iletkenlik artışının verildiği araştırmalar yardımıyla Çizelge 2.2 hazırlanmıştır.

Çizelge 2. 2. Nanoakışkanların ısıl iletkenlikleri için birkaç örnek

Nanoakışkan	Sentez Yöntemi	Hacimsel Partikül Oranı (%)	Partikül Boyutu (nm)	Isıl İletkenlik Artışı (%)	Kaynak
Cu/EG	Tek Adım	0,3	10	40	(Eastman et al. 2001)
Cu/H <sub>2</sub> O	Tek Adım	0,1	75-100	23,8	(Liu et al. 2006)
Cu/H <sub>2</sub> O	İki Adım	7,5	100	78	(Xuan and Li 2000)
Fe/EG	Tek Adım	0,55	10	18	(Hong et al. 2005)
Ag/Toluen	İki Adım	0,001	60-80	16,5(60°C)	(Patel et al. 2003)
Au/Toluen	İki Adım	0,00026	10-20	21(60°C)	(Patel et al. 2003)
Au/Etanol	İki Adım	0,6	4	1,3±0,8	(Putnam et al. 2006)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O	İki Adım	4	10	38	(Zhu et al. 2006)
TiO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	Tek Adım	5	15	30-33	(Murshed et al. 2005)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O	İki Adım	5	20	20	(Xie et al. 2002)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG	İki Adım	0,05	60	29	(Xie et al. 2002)
CuO/H <sub>2</sub> O	İki Adım	5	33	11,5	(Zhang et al. 2006)
SiC/H <sub>2</sub> O	İki Adım	4,2	25	15,9	(Xie et al. 2001)
CNT/motor yağı	İki Adım	2,0	20-50	30	(Liu et al. 2005)
CNT/poli yağı	İki Adım	1,0	25x50	160	(Choi et al. 2001)
CNT/EG	İki Adım	1,0	15x30 µm	19,5	(Xie et al. 2003)
CNT/H <sub>2</sub> O	İki Adım	1,0	15x30 µm	7,0	(Xie et al. 2003)
CNT/Deken	İki Adım	1,0	15x30 µm	12,7	(Xie et al. 2003)
H <sub>2</sub> O /FC-72	İki Adım	12	9,8 nm	52	(Yang and Han 2006)

Kim et al. (2007) nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin partikül boyutundaki azalma ile doğrusal olarak arttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca mevcut matematiksel modellerin bu doğrusal artış davranışını açıklamadığı vurgulanmıştır. Chen et al. (2008a) ve Beck et al. (2009) ise partikül boyutundaki artış ile ısı iletkenliğinin arttığını tespit etmişlerdir.

Patel et al. (2010) tarafından yine nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerinde partikül boyutu ve sıcaklık etkisini irdeleyen deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül ilavesiyle ısı iletkenliğinin çok fazla arttığı ve bu artışın mevcut Maxwell modeliyle tahmin edilemeyeceği belirtilmiştir. Ayrıca ısı iletkenliğinin sıcaklıkla doğru fakat partikül boyutuyla ters orantılı olduğu söylenmiştir.

Kimyasal özellikler göz önüne alındığında Xie et al. (2002) ve Hwang et al. (2006) tarafından farklı pH değerleri için nanoakışkanların ısı iletkenlik değeri incelenmiştir.

Hwang et al. (2006) CuO nanopartikülünden hazırlanan nanoakışkanın ısı iletkenlik değerinin pH değerine önemli ölçüde bağlı olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Temel akışkanın ve ilave edilen nanopartiküllerin ısı iletkenliği, hacimsel partikül oranı, nanopartikülün şekli ve boyutu, sıcaklık ve katkı maddeleri gibi nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen parametreler bir çok araştırmacı tarafından araştırılmış olmasına rağmen birbiriyle bağdaşan sonuç sayısı hayli azdır ve çok sayıda çelişkili sonuç göze çarpmaktadır. Bu yönüyle nanoakışkanların ısı iletkenlik değerinin bulunması ve iyileştirilmesi ilgi çeken bir konu olmayı sürdürmektedir.

Angayarkanni and Philip (2015) tarafından boyut, hacimsel partikül oranı, efektif ısı iletkenlik göz önünde bulundurularak nanoakışkanların ısı iletkenlikleriyle ilgili özet biçimindeki Çizelge 2.3 hazırlanmıştır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2. 3. Nanoakışkanların ısı iletkenlik özet çizelgesi

Nanopartikül/Boyut [nm]	Temel Akışkan	Hacimsel Partikül Oranı (%)	$k_{nf}/k_f$	Yüzde Artış	Kaynak
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	4,3	1,32	32	(Masuda et al. 1993)
CuO/18,6	EG	4	1,2	20	(Lee et al. 1999)
Polietilen	Silikon Yağı	10	1,13	13	(Shin and Lee 2000)
Bakır/100	TO	1,5	1,12	12	(Xuan and Li 2000)
		8	1,45	45	
	Su	2,5	1,23	23	
		7,5	1,78	78	
Gümüş/200	EG	10000 ppm	1,18	18	(Cho et al. 2005)
CNT/ID: 5-10	EG	1	1,12	12	(Liu et al. 2005)
OD: 20-50	Motor Yağı	2	1,3	30	
Bakır	Su	0,3	1,74	74	(Jana et al. 2007)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	EG	0,3	1,165	16,5	(Yoo et al. 2007)
CNT/çap 10 µm, uzunluk 5-10 µm	Su	0,3	1,02	2	(Chen et al. 2008b)
		1	1,1	10	
SiC/170	Su	1	1,04	4	(Singh et al. 2009)
		4	1,22	22	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /10	PAO	0,4	1,05	5	(Buongiorno et al. 2009)
		2,8	1,15	15	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /8,7	Gaz Yağı	1,71	1,06	0,6	(Shima et al. 2010)
		5,03	1,125	12,5	
CuO/10	EG	0,18	1,07	7	
		0,92	1,12	12	
		1,14	1,14	14	
Nanoelmas	MO	0,5	1,025	2,5	(Branson et al. 2013)
		1,9	1,12	12	
	EG	0,2	1,01	1	
		0,85	1,11	11	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /15	Gaz Yağı	0,25	1,04	4	(Yu et al. 2010)
		1	1,32	32	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Gaz Yağı	2	1,06	6	(Parekh and Lee 2010)
		5	1,18	18	
GNP/kalınlık 2 µm	Su	0,012	1,07	7	(Mehrali et al. 2014a)
		0,05	1,21	21	
ND-Ni/25	Su	0,62	1,03	3	(Sundar et al. 2014)
		3,03	1,2	20	
	EG	0,62	1,001	0,1	
		3,03	1,08	8	

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Nanopartikül/Boyut [nm]	Temel Akışkan	Hacimsel Partikül Oranı (%)	$k_{nf}/k_f$	Yüzde Artış	Kaynak
TiO <sub>2</sub> /13	Su	1	1,08	8	(Angayarkanni and Philip 2014)
		2	1,12	12	
		4	1,15	15	
CuO/<50 nm	Su	0,01	1,27	27	(Ponmani et al. 2014)
ZnO/<50 nm		0,05	1,53	53	
Azot takviyeli grafen	Su	0,02	1,09	9	(Mehrali et al. 2014b)
		0,08	1,12	12	
Grafen	EG	0,01	1,24	24	(Ma et al. 2014)
		0,06	1,33	33	
Fe/98 nm	Su	0,05	1,041	4,1	(Esfe et al. 2015)
		0,2	1,119	11,9	
Cu	Tetradekan	0,003	1	0	(Jiang et al. 2015)
		0,0025	1,01	1	
		0,01	1,05	5	
$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su+EG	0,001	1,02	2	(Serebryakova et al. 2015)
		0,01	1,06	6	
		0,015	1,09	9	
		0,02	1,14	14	
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	EG	0	1	0	(Mariano et al. 2015)
		0,3	1,005	0,5	
		0,6	1,02	2	
		1,1	1,03	3	
SiC	Su	1,4	1,04	4	(Lee et al. 2011)
		0	1	0	
		0,01	1,04	4	
		0,02	1,09	9	
		0,03	1,13	13	
Polianilin nanofiber	Su	0,045	1,17	17	(Wan et al. 2012)
		0,06	1,23	23	
		0,1	1,033	3,3	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Metanol	1	1,039	3,9	(Pang et al. 2012)
		2	1,05	5	
		3	1,07	7	
		0,08	1,09	9	
SiO <sub>2</sub>	Metanol	0,16	1,34	34	(Pang et al. 2012)
		0,24	1,37	37	
		0,01	1,06	6	
		0,37	1,07	7	
SiO <sub>2</sub>	Metanol	0,5	1,11	11	(Pang et al. 2012)
		0,85	1,14	14	
		0,01	1,011	1,11	
		0,37	1,012	1,2	
SiO <sub>2</sub>	Metanol	0,5	1,051	5,1	(Pang et al. 2012)
		0,85	1,103	10,3	

### 2.2.2. Viskozite

Viskozite, akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanır. Akışkanın viskozitesi pompalama gücüyle ilgilidir. Laminer akış söz konusu olduğunda viskozite doğrudan basınç düşümüyle ilgilidir. Taşınım ısı transfer katsayısı viskoziteden etkilenir. Bu sebeple mühendislik sistemleri için viskozite ısıl iletkenlik kadar önemlidir. (Mahbubul et al. 2012). Klasik akışkanlar ile nanoakışkanların viskozite değerlerini karşılaştırabilmek için literatürde nanoakışkan viskozitesinin temel akışkan viskozitesine oranı olarak tanımlanan efektif viskozite değerleri belirlenmiştir. Efektif viskozite matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mu_{eff} = \mu_{nf} / \mu_b \quad (2.2)$$

Klasik akışkanlar göz önüne alındığında nanoakışkanların en büyük dezavantajı olan viskozite artışı araştırmacıları nanoakışkan viskozitesini artıran parametrelerle ilgili çalışmaya yönlendirmiştir. Nanoakışkanların ısıl iletkenlik artışına benzer biçimde viskozite artışı da nanopartikül boyutu, topaklanma eğilimi, partikül şekli, hacimsel partikül oranı ve sıcaklığa bağlıdır. Masuda et al. (1993) tarafından  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve  $TiO_2$  nanopartiküllerinin saf su içerisine süspansiyon edilmesinin viskozite üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Oluşturulan nanoakışkanların viskoziteleri oda sıcaklığı ile  $67^\circ C$  sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Su- $TiO_2$  nanoakışkanı için %4,3'lük hacimsel partikül oranında viskozitede %60 artış gözlemlenmiştir. Wang et al. (1999) tarafından yapılan deneysel çalışmada ise ortalama partikül boyutları 28 nm ve 23 nm olan  $Al_2O_3$  ve  $CuO$  nanopartikülleri ile hazırlanmış nanoakışkanların viskozite değerleri incelenmiştir. Temel akışkan olarak saf su, etilen glikol ve motor yağı seçilmiştir. Çalışmada nanoakışkanların hazırlanmasında farklı yöntemler kullanılarak bu yöntemlerin nanoakışkan viskozitesi üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda mekanik karıştırma yöntemiyle hazırlanan nanoakışkanların, filtrasyon ve yüzey kaplama yöntemleri ile hazırlanan nanoakışkanlara göre yüksek viskozite değerine sahip oldukları rapor edilmiştir. Bu durum mekanik karıştırma yöntemlerinin, nanopartiküllerin temel akışkan içerisine dağıtılmasında yetersiz olmasıyla izah edilmiştir. Bununla birlikte çalışmada %3 hacimsel partikül oranına sahip  $Al_2O_3$  nanoakışkanı için viskozite artışı %30 olarak belirtilmiştir.

Nguyen et al. (2007a) tarafından yapılan deneysel çalışma ile ısı transferi iyileştirmesi ve viskozite artışı üzerinde partikül boyutu ve türünün etkisi incelenmiştir. Çalışmada 36 nm ve 47 nm boyutlarında  $Al_2O_3$  ve 29 nm boyutundaki CuO partikülleri kullanılmıştır. Nanoakışkanlar hacimsel olarak %1-%9,4 oranlarında hazırlanmıştır. Hacimsel olarak %4 altındaki oranlarda nanoakışkan viskozitesi yaklaşık olarak aynı kalırken bu değerden daha büyük hacimsel oranlarda nanopartikül boyutu arttıkça akışkan viskozitesinin de arttığı sonucuna varmışlardır.

He et al. (2007) tarafından partikül boyutu ve hacimsel partikül oranının etkisi su bazlı  $TiO_2$  nanoakışkanları için deneysel olarak irdelenmiştir. Hacimsel nanopartikül oranı üst limiti %1,18 olarak belirlenmiş ve viskozite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda hacimsel partikül oranı ile nanoakışkan viskozitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda hacimsel partikül oranı ile viskozite arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığına dikkat çekilmiştir.

Anoop et al. (2009) tarafından farklı hacimsel partikül oranlarında (%0,5, %1,2, %4, %6) CuO ve  $Al_2O_3$  nanopartikülleri ile etilen glikol bazlı nanoakışkanlar hazırlanarak viskoziteleri inceleyen bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık aralığının 20-50°C aralığında tutulduğu bu çalışmada sıcaklık artışıyla nanoakışkan viskozitesinin azaldığı gözlemlenmiştir.

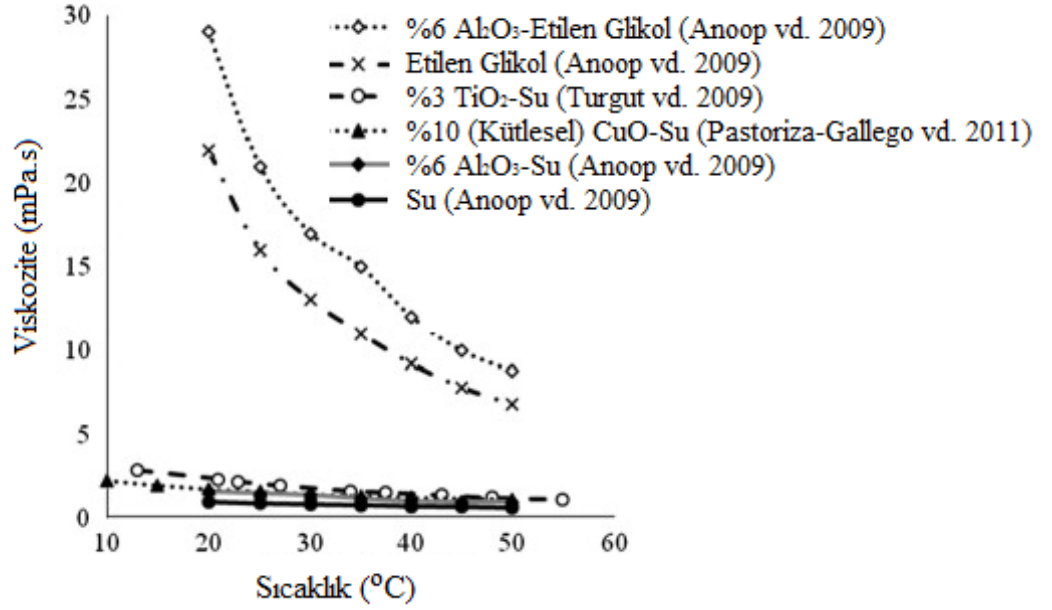
Tavman et al. (2010) tarafından yapılan deneysel çalışmada sırasıyla 12, 21 ve 30 nm partikül boyutlarındaki  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  ve  $Al_2O_3$  nanopartikülleriyle %2'ye kadar hacimsel partikül oranlarında hazırlanan su bazlı nanoakışkanların viskoziteleri belirlenmiştir. Nanoakışkan viskozite değerlerinin artan hacimsel partikül oranlarına bağlı olarak arttığı kaydedilmiştir.

Kole and Dey (2010) tarafından 15-50°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen çalışmada  $Al_2O_3$  kullanarak %0,1 ile %1,5 hacimsel partikül oranları için nanoakışkanların viskoziteleri incelenmiştir. Daha önce görüldüğü gibi yine artan sıcaklık değerleri ile viskozitenin azaldığı kaydedilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Pastoriza-Gallego et al. (2011) tarafından Su-CuO nanoakışkanının sıcaklıkla viskozite değişimi 283,15 K ile 323,15 K aralığında incelenmiştir. Deneylede viskozitenin sıcaklık artışıyla düştüğü gözlemlenmiştir.

Şekil 2.2’de Mahbulul et al. (2012) tarafından çeşitli çalışmalar için viskozitenin sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2. 2. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklıkla değişimi

Azmi et al. (2016b) ve Kakaç and Pramuanjaroenkij (2016) tarafından gerçekleştirilen ve nanoakışkanların viskozitesini inceleyen iki farklı çalışmadan edinilen özet tabloları sırasıyla Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5’te gösterilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2. 4. Nanoakışkan viskozitesi özet çizelgesi

Kaynak	Partikül Tipi	Temel Akışkan	Hacimsel Oran (%)	Parçacık Boyutu (nm)	Maksimum Artış (%)	Sıcaklık
(Masuda et al. 1993)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	1,30–4,30	13	300	31,85–86,85 °C
	SiO <sub>2</sub>	Su	1,10–2,40	12	200	
		Su	3,10–4,30	27	60	
(Pak and Cho 1998)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	0,99–10	13	19900	25 °C
	TiO <sub>2</sub>	Su	0,99–10	27	200	
(Wang et al. 1999)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	0–6,0	28	85	Oda sıcaklığı
		EG	0–3,5		40	
(Das et al. 2003), (Putra et al. 2003)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	1–4	38	46	20–60 °C
(Tseng and Lin 2003)	TiO <sub>2</sub>	Su	5–12	44013	120000	Mevcut değil
(Heris et al. 2006)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	0,2–3,0	20	40	24 °C
	CuO			50-60	60	
(Ding et al. 2006)	CNT	Su	0,1–0,5	Mevcut değil	Mevcut değil	25–40 °C
(Namburu et al. 2007a), (Namburu et al. 2007b)	SiO <sub>2</sub>	EG	0–10	29,50, 100	Mevcut değil	–35–50 °C
	CuO	Su	0–6,12	29	350	–35–50 °C
(He et al. 2007)	TiO <sub>2</sub>	Su	0,24–1,18	20	11	22 °C
(Nguyen et al. 2007a), (Nguyen et al. 2008)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	0–13	36/47	450	75 °C ortam
	CuO			29	1800	
(Lee et al. 2008)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Su	0,01–0,3	30	3	21–39 °C
(Turgut et al. 2009)	TiO <sub>2</sub>	Su	0,2–3,0	21	130	13–55 °C
(Yu et al. 2009a)	SiC	Su	3,7	170	100	25–70 °C
(Kole and Dey 2010)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Motor soğutma SIVISI	0,1–3,5	<50	300	10–80 °C
(Tavman et al. 2010)	SiO <sub>2</sub>	Su	0,4–1,85	12	90	20–50 °C
	TiO <sub>2</sub>		0,2–2,0	21	20	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,5–1,5	30	80	
(Lee et al. 2011)	SiC	Su	3	100	100	28–70 °C
(Azmi et al. 2012), (Azmi et al. 2013)	SiO <sub>2</sub>	Su	0–4,0	50	49	30 °C



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2. 5. Su ve EG bazlı nanoakışkanların deneysel bağlı viskoziteleri

Temel Akışkan	Nanopartikül Tipi	Hacimsel Oran (%)	Bağlı Viskozite	Kaynak
Su (Sundar et al. 2013)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01-0,30	1,029	(Lee et al. 2008)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00-5,00	2,36	(Chandrasekar et al. 2010)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (36 nm)	0,00-13,00	4,5	(Nguyen et al. 2008)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (47 nm)	0,00-13,00	5,5	(Nguyen et al. 2008)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00-6,00	1,6-1,8	(Anoop et al. 2009)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (<50 nm)	0,13-2,90	1,3	(Pastoriza-Gallego et al. 2009)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (<20 nm)	0,13-2,90	1,8	(Pastoriza-Gallego et al. 2009)
	TiO <sub>2</sub>	0,20-2,00	1,15	(Duangthongsuk and Wongwises 2009)
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,00-2,83	2	(Li et al. 2005)
	Fe	0,00-4,00	11,25	(Li et al. 2005)
	Ag	0,3 / 0,06 / 0,09	1,06-1,43	(Godson et al. 2010)
	CuO	1,00-6,12	4	(Namburu et al. 2007b)
	CuO	0,16-1,70	1,14 / 1,81	(Pastoriza-Gallego et al. 2011)
SiC	4	1,8	(Timofeeva et al. 2011)	
EtilenGlikol (Sundar et al. 2013)	AlN	1,00-10,00	1,37	(Yu et al. 2011)
	TNT	0,10-1,80	1,7	(Chen et al. 2009a)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00-6,00	1,22	(Anoop et al. 2009)
	CuO	0,00-6,00	1,24	(Anoop et al. 2009)
	ZnO	0,20-5,00	1,15	(Yu et al. 2009b)
	Elmas	1	1,01	(Yu et al. 2009b)

### 2.2.3. Isıl iletkenlik ve viskozite modelleri

Nanoakışkanların ısıl iletkenliğini belirleyebilmek yapılan çalışmalar sonucunda literatüre çok sayıda teorik model kazandırılmıştır. Maxwell (1881) tarafından karışım içerisinde yalnızca küresel parçacıkların eklenmesi durumunda geçerli olan bir model öne sürülmüştür. Maxwell modeli ile başlangıçta katı partiküllerden oluşan katı-sıvı karışımlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Yalnızca küresel parçacıkların eklenmesi durumunda geçerli olması sebebiyle bu modelin nanoakışkanlarda uygulanabilmesi oldukça zordur.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Günümüzde farklı yöntemlerle üretilen nanopartikül veya sentezlenen nanoakışkan partikül şekilleri küresel geometrinin dışına çıkabilmektedir. Hamilton and Crosser (1962) tarafından küresel parçacıkların yanında küresel olmayan parçacıklar için de kullanılabilen başka bir model sunulmuştur. Bu model ısı iletkenlik üzerinde partikül şeklinin etkisini incelemek için önemli bir modeldir. Çizelge 2.6’de verilmiş olan denklemde  $n$  deneysel şekil faktörüdür ve  $n=3/\psi$  olarak yazılır. Burada  $\psi$  partikül küreselliğidir ve partikül ile eşit hacme sahip kürenin yüzey alanının partikülün yüzey alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Lee et al. (1999) tarafından  $Al_2O_3$  nanoakışkan kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmada dairesel parçacıklar için sonuçların modelle oldukça iyi uyum sağladığı rapor edilmiştir. Xuan and Li (2000) tarafından Hamilton Crosser modeli kullanılarak  $\psi$ ’nin 0,5 ten 1’e kadar çeşitli değerleri için nanoakışkanların ısı iletkenliğini tahmin etmeyi amaçlayan bir model ileri sürülmüştür.

Yu and Choi (2003) tarafından da iki fazlı karışımların efektif ısı iletkenliğini hesaplamak amacıyla alternatif bir model sunulmuştur. Yukarıda bahsedilen modellerin yanısıra homojen küresel partiküller içeren iki fazlı karışımlar için güçlü bir model olan Bruggeman (1935) modelinin de literatürde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Wang et al. (2003) tarafından bu model nanopartiküllerin kümelenme etkisini azaltmak amacıyla modifiye edilmiştir. Çizelge 2.6 nanoakışkanlarda ısı iletkenlik modellerini içeren bir özet tablo niteliği taşımaktadır.

Çizelge 2. 6. Isıl iletkenlik modelleri özet çizelgesi (Angayarkanni and Philip 2015)

1. (Maxwell 1881)	$\frac{k}{k_b} = \frac{1+2\beta\phi}{1-\beta\phi}, \beta = \frac{(k_p - k_b)}{(k_p + 2k_b)}$
2. (Bruggeman 1935)	$\frac{k}{k_b} = k_b \frac{\left[ (3\phi - 1) \frac{k}{k_b} + (2 - 3\phi) + \sqrt{\Delta} \right]}{4},$ $\Delta = (3\phi - 1)^2 \left( \frac{k_p}{k_b} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left( \frac{k_p}{k_b} \right)$
3. (Hamilton and Crosser 1962)	$\frac{k}{k_b} = k_b \left[ \frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_b + (k_b - k_p)\phi} \right]$
4. (Yu and Choi 2004)	$\frac{k}{k_b} = \left( 1 + \frac{n\phi A}{1 - \phi A} \right) k_1, A = \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} \frac{k_{pj} - k_b}{k_{pj} + (n-1)k_b}$

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

5. (Hashin and Shtrikman 1962)	$k_b \left[ 1 + \frac{3\varphi k}{3k_b + (1-\varphi)k} \right] \leq k \leq \left[ 1 - \frac{3(1-\varphi)k}{3k_p - \varphi k} \right] k_p$
6. (Avsec and Oblak 2007)	$\frac{k}{k_b} = \left[ \frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)\alpha_e(k_b - k_p)}{k_p + (n-1)k_b + \alpha_e(k_b - k_p)} \right]$
7. (Xuan and Li 2003)	$\frac{k}{k_b} = \frac{k_p + 2k_b - 2(k_b - k_p)\varphi}{k_p + 2k_b + (k_b - k_p)\varphi} k_f + \frac{\rho_p \varphi c_p}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \mu}}$
8. (Pak and Cho 1998)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 7,47\varphi$
9. (Kumar et al. 2004)	$\frac{k}{k_b} = k_b + c \frac{2k_B T}{\pi v d_p^2} \frac{\varphi r_b}{k_b (1-\varphi) r_b} k_b$
10. (Chandrasekar et al. 2009)	$\frac{k}{k_b} = \left[ \frac{k_p + (n-1)k_b + (n-1)(1+\beta)^3 \varphi (k_p - k_b)}{k_p + (n-1)k_b - (1+\beta)^3 \varphi (k_p - k_f)} \right] + \frac{c\varphi(T - T_0)}{\mu k a^4}$
11. (Prasher et al. 2005)	$\frac{k}{k_b} = (1 + A Re^m, Pr^{0,333} \varphi) \left[ \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\varphi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\varphi} \right] k_p,$ $h = \frac{k_p}{a(1 + A Re^m, Pr^{0,333} \varphi)}$
12. (Leong et al. 2006)	$\frac{k}{k_b} = \frac{(k_p - k_{lr})\varphi k_{lr} [2\gamma_1^3 - \gamma^3 + 1] + (k_p + 2k_{lr})\gamma_1^3 [\varphi\gamma^3(k_{lr} - k_b) + k_b]}{\gamma_1^3(k_p + k_{lr}) - (k_p - k_{lr})\varphi [\gamma_1^3 + \gamma^3 - 1]}$
13. (Yamada and Ota 1980)	$\frac{k}{k_b} = \frac{\frac{k_p}{k_b} + K - K\varphi(1 - \frac{k_p}{k_b})}{\frac{k_p}{k_b} + K + \varphi(1 - \frac{k_p}{k_b})} k_b, K = 2\varphi^{0,2} (l_p / d_p)$
14. (Gupte et al. 1995)	$k = k_b (0,0556Pe + 0,1649Pe^2 - 0,0391Pe^3 + 0,0034Pe^4)$
15. (Hasselman and Johnson 1987)	$\frac{k}{k_b} = \frac{[\alpha(1+2\beta+2)] + 2\varphi[\alpha(1-\beta)-1]}{[\alpha(1+2\beta+2)] - \varphi[\alpha(1-\beta)-1]}$
16. (Xie et al. 2005)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\theta\varphi_T + \frac{3\theta^2\varphi_T^2}{1-\theta\varphi_T}$
17. (Jang and Choi 2004)	$\frac{k}{k_b} = k_b + (1-\varphi) + k_p\varphi + \varphi h\delta_T$
18. (Timofeeva et al. 2007)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\varphi$

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

19. (Wang et al. 2003)	$\frac{k}{k_b} = \frac{(1-\varphi) + 3\varphi \int_0^{\infty} \frac{k_{cl}(r)n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_b} dr}{(1-\varphi) + 3\varphi \int_0^{\infty} \frac{k_b n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_b} dr}$
20. (Emami-Meibodi et al. 2010)	$\frac{k}{k_b} = \frac{\alpha'(1 + \frac{\Delta}{d})}{1 + \frac{\alpha'\Delta}{d}}$
21. (Wei 2017)	$\frac{k}{k_b} = 1 + \frac{3fq(p) / p_0}{1 - fq(p) / p_0}$
22. (Corcione 2011)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 4.4 \text{Re}^{0.4} \text{Pr}^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.03} \varphi^{0.66}$
23. (Wang et al. 2009a)	$k_{cp} = k_{ad} \frac{(k_p + 2k_{ad}) + 2A^3(k_p - k_{ad})}{(k_p + 2k_{ad}) - A^3(k_p - k_{ad})}; A = \frac{1-t}{t+a}$
24. (Chon et al. 2005)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 64,7\varphi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.7476}, \text{Pr}^{0.9955} \text{Re}^{1.2321}$
25. (Kihm et al. 2011)	$\frac{k}{k_b} = \left[ 1 + C \frac{f^a k_b \rho_p c_p T^{1,5}}{k_b h \mu^{0,5} d_p^{0,5}}, \exp(-3,8T_b / T) \left(\frac{c_b}{c_p}\right)^b \right]$
26. (Evans et al. 2006)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\varphi \frac{\gamma - 1}{\gamma + 2}$
27. (Evans et al. 2008)	$\frac{k}{k_b} = 1 + \varphi_p \frac{k_p}{3k_b}$
28. (Yang 2008)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\varphi \frac{\alpha - 1}{\alpha + 2}; \alpha = \frac{r_p}{R_b k_b}$
29. (Braginsky and Shklover 2008)	$k_{\min}^{-1} = \varphi k_s^{-1} + (1-\varphi)k_1^{-1}$ $k_{\max} = \varphi k_s + (1-\varphi)k_1$
30. (Vajjha and Das 2009)	$\frac{k}{k_b} = \left[ \frac{k_p + 2k_b - 2(k_b - k_p)\varphi}{k_p + 2k_b + (k_b - k_p)\varphi} \right] \times 5 \times 10^4 \beta \varphi \rho_{p,b} \sqrt{\frac{kT}{\rho_p d_p}} f(T, \varphi)$
31. (Ho et al. 2010)	$\frac{k}{k_b} = \frac{2 + \left(\frac{k_p}{k_b}\right) + 2\varphi \left[\left(\frac{k_p}{k_b}\right) - 1\right]}{2 + \left(\frac{k_p}{k_b}\right) - \varphi \left[\left(\frac{k_p}{k_b}\right) - 1\right]}$

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Isıl iletkenlik konusuna nazaran nanoakışkanların viskozitesinin belirlenmesi daha az çalışılmış bir konu olma özelliği taşımaktadır. Einstein'ın klasik analiz çalışması nanoakışkanların reolojik özelliklerinin belirlenmesinde yol gösterici olmuştur. Einstein (1906) tarafından sıvılar içerisinde süspansiyon küresel parçacıkların viskozitesini belirlemek amacıyla öncü bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Einstein eşitliği sıvı ile partiküller arasındaki etkileşimi esas almaktadır ve sadece düşük hacimsel oranlarda küresel geometriye sahip partiküller için doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. De Bruijn (1942) tarafından bu yöntem geliştirilerek sadece düşük hacimsel oranlar için değil yüksek hacimsel oranlar için de doğru sonuçlar verebilen uygun hale getirilmiştir. Mooney (1951) tarafından genişletilmiş başka bir Einstein modeli ortaya konulmuştur. Ayrıca Brinkman (1952) tarafından %4 hacimsel oranlarda doğru sonuçlar verebilen sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiş bu sayede Einstein modeli geliştirilmiştir.

Frankel and Acrivos (1967) tarafından başka bir sayısal model ileri sürülmüştür. Daha sonra Graham (1981) tarafından partikül boyutlarını dikkate alarak düşük hacimlerde Einstein modeli ile örtüşen bir model geliştirilmiştir. Masoumi et al. (2009) tarafından nanoakışkanlarda Brownian hareketi etkileri dikkate alınarak farklı bir model ileri sürülmüştür. Bu model güvenilir bir model olma özelliği taşıması nedeniyle çokça bilim insanı tarafından kabul görmüş ve araştırmacılar tarafından sıkça kullanılan bir model olmuştur. Sayısal çalışmalar neticesinde ortaya çıkan viskozite modelleri aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 2.7).

Çizelge 2. 7. Nanoakışkanların viskozite modelleri sayısal çalışmalar (Azmi et al. 2016b)

Yazar	Model	Tanım
(Einstein 1906)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2.5\phi$	%1 den düşük hacim oranında süspansiyonlar için
(De Bruijn 1942)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{1}{1 - 2.5\phi + 1.522\phi^2}$	Daha yüksek hacimsel oranlar için elıştırılmış Einstein modeli
(Vand 1948a), (Vand 1948b)	$\log \mu_{eff} = \log \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{2.5\phi + 2.7\phi^2}{1 - 0.609\phi}$	Brownian etkisinin ihmal edildiği küresel geometrideki parçalar için

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yazar	Model	Tanım
(Mooney 1951)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \exp\left(\frac{2.5\phi}{1 - \phi / \phi_m}\right)$	Sonsuz seyreltilmiş küresel partiküllü süspansiyonlar için
(Brinkman 1952)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}}$	%4'e kadar hacimsel orandaki süspansiyonlarda kullanılabilir
(Krieger and Dougherty 1959)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \left(\frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$	Yarı deneysel
(Frankel and Acrivos 1967)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{9}{8} \left[ \frac{(\phi / \phi_m)^{1/3}}{1 - (\phi / \phi_m)^{1/3}} \right]$	Yarı deneysel
(Nielsen 1970)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = (1 + 1.5\phi) \exp\left(\frac{\phi}{1 - \phi_m}\right)$	Düşük hacimsel oranlar için kabul edilebilir
(Lundgren 1972)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2.5\phi + \frac{25}{4} \phi^2$	Yarı deneysel
(Batchelor 1977)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2$	% 10 a kadar hacimsel oranlar için kabul edilebilir
(Graham 1981)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2.5\phi + 4.5 \times \left[ \frac{1}{\left(\frac{H}{d_p}\right) \left(2 + \frac{H}{d_p}\right) \left(1 + \frac{H}{d_p}\right)^2} \right]$	Frankeland ve Acrivos (1967) modelinin geliştirilmiş halidir
(Masoumi et al. 2009)	$\mu_{nf} = \mu_b + \frac{\rho_p V_b d_p^2}{72C\delta}$ $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi} d_p}$ $C = \mu_b^{-1}(a\phi + b)$	Brownian hareketi etkileri dikkate alınarak hazırlanmıştır

Çizelgede yer alan bütün modeller geniş bir hacimsel oran ölçeğinde veya parçacık boyutunda hazırlanmış nanoakışkanın viskozitesini belirlemek için yeterli sonuçlar göstermemektedir. Seçilen viskozite modelinin beklentilerin altında sonuç göstermesi için nanoparçacık tipi, hacimsel partikül oranı, parçacık boyutları ve parçacık şekli gibi parametrelerdeki herhangi bir değişiklik yeterlidir. Bu sebepten ötürü bilim insanları daha güçlü model ortaya çıkarılabilen yarı deneysel yöntemlere yönelmişlerdir. Yarı deneysel modellerde çoğu zaman bazı parametreler (sıklıkla partikül şekil ve boyutları) sabit tutulmuştur.

### 2.3. Nanoakışkanların Isıl İletkenliği Arttıran Mekanizmalar

Bu bölümde nanoakışkanların ısı iletkenliğindeki artışın sebebi olarak görülen bazı mekanizmalar izah edilecektir.

#### 2.3.1. Nanopartiküllerin Brownian hareketi

Süspansiyon bir akışkan içerisinde katı partiküllerin gelişigüzel yönde zig zag çizerek ilerleme hareketleri Brownian hareketi olarak isimlendirilir. Partiküllerin bu hareketleri ile enerji daha etkin bir şekilde taşınabilmektedir. Ayrıca nanopartiküllerin etrafındaki sıvı hareketinden dolayı meydana gelen bir mikro taşınım etkisi dikkate alınmalıdır. Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin Brownian hareketine etkisi hususunda literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bhattacharya et al. (2004) tarafından nanoakışkanların ısı iletkenliğindeki artışı saptamak amacıyla Brownian hareketi dikkate alınmış ve Brownian dinamiklerinin simülasyonu kullanılmıştır. Çalışmada nanoakışkanın gerçek efektif ısı iletkenliği şu şekilde ifade edilmiştir.

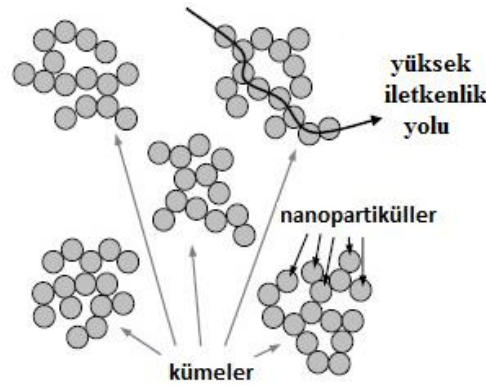
$$k_{nf} = \phi k_p + (1 - \phi)k_b \quad (2.3)$$

Burada  $k_p$  yalnızca nanopartiküllerin ısı iletkenliğini değil, aynı zamanda nanopartiküllerin ısı iletkenliğine Brownian hareketinin etkisini de kapsamaktadır. Çalışmalar neticesinde Brownian dinamikleri simülasyonu metoduyla Cu-Etilen Glikol ve  $Al_2O_3$ -Etilen Glikol nanoakışkanlarının çeşitli yüzdeleri için belirlenen ısı iletkenlik değerlerinin literatürdeki deneysel verilerle çok iyi bir uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Hamilton-Crosser modeli Brownian etkilerini dikkate almayan bir model olarak karşımıza çıkmaktadır ve bu model nanoakışkanların ısı iletkenliklerini belirlemede beklentileri karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Prasher et al. (2005) tarafından Brownian hareketi ve Brownian hareketiyle ortaya çıkan taşınım etkisinin göz önüne alındığı bir çalışma ortaya konmuştur. Bu çalışmada nanoakışkanların ısı iletkenliğindeki olağanüstü artışın Brownian hareketinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir ve kümelenme etkisinin analiz edilmediği bir çalışma olma özelliği taşımaktadır.

Li and Peterson (2007) tarafından yapılan bir çalışmada ise nanopartiküllerin Brownian hareketine bağlı karışma etkisinin nanoakışkanların ısı iletkenlik üzerindeki faydası sayısal olarak çalışılmıştır. Çalışma bir, iki ve daha fazla nanopartikül için hız, basınç ve sıcaklık dağılımını inceleyen bir çalışma olma özelliği taşımaktadır. İki nanopartiküllerin tek partiküle göre ve aynı şekilde daha fazla partiküllerin ise iki partiküle göre daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Neticede, nanopartiküllerin Brownian hareketi ile meydana gelen karışma etkisinin nanoakışkanın ısı iletkenliğini arttırmak için önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışmada, kaymama koşulu ve partiküllerin ıslanabilirliği göz ardı edilmiş ayrıca nanopartiküllerin etrafındaki akışın nanopartikülleri büyük ölçekli nesnelere gibi çözümlenmiştir. Öte yandan bazı çalışmalar ise ısı iletkenliği arttırmada Brownian hareketinin çok etkin olmadığını savunmaktadır. Örneğin, Evans et al. (2006) tarafından teorik olarak ısı iletkenlik artışının çok az kısmının Brownian hareketine bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca bu çıkarım moleküler dinamik simülasyonlar ile desteklenmiştir. Sonuç olarak nanoakışkanlarda ortaya çıkan ısı iletkenlik artışındaki temel sebebin Brownian hareketi etkisi olmayacağı fikrine ulaşılmıştır.

### 2.3.2. Nanopartiküllerin Kümelenmesi

Birçok bilim insanı tarafından nanopartiküllerin kümelenmeler meydana getirdiği belirtilmiştir (Prasher et al. (2006); He et al. (2007)). Evans et al. (2008) tarafından nanoakışkanların içinde meydana gelen partikül kümelenmelerinin daha hızlı ısı transferi gerçekleşmesine sebep olacağı vurgulanmıştır. Bunun nedeni ısının katı partiküllerde sıvı matrise göre daha hızlı iletilmesidir. Şekil 2.3’de bu olgu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2. 3. Yüksek iletkenlik yolu (Özerinç et al. 2010)



Ayrıca Evans et al. (2008) tarafından nanoakışkanın ısı iletkenliği ile arayüzey ısı direnci arasındaki etkileşim dikkate alınarak aşığıdaki ısı iletkenlik modeli ortaya atılmıştır.

$$\frac{k_{nf}}{k_b} = \frac{(k_{cl} + 2k_b) + 2\varphi_{cl}(k_{cl} - k_b)}{(k_{cl} + 2k_b) - \varphi_{cl}(k_{cl} - k_b)} \quad (2.4)$$

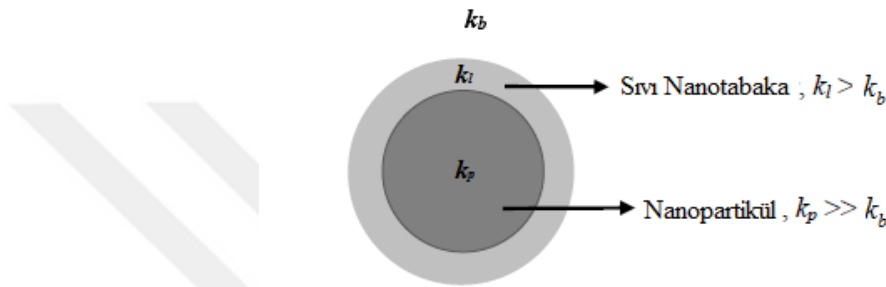
Eşitlik 2.4'te  $\varphi_{cl}$  kümelerin hacimsel partikül oranını ve  $k_{cl}$  kümelerin ısı iletkenliğini ifade etmektedir. Ayrıca teorik çalışmaya ek olarak nanoakışkanın efektif ısı iletkenliği Monte Carlo simülasyonundan faydalanılarak da elde edilmiştir. Bilgisayar simülasyonu ile teorik yaklaşım sonuçları kıyaslandığında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Bu bilgi ışığında küme boyutundaki artışla efektif ısı iletkenliğin arttığı çıkarımı yapılabilir. Ancak partikül oranındaki artışın ısı iletkenlikte kümelenme etkisi ile olan artışı azalttığı belirlenmiştir. Geline nokta da nanopartiküllerin kümelenmesindeki aşırılığın nanoakışkanlarda istenmeyen bir durum olan çökme problemine sebep olabileceği de unutulmamalıdır. Bu sebeple ısı iletkenliği maksimum seviyede artırmak için kümelenme optimum seviyede tutulmalıdır.

Feng et al. (2007) tarafından nanopartikül boyutlarının etkileri de dikkate alınarak kümelenmenin ısı iletkenlik artışına etkileri incelenmiş ve bir model ortaya konulmuştur. Sonuç olarak küçülen partikül boyutlarında Van der Waals kuvveti etkilerinin artışından dolayı kümelenme oluşumlarının birbirine daha yakın gözlemlendiği belirtilmiştir. Bunun yanısıra kümelenmenin ve partikül çaplarındaki küçülmenin ısı iletkenlik katsayısında artışına sebep olacağı vurgulanmıştır.

Keblinski et al. (2008) tarafından nanoakışkanlarda ısı iletkenlik artışına sebep olan ana mekanizmaları tespit etmek amacıyla derledikleri deneysel veriler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Neticede Brownian hareketi ve bunun sonucunda meydana gelen mikro taşınım, partiküller üzerindeki sıvı katmanları oluşumları ve yakın alan radyasyonu gibi etkilerin ısı iletkenlikteki artışın temel nedeni olamayacağı vurgulanmıştır. Partiküllerin kümelenmesi ısı iletkenlik artışının temel nedeni olarak belirtilmiştir.

### 2.3.3. Nanopartiküller etrafında sıvı katmanlaşması

Literatürde nanoakışkanlarda sıvı moleküllerinin partikül yüzeyleri etrafında tabakalara sahip yapılar meydana getirdiğini belirten pek çok çalışma bulunmaktadır (Yu et al. (1999); Yu and Choi (2003)). Ayrıca bu nanotabakaların sıvı matrisinden daha fazla ısı iletkenliğe sahip olduğu da vurgulanmıştır. Gözlemler neticesinde, nanopartiküller etrafındaki tabakalı yapıların nanoakışkanların ısı iletkenliğindeki artıştan sorumlu olabileceği düşünülmüştür. Bu olgu Şekil 2.4'te şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2. 4. Nanopartikül etrafında oluşan katmanlı yapı (Özerinç et al. 2010)

Nanotabakaların ısı iletkenliği ve kalınlığı ile ilgili deneysel verilerin elde edilememesi mekanizma için önemli bir dezavantaj olmuştur. Yu and Choi (2003) tarafından nanotabakaların ısı iletkenliği ve kalınlığı için bazı değerler kabul edilerek, nanopartiküller etrafındaki sıvı tabakasının etkisini kapsayan bir model ileri sürülmüştür. Xie et al. (2005) tarafından ise nanotabakanın ısı iletkenliğinin de sıcaklığa bağlı olarak verildiği bir model ortaya konulmuştur. Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri üzerinde nanotabaka tesirinin görülmesi yönünden bu teorik çalışma büyük önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalara karşın nanotabaka parametrelerinin doğru seçilmesi için uygun deneysel verilerin elde edilmesi gerekmektedir.

Lee (2007) tarafından nanotabakanın ısı iletkenliği ve kalınlığının belirlenmesi ile ilgili nanopartiküller çevresinde elektriksel çift tabaka oluşumu yaklaşımı öne sürülmüştür. Yapılan çalışmada nanotabaka kalınlığının, dielektrik sabiti, iyonik güç ve nanoakışkan sıcaklığına; nanotabaka ısı iletkenliğinin ise toplam yüklenmiş yüzey yoğunluğu, elektriksel çift tabadaki iyon yoğunluğu, nanoakışkanın pH değeri, nanopartikül ve ana akışkanın ısı iletkenlik değerine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Tillman and Hill (2007) nanotabakanın ısı iletkenliği ve kalınlığının hesaplanmasında başka bir teorik yol önermiştir. Bu çalışmada nanotabakanın ısı iletkenliğinin yarıçap boyunca dağılımla nanotabakanın kalınlığı arasındaki ilişki için uygun şartlar sağlanarak klasik ısı iletim denkleminde faydalanılmıştır. Nanotabaka içindeki ısı iletkenliğin yarıçap boyunca değişimiyle ilgili olan fonksiyon başlangıç tahmini kullanılarak belirlenmiştir. Nanotabakanın kalınlığı ve ilgili varsayımın doğruluğunu kontrol etmek bu tahmine göre gerçekleşebilmiştir. Ayrıca bazı araştırmacılar tarafından nanoakışkanların ısı iletkenliğindeki artışta ana etkinin nanotabakalar ile meydana getirilmediği savunulmuştur. Xue et al. (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışma buna örnek olarak verilebilir.

### 2.4.4. Nanopartiküllerde balistik fonon iletimi

Katılarda, partiküllerin karakteristik büyüklüğü dikkate alındığında, fononların ortalama serbest yolunun bu uzunluktan daha küçük olduğu durumlarda difzif ısı transferinin geçerli olduğu bilinen bir gerçektir. Koblinski et al. (2002) tarafından oda sıcaklığındaki  $Al_2O_3$  nanopartikül fononlarının ortalama serbest yolunun 35 nm olduğu tahmin edilmiştir. Wilcox (1973) tarafından geliştirilen yöntemlerden faydalanılarak gerçekleştirilen bu tahmin sonucunda 35 nanometreden küçük partikül çaplarında gerçekleşen ısı transferinin difzif değil balistik olduğu sonucu çıkarılabilir. Buna karşın henüz ısı iletkenlik artışında balistik ısı transferi olgusu etkisinin tam anlamıyla izah edilemeyeceği vurgulanmıştır. Buna rağmen çalışmada nanopartiküllerin birbirine çok yakın olduğu ve partikül boyutlarının oldukça küçük olduğu durumlarda bu teorinin geçerli olacağı ileri srlmştir. Bunlara ek olarak çalışma neticesinde partiküller arasındaki mesafeyi azaltma eğiliminde olmasından dolayı Brownian hareketinin bu teoriyi destekleyeceği vurgulanmıştır.

Nie et al. (2008) tarafından konu ile ilgili farklı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada nanopartiküllerin temel akışkan içerisine ilavesiyle ortalama serbest yolun değişimi teorik olarak incelenmiştir. Araştırmacılar tarafından fononların ortalama serbest yolunda belirgin bir değişimin mevcut olduğu tabaka yapısının yaklaşık 1 nm'lik bir mesafede sınırlı olduğu ortaya çıkarılmıştır. Sonuç olarak bu şekilde yüksek derecede yerel bir tesirin ısı iletkenlikteki artıştan sorumlu tutulamayacağı kanısına ulaşılmıştır.

Bunun yanında nanopartiküllerin varlığına bağlı olarak sıvı fazda fonon taşıma hızının değişimi de incelenmiş ve etkisinin önemsiz olduğu gözlemlenmiştir.

### 2.5.5. Yakın alan radyasyonu

İki nanopartikül arasındaki ısı transferinde yakın alan radyasyonu etkisi ile ilgili önemli bir çalışma Domingues et al. (2005) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada problem moleküler dinamik simülasyon metodu ile incelenmiş ve nanopartiküller arasındaki mesafenin partikül boyutundan küçük olduğu belirtilmiştir. Söz konusu durumda nanopartiküller arasındaki yakın alan radyasyonunun ısı iletkenliği arttırmada önemli bir etki gösterebileceği belirtilmiştir. Bu etkinin 10 nm'den küçük partiküllerde önem kazanacağı ve Brownian hareketinin partiküller arası mesafeyi azaltmasından dolayı bu etkiyi arttıracığı söylenmiştir. Konuyla ilgili bir diğer çalışma Ben-Abdallah (2006) tarafından yapılmıştır. Bu çalışma Bakır-Etilen Glikol nanoakışkanı seçilerek sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve yakın alan etkileşiminin ısı iletkenlik katsayısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı savunulmuştur.

### 2.2.6. Nanoakışkanların ısı transferi

Nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri temel akışkan ve partikül tipi, hacimsel partikül yoğunluğu, partikül boyut ve şekilleri gibi çeşitli etken parametreler göz önünde bulundurularak araştırılmıştır. Nanoakışkanların ısı transferi adı altında önde gelen çalışmalardan biri Pak and Cho (1998) tarafından ortaya konulmuştur.  $Al_2O_3$ -Su ve  $TiO_2$ -Su nanoakışkanları kullanılarak türbülanslı akış rejiminde gerçekleştirilen deneylerde ısı transfer katsayısına hacimsel partikül oranı ve Reynolds sayısının etkileri araştırılmıştır. Isı transferi katsayısının belli noktaya kadar hacimsel partikül oranı ve Reynolds sayısındaki artışla arttığı tespit edilmiştir. Xuan and Li (2003) tarafından laminar ve türbülanslı akış rejimlerinde, sabit ısı akısı için düz bir boru boyunca akan Cu-Su nanoakışkanının taşınımıyla ısı transferi ve akış karakteristiklerini içeren deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Yürütülen çalışma sonucunda nanopartiküllerin ısı transfer katsayısını arttırdığı ve ihmal edilebilir bir basınç düşümüne sebep olduğu belirtilmiştir.

Wen and Ding (2004) tarafından çok duvarlı karbon nanotüplerin sulu süspansiyonlarının (temel akışkanın su olduğu nanoakışkanlarının) etkin ısıl iletkenliği deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma neticesinde etkin ısıl iletkenliğin artan sıcaklık ve hacimsel partikül oranı artışı ile arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca yüksek Reynolds sayılarında ısı transferi üzerinde hacimsel partikül oranı etkisinin daha belirgin olduğu ve artışın giriş bölgesinde dikkate değerken aksel mesafeyle düştüğü belirtilmiştir.

Yang et al. (2005) tarafından grafit içeren nanoakışkanların ısı transferi performansını ele alan deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma dairesel boru içerisinde laminer akış rejiminde yürütülmüştür. Sistemin ısı transferi katsayısının nanopartikül eklenmesiyle arttığı belirlenmiş fakat bu artışın mevcut kolerasyonlar ile tahmin edilenden çok düşük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca nanopartikül eklenmesiyle sistemde gözlenen basınç düşümünde büyük bir artış gözlenmemiştir.

Ding et al. (2006) tarafından CNT partikülleriyle sentezlenen su bazlı nanoakışkanların ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde maksimum %350 gibi oldukça yüksek bir ısı transferi artışı sağlanmıştır ve bu ısıl iletkenlik artışı, nanopartikül varlığından dolayı ısıl sınır tabaka kalınlığındaki azalma, rastgele partikül hareketleri gibi sebeplerle izah edilmiştir.

Heris et al. (2007) tarafından laminer akış ve sabit yüzey sıcaklığı şartlarında  $Al_2O_3$ -Su nanoakışkanının dairesel boru içerisinde taşınımına ısı transferi incelenmiştir. Nanoakışkanlardaki ısı transferi artışının nedeninin sadece ısıl iletkenlik artışı değil aynı zamanda nanopartiküllerin dağılması ve kaotik hareketi, Brownian hareketi, partikül göçü, partikül dalgalanması veya etkileşimi gibi nedenler olabileceği bildirilmiştir.

Sommers and Yerkes (2010) tarafından yapılan çalışmada 10 nm boyutlarındaki  $Al_2O_3$  nanopartiküllerinin Propanal temel akışkanı içerisinde süspansiyon edilmesi ile hazırlanan nanoakışkanın ısıl-hidrolik performansları incelenmiştir. Çalışma sonucunda  $Al_2O_3$ -Propanal nanoakışkanının ısı transferindeki artışın sadece termofiziksel özelliklerinin artmasının sonucunda gerçekleştiği; Brownian hareketinin, sıvı tabakanın veya diğer arayüzey etkilerinin artışa katkı sağlamadığı ifade edilmiştir. Bu ısıl performans artışını izah etmek için iki muhtemel mekanizmadan söz edilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bunlardan ilki nanopartiküllerin akış içerisinde türbülans etkilerini arttırması, ikinci ise sınır tabaka kalınlığının azalması sonucu artışın gerçekleşmiş olması olarak belirtilmiştir.

Corcione et al. (2012) tarafından su ve etilen glikol temel akışkanları içerisinde farklı hacimsel oranlarda CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin süspansede edilmesiyle elde edilecek nanoakışkanların boru içindeki akışta ısı transferi ve akış karakteristikleri sayısal olarak çalışılmıştır. Çalışma sonucunda hacimsel partikül oranının optimum bir değerine kadar gerçekleşen artışla ısı transferinin arttığı, optimum değer aşıldığında ısı transferinin belirgin düşüşler gösterdiği vurgulanmıştır.

Tiwari et al. (2013) tarafından Seryum Oksit nanopartiküllerinin su temel akışkanı içerisinde süspansede edilmesiyle %0.5-%3 hacimsel partikül oranı aralığında hazırlanan nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri levha tipi ısı değiştiricide deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda basınç düşümünde kayda değer bir değişim gözlenmemiş ve hacimsel partikül oranının artmasıyla ısı transferi katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. Böylece iş akışkanı olarak nanoakışkan kullanılmasının ısı transferine kayda değer katkı sağlayacağı ve pratik uygulamalar için uygun olacağı çıkarımında bulunulmuştur.

Kalteh (2013) tarafından farklı tip nanopartiküllerin farklı tip temel akışkanların içerisinde süspansede edilmesiyle elde edilen nanoakışkanların ısı transferi karakteristiklerini incelemek üzere geniş kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada nanopartikül olarak Elmas, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, Fe, Au, Ag, SiO<sub>2</sub> ve TiO<sub>2</sub>; temel akışkan olarak ise Etilen Glikol, Motor Yağı ve Saf Su seçilmiştir. Isı transfer katsayısı üzerinde seçilen nanopartikül ve temel akışkanların etkisinin incelendiği bu sayısal çalışmanın sonuçları Çizelge 2.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. 8. Re=100'de ve %1 hacimsel oranda nanopartiküllerin saf su içerisinde basınç düşümü ve ortalama Nusselt sayıları

Nanopartikül	Saf Su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	Cu	Fe	Au	Ag	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Elmas
$\Delta P$	24,19	24,6	24,61	24,61	24,63	24,66	24,63	24,59	24,59	24,58
$\overline{Nu}$	7,92	8,42	8,23	11,65	8,81	11,04	12,07	8,12	8,00	17,35

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bunun yanında Azmi et al. (2016a) tarafından konuyla ilgili Çizelge 2.9'da verilen bir özet oluşturulmuştur.

Çizelge 2. 9. Su bazlı nanoakışkanların ısı transferi özet çizelgesi

Kaynak	Deneysel Aralıklar ve Partiküllerin Türü	Sonuçlar / Açıklamalar
(Hwang et al. 2009)	$Al_2O_3$ (30 nm) $\phi \leq \%0,3$ $200 \leq Re \leq 1400$	Tam gelişmiş laminer aralıkta %0.3 hacim konsantrasyonunda ısı transfer katsayısında %8 artış sağlanmıştır.
(Heris et al. 2006)	$Al_2O_3$ (20 nm) $\phi \leq \%3,0$ CuO (50-60 nm) $\phi \leq \%3,0$ $650 \leq Re \leq 2050$	Yüksek hacimsel partikül oranlarında $Al_2O_3$ nanoakışkanları CuO nanoakışkanlarına göre daha büyük ısı transfer katsayısı elde edilmiştir.
(Eastman et al. 2001)	CuO $\phi \leq \%1,0$	Isı transfer katsayısında suya oranla %15'den fazla iyileşme gözlemlenmiştir.
(Xuan and Li 2003)	Cu (<100 nm) $\phi \leq \%2,0$ $10000 \leq Re \leq 24000$	Nanoakışkan ile duvar sıcaklığı arasındaki sıcaklık gradyanının eğiminin azalacağı idda edilmiştir.
(Fotukian and Esfahany 2010)	CuO (30-50 nm) $\phi \leq \%0,024$ $6000 \leq Re \leq 31000$	Suya oranla nanoakışkanın ısı transfer katsayısını %25 ve basınç düşümünü ise %20 arttırdığı belirlenmiştir.
(Kim et al. 2009)	CNT (20 nm) $\phi \leq \%3,5$ $Al_2O_3$ (20-50 nm) $\phi \leq \%3,0$ $800 \leq Re \leq 6500$	%3.0 hacimsel partikül yoğunluğunda $Al_2O_3$ nanoakışkanın ısı transfer katsayısında %20'lik bir artış oluşturduğu bildirilmiştir.
(Nguyen et al. 2007b)	$Al_2O_3$ (36 ve 47 nm) $\phi = \%6,8$ $3000 \leq Re \leq 9000$	47 nm boyutlu parçacıklarla karşılaştırıldığında 36 nm boyutlu parçacıklar ile daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edildiği gözlemlenmiştir.
(Williams et al. 2008)	$Al_2O_3$ (46 nm) $\phi \leq \%3,6$ $ZrO_2$ (60 nm) $\phi \leq \%0,9$ $9000 \leq Re \leq 63000$ $21 \leq T_{nf} \leq 76^\circ C$	Mevcut tek fazlı akış kolerasyonlarının nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümünü tahmin etmede kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.
(Pak and Cho 1998)	$Al_2O_3$ (13 nm) $\phi \leq \%2,78$ $TiO_2$ (27 nm) $\phi \leq \%3,16$ $10^4 \leq Re \leq 10^5$	%2.78 hacimsel oranında $Al_2O_3$ nanoakışkanı için ısı transfer katsayısında %12 azalma gözlemlendi.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kaynak	DeneySEL Aralıklar ve Partiküllerin Türü	Sonuçlar / Açıklamalar
(He et al. 2007)	TiO <sub>2</sub> (95 nm) $\phi \leq \%1,1$ $700 \leq Re \leq 6500$	Nanoakışkan konsantrasyonunu ısı transfer katsayısına etkisinin türbülanslı akımda laminar akıma göre daha fazla olduğu belirlendi.
(Duangthongsuk and Wongwises 2010)	TiO <sub>2</sub> (21 nm) $0,2 < \phi < \%2,0$ $3000 < Re < 18000$	Nanoakışkanların ısı transferi katsayısını %1 hacimsel orana kadar arttırdığı, bu noktadan sonra artan konsantrasyonun ısı transfer katsayısını olumsuz etkiledi belirlendi.
(Yu et al. 2009a)	SiC (170 nm) $\phi = \%3,7$ $3300 < Re < 13000$ $4,6 < Pr < 7,1$	Isı transfer katsayısında %50-%60 arasında bir artış gözlemlendi. Ayrıca daha az pompa gücü gerektiren SiC'ün Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 'e oranla daha iyi bir ısı transfer akışkanı olduğu sonucuna varıldı.
(Azmi et al. 2014b), (Azmi et al. 2013), (Azmi et al. 2014a)	TiO <sub>2</sub> (50 nm) $\phi \leq \%3,0$ SiO <sub>2</sub> (22 nm) $\phi \leq \%4,0$ $5000 < Re < 25000$	Isı transfer katsayısında TiO <sub>2</sub> için %1 hacimsel oranda yaklaşık %26 artış gözlenirken %3 hacimsel oranda SiO <sub>2</sub> de bu oran %33 olarak belirlendi.

### 2.4. Mini ve Mikrokanallarda Taşınım İle Isı Transferi

Mikro ölçeğe sahip termal, akışkan ve kimyasal sistemlerin ortaya çıkması ile mini ve mikro boyutlu kanallar minyatürleştirilmiş sistemlerin vazgeçilmezi haline gelmiştir. Düşük ağırlık, küçük boyut ve daha az miktarda iş akışkanına sahip olmalarından dolayı mini ve mikro kanalları kullanarak doğru minyatürleştirmeyle yüksek sistem verimliliğine ulaşılabileceği bilinmektedir. Minyatürleştirilmiş sistemler bahsedilen avantajların yanı sıra küçük hidrolik çap, yüksek basınç düşümü, çift fazlı akışlarda kaviteasyon ve akış analizi için kullanılacak teorilerin belirsizliği gibi dezavantajları da içermektedir. Mikrokanallarda ısı transferi üzerine çalışmalar Tuckerman and Pease (1981) tarafından başlatılmıştır ve sonrasında mikro termal sistemlerin geliştirilmesiyle birçok araştırmacı, araştırma enstitüsü ve yatırım ajansının önemli bir gündemi haline gelmiştir. Literatürde açık bir şekilde mikro, mini ve makro ölçekli kanallar arasındaki ayrımı açıklığa kavuşturmak için evrensel bir anlaşma tespit edilemediği için mikrokanal isimlendirmesinin farklı kaynaklara göre minikanal olabileceğini belirtmek gerekir.



Mikro ya da minikanallarda akışkanın ısı transferi performansını belirlemek için gaz akışları, sıvı akışları, iki fazlı akışlar ve nanoakışkanlardan faydalanılmıştır. Literatüre bakıldığında ısı transferi üzerinde en büyük etkinin geometrik parametreler tarafından gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Geometrik parametreler genel olarak kanal kesiti, kanal sayısı, kanal yüksekliği, kanal genişliği, kanal pürüzlülüğü, kanal içerisine yerleştirilen yüzey elemanlarından oluşmaktadır. Bu bölümde literatürdeki hem mikro/mini kanallarda gaz akışları, sıvı akışları, iki fazlı akışlar ve nanoakışkanları hem de geometrik parametreleri ele alan çalışmalardan bahsedilecektir.

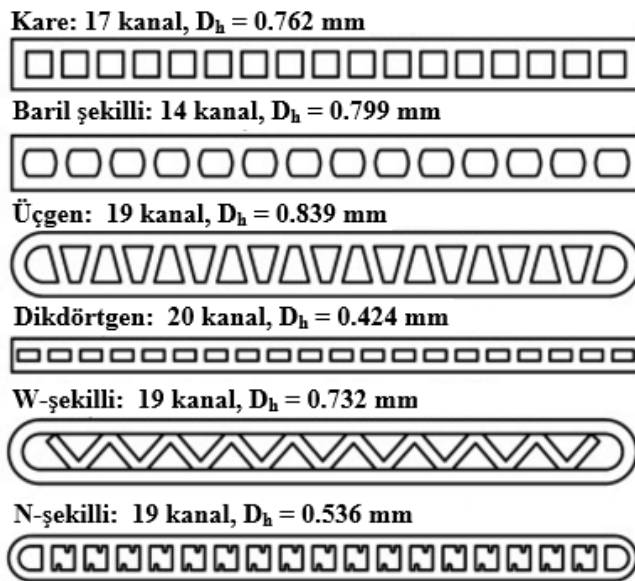
Jang and Choi (2006) tarafından iki farklı (6 nm Bakır-Su, 2 nm Elmas-Su) nanoakışkan çeşidinin farklı hacimsel partikül oranlarıyla mikrokanallı soğutucuların performansı üzerine bir sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. 2,25 W sabit pompa gücünde %1 hacimsel partikül oranındaki 2 nm elmas-su nanoakışkanı içeren mikrokanal soğutucu performansının saf su içeren mikrokanal soğutucuya göre %10'a kadar iyileşme sağladığı kaydedilmiştir. Bunun yanında nanoakışkanların, ısınmış mikrokanal duvarları ve soğutucu arasında hem termal direnci hem de sıcaklık farkını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Lee and Mudawar (2007) tarafından tek ve iki faz için dikdörtgen kesitli (215  $\mu\text{m}$ , 821  $\mu\text{m}$ ) mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transfer hızı, basınç düşüşü, akışın aksel değişimi, akış kararlılığı ve bulk sıcaklıklar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Su ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -HFE7100 nanoakışkanlarından faydalanılmıştır. Ayrıca farklı hacimsel partikül oranlarında  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Su hazırlanarak nanoakışkan derişiminin parametreler üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Jung et al. (2009) tarafından kare kesitli mikrokanallarda, 170 nm boyutunda  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanopartikülleriyle farklı hacimsel partikül oranlarında (%0,6, %1,2, %1,8) hazırlanan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Saf Su nanoakışkanından faydalanılmıştır. Çalışmada sabit ısı akışı için nanoakışkanın sürtünme katsayısı ve ısı transfer etkinliği üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. %1,8 Hacimsel partikül oranındaki nanoakışkanın ısı taşınım katsayısı bakımından suya göre %32 daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Mokrani et al. (2009) tarafından sabit genişlikte mikrokanallarda akış ve taşınım ile ısı transferi deneysel olarak çalışılmıştır. İş akışkanı olarak musluk suyunun kullanıldığı deney düzeneğinde kanal yüksekliği 50  $\mu\text{m}$  ile 500  $\mu\text{m}$  arasında tutulmuş ve akış hızı 0,04 ml/dk ile 240 ml/dk arasında seçilmiştir. Akışta Reynolds sayısı aralığı ise 100 ile 5000 arasında değişkenlik göstermektedir. Çalışma sonucunda akış ve taşınım ile ısı transferi için geleneksel kanun ve kolerasyonların direk olarak uygulanabileceği görülmüştür. Ayrıca laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin büyük boyutlu kanallardakine benzer Reynolds sayılarında görüldüğü de vurgulanmıştır.

Agarwal et al. (2010) tarafından farklı geometride ve altı adet dairesel olmayan mikrokanalda ısı transfer katsayılarını belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada iş akışkanı olarak R134a kullanılmış ve mikrokanal hidrolik çapları 0,424 mm ile 0,939 mm arasında tutulmuştur. Deneylerde akışın kütleli debi aralığı ise 150  $\text{kg/m}^2\text{s}$  ile 750  $\text{kg/m}^2\text{s}$  aralığında seçilmiştir. Mikrokanallar baril şekilli, N-şekilli, W-şekilli, dikdörtgen, kare ve üçgen kesitli olarak 5 farklı geometriye sahiptir (Şekil 2.5). Çalışma neticesinde deney sonuçlarının büyük kanallar için geliştirilmiş teorik modellerin hayli uzağında olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni ise teorik modellerin mikrokanallara özgü akış olgularını ve arayüz kesme davranışını dikkate almaması olarak açıklanmıştır. Ayrıca deney sonuçlarıyla kare, dikdörtgen kesitli ve baril şekilli kanallar için modeller türetilmiştir.



Şekil 2. 5. Deneysel bir çalışmada kullanılan mikrokanal geometrileri

Sui et al. (2010) tarafından mikrokanallarda ısı transferi ve akışkan akışının incelendiği bir diğer sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada dikdörtgen kanal kesit seçilmiş ve sabit ısı akısı sınır şartında mikrokanallardaki akış üç boyutlu olarak incelenmiştir. Simülasyonda üst yüzey adyabatik olarak seçilmiş alt yüzeyinden ise sabit ısı akısı uygulanmıştır. Çalışma neticesinde mikrokanallarda, pürüzlülüğün sonucu olarak ikincil akışkarın (Dean Vorteksleri) oluşacağı ve akış boyunca yönü ve miktarı değişken olan bu ikincil akışların neden olduğu karışım etkisinin taşınım ile ısı transferini büyük oranda arttıracacağı sonucuna varılmıştır. Ek olarak mikrokanallarda istenmeyen durum olan basınç düşümünün ısı transferi atışına kıyasla çok küçük olduğu saptanmıştır.

Chen and Ding (2011) tarafından farklı hacimsel partikül oranlarında hazırlanmış  $Al_2O_3$ -Su nanoakışkanlı mikrokanal ısı değiştiricisinin zorlanmış ısı taşınımı soğutma performansı ve ısı transfer karakteristiği incelenmiştir. Çalışmalarını mikrokanal olarak kullandıkları porous ortam için, kanal duvar sıcaklık dağılımlarını, hacimsel partikül oranları ve atalet kuvveti parametreleri indekslerini esas alarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda atalet kuvvetlerinden dolayı toplam ısıl direnç ve akışkanın sıcaklık dağılımının önemli ölçüde değişim gösterdiği buna karşın kanal duvarlarının sıcaklık dağılımının atalet kuvvetlerinden etkilenmediği ifade edilmiştir.

Hung and Yan (2012) tarafından yapılan çalışmada, iki tabakalı bir mikrokanal ısı değiştiricisinde nanoakışkan kullanımına ek olarak mikrokanal geometrisi üzerinde değişiklikler yapılarak ısı transferi performansı araştırılmıştır. Böylece kanal açıklık oranı (kanal genişliğinin kanal yüksekliğine oranı), kanal sayısı, kanal genişlik oranı ve pompalama gücünün ısı transfer performansına etkisi incelenmiştir.

Mikro/mini kanallarda ısı transferi ve akış karakteristiklerini kapsayan geniş bir literatür yer almaktadır. Salman et al. (2013) tarafından konuyla ilgili olarak sayısal ve deneysel çalışmaların özeti niteleğinde olan Çizelge 2.10 hazırlanmıştır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2. 10. Mini/mikrokanallar için deneysel ve sayısal çalışmalar özet çizelgesi

Araştırma	Çap/Akış Karakteristiği	Reynolds Sayısı	Akışkan	Bulgular
(Wang et al. 2007a)	25 µm / laminer	-	NaCl ve seyreltilmiş gliserin	Mikrokanallarda iki fazlı akışın viskozite problemlerini çözmek için yeni bir yöntem açıklanmıştır.
(Agarwal et al. 2010)	0,424-0,939 mm / laminer	-	R134a	Yatay dairesel olmayan mikrokanallardaki soğutucu R134a'nın yoğunlaşması sırasındaki ısı transferi için bir korelasyon geliştirilmiştir.
(Bavière et al. 2006)	700-200 µm / laminar ve türbülanslı	200-8000	Demineralize su	Mikro ölçekteki laminer akışta Nusselt sayısında bir azalma meydana geldiği bildirilmiştir.
(Wu and Cheng 2003)	L/D = 285,41-451,40 / laminer	0-100	Su	Reynolds sayısındaki artışla birlikte Nusselt sayısının doğrusala yakın bir davranışla arttığı belirlenmiştir.
(Park and Punch 2008)	106-307 µm / laminer	69-800	Deiyonize su	Kullanılan parametrelerin değer aralığında içerisinde konvansiyonel tam gelişmiş akış teorilerinin kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir.
(Quan et al. 2010)	127-173 µm / laminer	240	Su	Mikrokanallarda ısı transfer katsayısının kütle akışı ile arttığı ve hidrolik çapla azaldığı ortaya konmuştur.
(Lee et al. 2005)	194-534 µm	300-3500	Deiyonize Su	Isı transferi katsayısının debiye bağlı olarak kanal boyutundaki azalmayla birlikte arttığı belirlenmiştir.
(Harirchian and Garimella 2008)	100-5850 µm genişlik ve 400 µm derinlik / laminer	-	FC-77	Basınç düşümünün hem kanal boyutu hem de kütle akışına güçlü bir şekilde bağlı olduğu gözlenmiştir.
(Ergu et al. 2009)	3,70 mm genişlik 0,107 mm yükseklik 35mm uzunluk/ laminer	100-845	Saf su	Mikrokanallarda sürtünme katsayısının hesaplanması için klasik laminer akış denklemlerinin kullanılabilceği belirtilmiştir.
(Owhaib et al. 2004)	0,862-1,7 mm / laminer	-	R134a	Daha küçük çaplı kanallarda ısı transferi katsayısının daha yüksek olduğu ve sistem basıncındaki artışın ısı transferi performansını arttırdığı gözlenmiştir.
(Chiu et al. 2011)	W/H=1,67-14,29 / laminer	50-1000	Su	Yüksek en/boy oranına sahip mikrokanallarda ısı transferi iyileştirmesinin daha belirgin olduğu belirtilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Araştırma	Çap/Akış Karakteristiği	Reynolds Sayısı	Akışkan	Bulgular
(Shen et al. 2006)	W=300 µm H=800 µm / laminar	162-1257	Deiyonize su	Nusselt sayısının kesitin en/boy oranı ve yüzey pürüzlülüğü sebebiyle konvansiyonel teoriler ile tahmin edilen değerlerden oldukça düşük olduğu belirlenmiştir.
(Celata et al. 2010)	480 µm / laminar	-	FC-72	Isı transferi katsayısının ısı akısından oldukça bağımsız olduğu belirtilmiştir.
(Megahed 2011)	248 µm / laminar	-	FC-72	Kütle akışının azalmasıyla birlikte kararsızlığın arttığı belirlenmiştir.
(Diaz and Schmidt 2007)	H=0,3 mm W=12,7mm / laminar	-	Su / etanol	Düşük ısı akılarında çaptaki artışla birlikte ısı transferi katsayısının arttığı belirlenmiştir.
(Chen et al. 2009b)	100 - 250 µm / laminar	200-1700	Su	Kanal boyutlarındaki azalmayla birlikte yoğuşma ısı transferi hızının yükseldiği belirtilmiştir.
(Wojtan et al. 2006)	0,5 ve 0,8 mm / laminar	-	R134a ve R245fa	Isı transferi katsayısının akış hızı, ısıtılan uzunluk ve kanal boyutlarına güçlü bir şekilde bağlı olduğu belirlenmiştir.
(Asthana et al. 2011)	100 µm / laminar	-	Su / yağ	Artan ısı transferinin akışkan sıcaklığından güçlü biçimde etkilenen basınç düşüşünü arttırdığı belirlenmiştir.
(Wang and Cheng 2008)	155 µm / laminar	-	Deiyonize su	Tek bir mikrokanal içerisindeki kararlı hal kaynamanın buhar kalitesine bağlı olduğu belirtilmiştir.
(Wu et al. 2010)	90,6 µm / laminar	300-900	Su	Mikrokanal kesit şeklinin yoğuşma akışındaki düzensizlikler üzerinde önemli rol oynadığı belirtilmiştir.
(Zhang et al. 2010)	W=61 µm H=272 µm L=15mm / laminar	-	Deiyonize su	Mikrokanallı ısı değiştiricisinde deneysel basınç düşümü sonuçlarının modelle iyi bir uyum sağladığı gözlenmiştir.
(Kohl et al. 2005)	25-100 µm / laminar ve türbülanslı	-	Su ve hava	Sonuçlar, mikrokanallardaki sürtünme katsayılarının standart boyutlara sahip kanal verilerinden belirlenebileceğini göstermiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Araştırma	Çap/Akış Karakteristiği	Reynolds Sayısı	Akışkan	Bulgular
(Tang et al. 2007)	52-300 $\mu\text{m}$ / laminer	3-6300	Azot ve helyum	Mikrokanallardaki yüzey pürüzlülüklerinin sürtünme katsayısını etkilediği belirtilmiştir.
(Mokrani et al. 2009)	1 ve 100 $\mu\text{m}$ / laminer ve türbülanslı	100-5000	Su	50 ile 500 $\mu\text{m}$ arasındaki kanal yüksekliğine sahip mikrokanallarda, konvansiyonel kanun ve kolerasyonların doğrudan uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.
(Bertsch et al. 2009)	1,09 ve 0,54 mm	-	R134a ve R245fa	Tek fazlı akışta R134a ile kıyaslandığında R245fa akışkanının ısı transfer katsayısının daha yüksek olduğu belirtilmiştir.
(Ngo et al. 2007)	1,09 mm / laminer	250-2500	CO <sub>2</sub>	S şekilli kanatlara sahip mikrokanallı ısı değiştiricilerin basınç düşüm katsayısının zikzak şekilli kanatları olanlardan 4-5 kat daha az olduğu belirlenmiştir.
(Fang et al. 2010)	100-300 $\mu\text{m}$ / laminer	-	Su	Küçük kanalların yüksek ortalama ısı akısına sahip olmaları sebebiyle daha elverişli olduğu belirtilmiştir.
(Bogojevic et al. 2011)	194 $\mu\text{m}$ / laminer	82	Su	Kaynama başlangıcının metastabil homojen olmayan akış dağılımına sebep olduğu gözlenmiştir.
(García-Hernando et al. 2009)	100-200 $\mu\text{m}$ / laminer	10-5000	Deiyonize su	Plaka ısı iletim direncinin mikrokanallı ısı değiştirici performansı için büyük bir kısıt olduğu ve plaka kalınlığı ve plaka malzemesinin mikrokanallı ısı değiştirici tasarımında önemli olduğu belirtilmiştir.
(Wu et al. 2011)	L/D=50-150 / laminer	-	R134a, R123, R245fa, R236fa, Azot ve su	Su verilerinin %94'ü ve su harici verilerin %97'sini %30 hata oranı içinde tahmin eden bir metot öne sürülmüştür.
(Mlcak et al. 2008)	85,6 $\mu\text{m}$ / laminer	50-400	Su	Hidrolik giriş uzunluğu arttıkça sürtünme katsayısında doğrusal bir artış meydana geldiği belirtilmiştir.
(Chen et al. 2009c)	40-158 $\mu\text{m}$ / laminer	30-500	Deiyonize su	Üçgen kesitli mikrokanallı ısı değiştiricinin en yüksek ısı transfer performansı gösteren ısı değiştirici olduğu ve trapez kesitli ısı değiştiricinin üçgen kesitliden düşük fakat dikdörtgen kesitliden yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir.

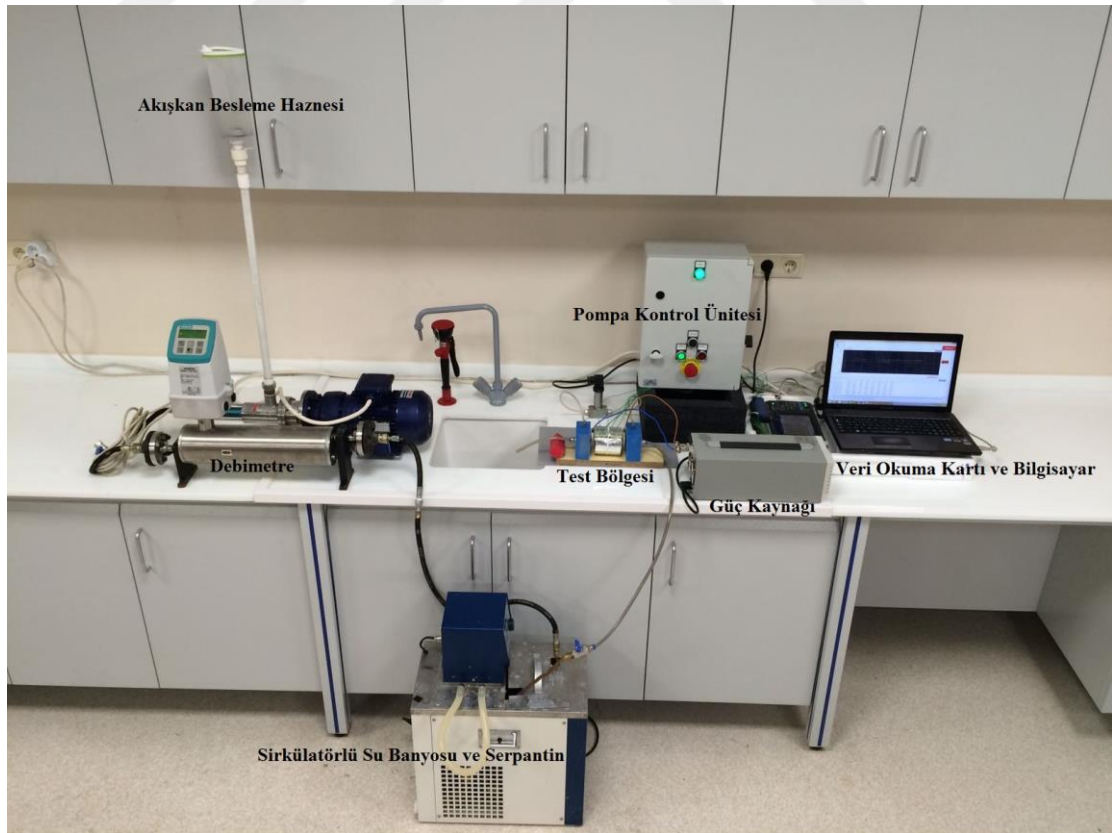
## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Araştırma	Çap/Akış Karakteristiği	Reynolds Sayısı	Akışkan	Bulgular
(Zhu and Liao 2006)	- / laminer	-	Gaz	Dikdörtgen ve üçgen kesitli mikrokanallardaki ortalama Nusselt sayısının aynı ısı sınır şartlarına sahip makrokanallardakinden daha düşük olduğu belirtilmiştir.
(Ji et al. 2006)	L=1-100 $\mu\text{m}$ / laminer	0.001-100	Gaz	Ortalama Poiseuille sayısının yalnızca pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla değil aynı zamanda pürüzlülük elemanları arasındaki mesafenin azalmasıyla da arttığı belirtilmiştir.
(Sui et al. 2010)	$1,5 \times 10^{-4}$ m	100-800	Su	Dalgalı mikrokanalların ısı transferi performansının akıştaki vortekslerin artmasının akışın daha iyi karışmasını sağlaması sebebiyle düz mikrokanallarinkinden daha iyi olduğu belirtilmiştir.
(Rahman et al. 2010)	H=300 $\mu\text{m}$ W=100-250 $\mu\text{m}$	1000-3000	FC-72, helyum ve su	Yüksek Nusselt sayılarında FC-72 ve Helyum ile kıyaslandığında suyun daha iyi ısı performans sağladığı belirtilmiştir.
(Niazmand et al. 2008)	W/H=0,25-2 / laminer	0,1-10	Gaz	Sıcaklık sıçramaları ve yüksek kayma hızlarından dolayı giriş bölgesinde ısı transferi ve sürtünme katsayısında büyük düşüşler gözlemlendiği belirtilmiştir.
(Koşar 2010)	H=200 $\mu\text{m}$ W=200 $\mu\text{m}$ / laminer	50-2000	Su	Nusselt sayısının düşük ısı iletkenlik için daha düşük yüksek ısı iletkenlik için daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Yapılan literatür taraması sonucunda karma taşınım koşullarında deneysel verilerin elde edilmesi ve karşılaştırılmasındaki güçlüklerden dolayı bu konudaki deneysel çalışma sayısının oldukça az olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın amacı minikanalarda nanoakışkan kullanarak karma taşınım ile ısı transferi performansını incelemek ve minikanalarda karma taşınım literatürüne katkı sağlamaktır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, içerisinde farklı hacimsel partikül oranlarda nanoakışkan geçen dairesel kesitli mini kanallarda karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler 1,21 mm, 1,5 mm ve 1,9 mm çapa sahip dairesel kesitli mini kanal ve hacimsel partikül oranları %0,25, %0,75 ve %1,25 olan saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkan ile gerçekleştirilmiştir. Farklı hacimsel partikül oranlarındaki SiO<sub>2</sub>-Su nanoakışkanın sentezlenmesinde iki adım yöntemi kullanılmıştır. Kuru toz halinde satın alınan nanopartiküllerle istenilen hacimsel partikül oranlarında nanoakışkan sentezleyebilmek için hesaplama yapılarak belirlenen nanopartikül kütlesi saf su içerisine süspansiyon edilmiştir. Elde edilen süspansiyonların ultrasonik homojenizatörde belli sürelerde bekletilmesiyle nanoakışkanlar hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan nanoakışkanların farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik ve viskozite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği deney düzeneğinin resmi Şekil 3.1’de verilmiştir. Deney düzeneği test bölgesi, akışkan sirkülasyon ünitesi ve veri toplama ünitesinden oluşmaktadır.



Şekil 3. 1. Mini kanal deney düzeneği



Düzenekte iş akışkanı akışkan besleme haznesine doldurulmaktadır. Akışkan buradan pozitif yer değiştirmeli ve granüler akışlara uygun kendinden inventörlü pompa ile debimetreye gönderilmektedir. Debi ölçümü gerçekleştirildikten sonra akışkan, deney için belirlenen giriş sıcaklığı değerine ayarlanmış su banyosu içerisindeki serpantine devamında ise test bölgesine gönderilmektedir. Sisteme uygulanan sabit ısı akısı güç kaynağı ile minikanala doğrudan gerilim uygulanarak elde edilmektedir. Test bölgesinde veri okuma kartına bağlı ısı çiftleriyle giriş, çıkış ve yüzey sıcaklıkları ölçülerek eş zamanlı olarak bilgisayara kaydedilmektedir.

Deneyler minikanal çapı ve hacimsel partikül oranı yüzdesi değişiminin karma taşınım ile ısı transferi karakteristiklerine etkisini gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçekleştirilirken Reynolds sayısı karma taşınım ile ısı transferi gerçekleştirilebilmesi için 15–65 aralığında tutulmuştur.

Test bölgesine mini kanallar çapa göre küçükten büyüğe doğru sırasıyla bağlanarak önce saf suyla sonrasında farklı hacimsel partikül oranlarında hazırlanan SiO<sub>2</sub>–Su süspansiyonlarıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Sisteme güç verilmeden önce su banyosu deney için belirlenen giriş sıcaklığı değerine ayarlanır ve iş akışkanı akışkan besleme tankına doldurulur. Pompa çalıştırılarak istenilen debi değeri kütleli debi metre ekranından kontrol edilir. İstenilen debi değerine ulaşıldığında sisteme güç kaynağı aracılığıyla ısı enerjisi verilir. Veri okuma kartıyla elde edilen sıcaklık değerleri takip edilerek sistemin kararlı hale gelmesi beklenir ve kararlı hale ulaşıldığında veriler kaydedilir. Aynı işlemler diğer debi değerleri için tekrarlanır.

#### **3.1. Deneysel Materyaller**

Deney sisteminde ve nanoakışkan hazırlanmasında kullanılan materyaller bu bölüm içerisinde detaylı bir biçimde verilmiştir. Ayrıca bölüm sonunda nanoakışkan hazırlanması ve ısı transferi hesaplamaları ayrıntılı biçimde verilmiştir.

#### 3.1.1. Hassas terazi

İstenilen hacimsel partikül oranlarında nanoakışkan hazırlamak için kullanılacak partiküllerin kütlesinin hassas bir şekilde tartılması gereklidir. Bu işlemi gerçekleştirmek için Şekil 3.2’de gösterilen AXIS marka 400 g kapasiteli ve 0,0001g hassasiyetli hassas terazi kullanılmıştır. Ölçüm sırasında dışardan gelebilecek etkilerden korunmak için yan ve üst yüzeyleri kapatılabilmektedir. Böylece çok doğru ve hassas ölçüm değerlerine ulaşılabilmektedir.



Şekil 3. 2. Hassas terazi

#### 3.1.2. Ultrasonik homojenizatör

Nanopartiküllerin temel akışkana ilavesi esnasında topaklanma ve çökelme gibi olumsuz etkileri ortadan kaldırmak ve kararlı yapıda nanoakışkan hazırlamak için Şekil 3.3’te gösterilen Hielscher marka UP400S model ultrasonik homojenizatör kullanılmıştır. Cihaz 400W güç ve 24 kHz çalışma frekansına sahiptir. Ayrıca denge ve ses yalıtımı kabini mevcuttur. Nanoakışkan hazırlanırken sıcaklık artışının önüne geçmek için sisteme entegre bir soğutma hattından faydalanılmıştır.



Şekil 3. 3. Ultrasonik homojenizatör

#### 3.1.3. Viskozimetre

Hazırlanan nanoakışkanların dinamik viskozite değerlerini belirlemek için Şekil 3.4'te gösterilen A&D Marka SV-10 model vibro viskozimetreden faydalanılmıştır. Çalışma prensibi iki adet ince sensör plaka numune içerisine daldırılması ve numune içerisinde sabit bir frekansta hareket ettirilmesiyle açıklanabilir. Hareketi sağlamak için gerekli olan enerji numunenin viskozitesi ile orantılı bir değişime sahiptir. Bu orantı yardımıyla cihaz viskozite sonuçlarını gösterir. Ölçüm sonrası elde edilen viskozite değerleri bilgisayara kaydedilmektedir. Viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimini gözlemleyebilmek için farklı sıcaklıklarda ölçümler alınmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunu sağlamak için WiseCirsu marka bir su banyosunun sisteme ilave edilmesiyle numune kabı istenilen sıcaklığa ayarlanabilmiştir.



Şekil 3. 4. Viskozimetre

#### 3.1.4. Isıl iletkenlik ölçer

Hazırlanan nanoakışkanların ısı iletkenlik değerleri Şekil 3.5’te gösterilen Linseis marka THB-100 model ısı iletkenlik ölçer kullanılmıştır. Ölçümler cihazda yer alan probun numuneye daldırılması ve bekletilmesi ile gerçekleşmektedir. Ölçüm sonrası elde edilen ısı iletkenlik değerleri bilgisayara kaydedilmektedir. Detayları Hammerschmidt and Meier (2006) tarafından verilmiş olan geçici ısı köprüler (transient hot bridge) yöntemine dayalı bir çalışma prensibine sahiptir. Modüler yapıda olan Linseis Transient Hot Bridge modeli numunenin ısı iletkenliğinin yanı sıra ısı yayılım, ısı kapasitesi değerlerini de ölçme imkânı sunmaktadır. Geniş ölçüm ve sıcaklık aralığına sahip olan cihaz efektif ve hızlı ölçüm sağlamaktadır. Ölçümler viskozimetrede sisteme ilave edilen su banyosundan faydalanılarak numune kabının istenilen sıcaklıklara ayarlanmasıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 5. Isıl iletkenlik ölçer

#### 3.1.5. Pompa

Deneyle yapılrken akışın sürekliliğini sağlamak için şekil 3.6’da gösterilen pozitif yer değiştirmeli ve frekans kontrollü pompadan yararlanılmıştır. Bu pompayla sisteme atımsız ve sürekli akış sağlanmaktadır. Ayrıca nanoakışkan stabilitesine zarar vermeyeceği için literatürde kullanılan dişli pompalardan daha etkili olacağı düşünölmektedir. Akış debisi pompa kontrol ünitesi üzerindeki frekans kontrolü yardımıyla manuel olarak ayarlanabilmektedir. Böylece değişken hızlı kullanım imkânı sunmaktadır ve maksimum 12 barlık çalışma basıncına sahiptir.



Şekil 3. 6. Pompa

#### 3.1.6. Akışkan besleme haznesi

Sistemde sirkülasyonu sağlanan iş akışkanın yüklendiği haznedir. 0,75 litrelik bir hacme sahiptir. Hazneye yüklenen iş akışkanı pompa vasıtasıyla sistemde dolaştırılır. Haznenin resmi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3. 7. Akışkan besleme haznesi

#### 3.1.7. Debimetre

Akışkan debisini ölçmek için şekil 3.8’de gösterilen Siemens marka Strans FC-MASS6000 model kütleli debimetreden faydalanılmıştır. Debimetre içerisinde dönel eleman bulunmadığı için partikül birikmesi gibi olumsuz etkilerden kaçınılabilmektedir. Geniş ölçüm aralığı sayesinde düşük kütleli debi değerleri ölçülebilmektedir. Ölçüm sırasında debi değerleri hem debimetre üzerindeki dijital ekrandan hem de bilgisayardan okunulabilmektedir.



Şekil 3. 8. Debitre

#### 3.1.8. Serpantin ve sirkülatörlü su banyosu

Sistemde deneyler yapılırken test bölgesi girişinde akışkanın belirli sıcaklıkta olması amaçlanmaktadır. Sabit giriş sıcaklığı akışkanın test bölgesine girmeden önce su banyosu içerisindeki serpantinden geçirilmesiyle sağlanılmaktadır. İstenilen giriş sıcaklığını elde etmek için Şekil 3.9’da gösterilen wisecircu marka, ısıtma ve soğutma yapabilen, zaman ayarlı sirkülatörlü su banyosu ve 2 m uzunluk ve 10 mm dış çapında bakır borudan imal edilen serpantin kullanılmıştır.



Şekil 3. 9. Serpantin ve sirkülatörlü su banyosu

#### 3.1.9. Güç kaynağı

Farklı çaptaki mini kanallara sabit ısı akısı Şekil 3.10'de verilen GW INSTEK markas PSW 30-72 model tek çıkışa sahip güç kaynağı ile sağlanmıştır. Güç kaynağı 0-30 V gerilim ve 0-72 A akım aralığına sahiptir ve manuel kontrol imkânı sunmaktadır.



Şekil 3. 10. Güç kaynağı

#### 3.1.11. Veri okuma kartı

Test bölgesi üzerinde farklı noktalarda K tipi ısı çiftleri vasıtası ile sıcaklık ölçümleri alınması için Şekil 3.11'de gösterilen Hioki marka LR8402-20 model veri okuma kartı kullanılmıştır. Veri okuma kartından elde edilen veriler bilgisayar yazılımı ile anlık olarak kaydedilmektedir. 30 analog kanala sahip okuma kartı K, J, E, T, N, R, S, B, W tipi ısı çiftleri otomatik tanıma özelliğine sahiptir. 2 telli giriş sayesinde ısı çiftleri jack olmadan bağlama imkânı sağlamaktadır.  $\pm 100$  V DC gerilim değerleri arasında çalışabilmektedir. Minimum ve maksimum çalışma aralığındaki gerilim değerleri bilinen analog çıkışlı sensörlerle nem, basınç gibi büyüklüklerin ölçümü alınabilmektedir.



Şekil 3. 11. Veri okuma kartı

#### 3.1.12. Isıl çiftler

Akışkanın test bölgesine giriş, çıkış ve kanal dış yüzey sıcaklık ölçümleri Şekil 3.12’de gösterilen -150 ile +1100°C normal çalışma sıcaklığına sahip iç çapı 0,20 mm ve metal cinsleri nikel krom ve alaşımlı nikel olan K tipi ısıl çiftler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıl çiftler kanal üzerinde oluşması muhtemel olan elektrik alandan etkilenmemeleri için uçları birleştirilip oksijen kaynağı ile noktasal hale getirildikten sonra metalik boya ile kaplanmıştır.



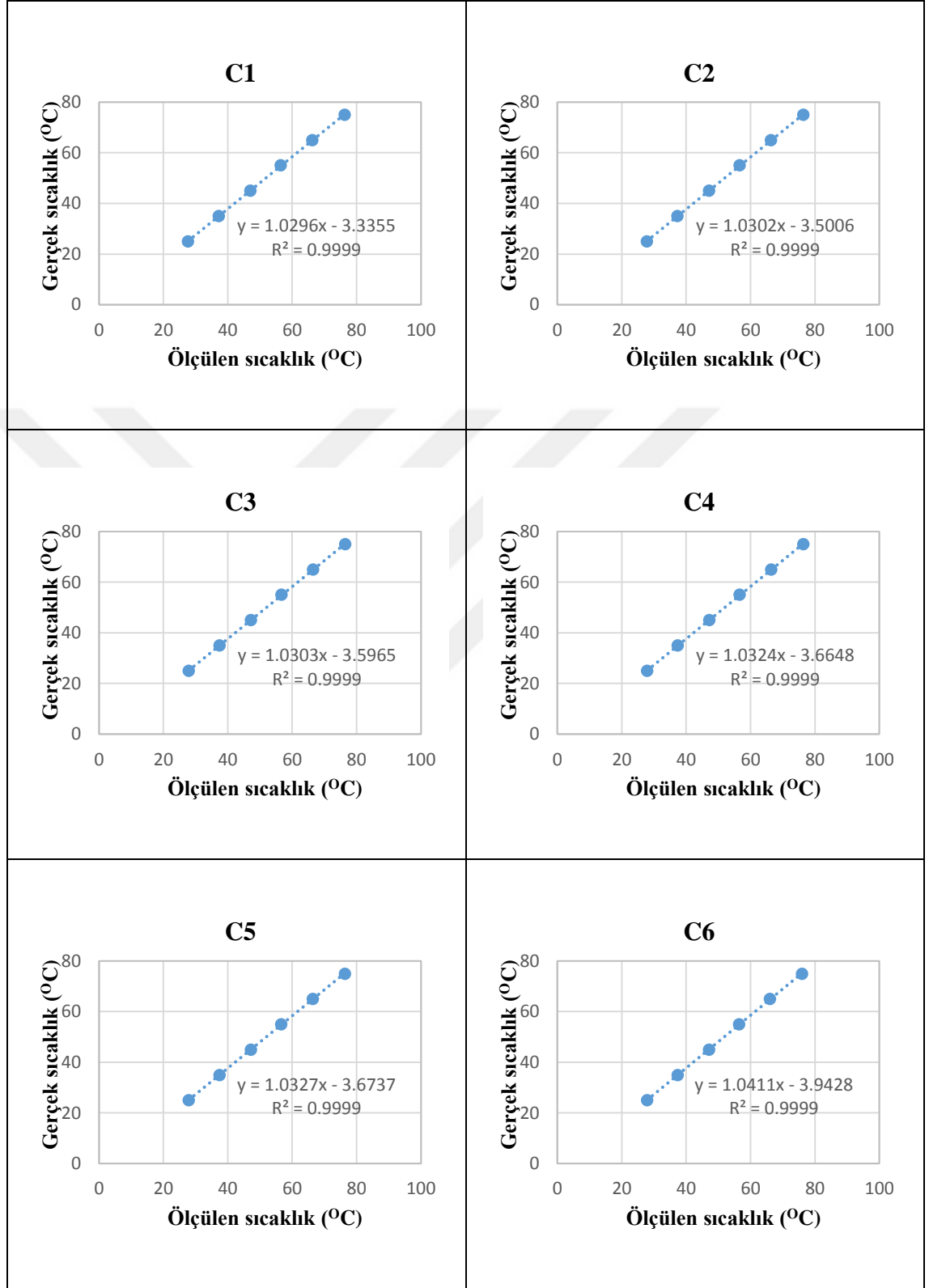
Şekil 3. 12. K tipi ısıl çift

Sonrasında test bölgesine bağlanmadan önce sirkülatörlü su banyosu içerisinde 25-75°C sıcaklık aralığında 10°C artımlarla sıcaklık ölçümleri alınarak kalibre edilmiştir. Her bir ısıl çiftin kalibrasyon eğrisi ve denklemi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

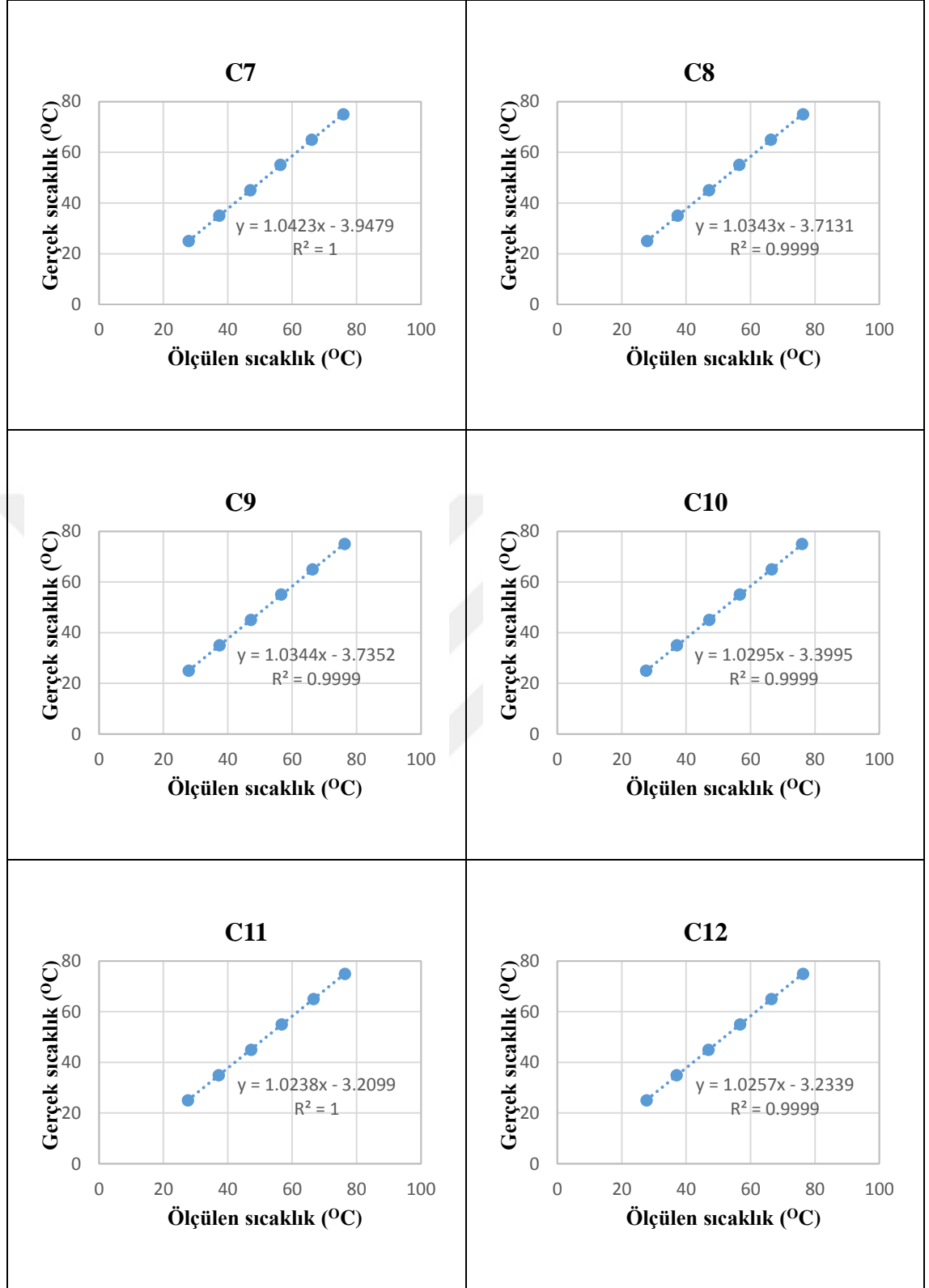
Test bölgesinden sıcaklık okuma işlemi sistem kararlı hale geldikten sonra her 0,2 saniyede tekrarlanmak üzere 60 saniye boyunca veri alınması şeklinde gerçekleştirilmiş ve okunan sıcaklık verilerinin ortalaması alınarak bilgisayara kaydedilmiştir. Sonrasında bu ortalamalar kalibrasyon denklemlerine yazılmış ve giriş, çıkış ve yüzey sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır.



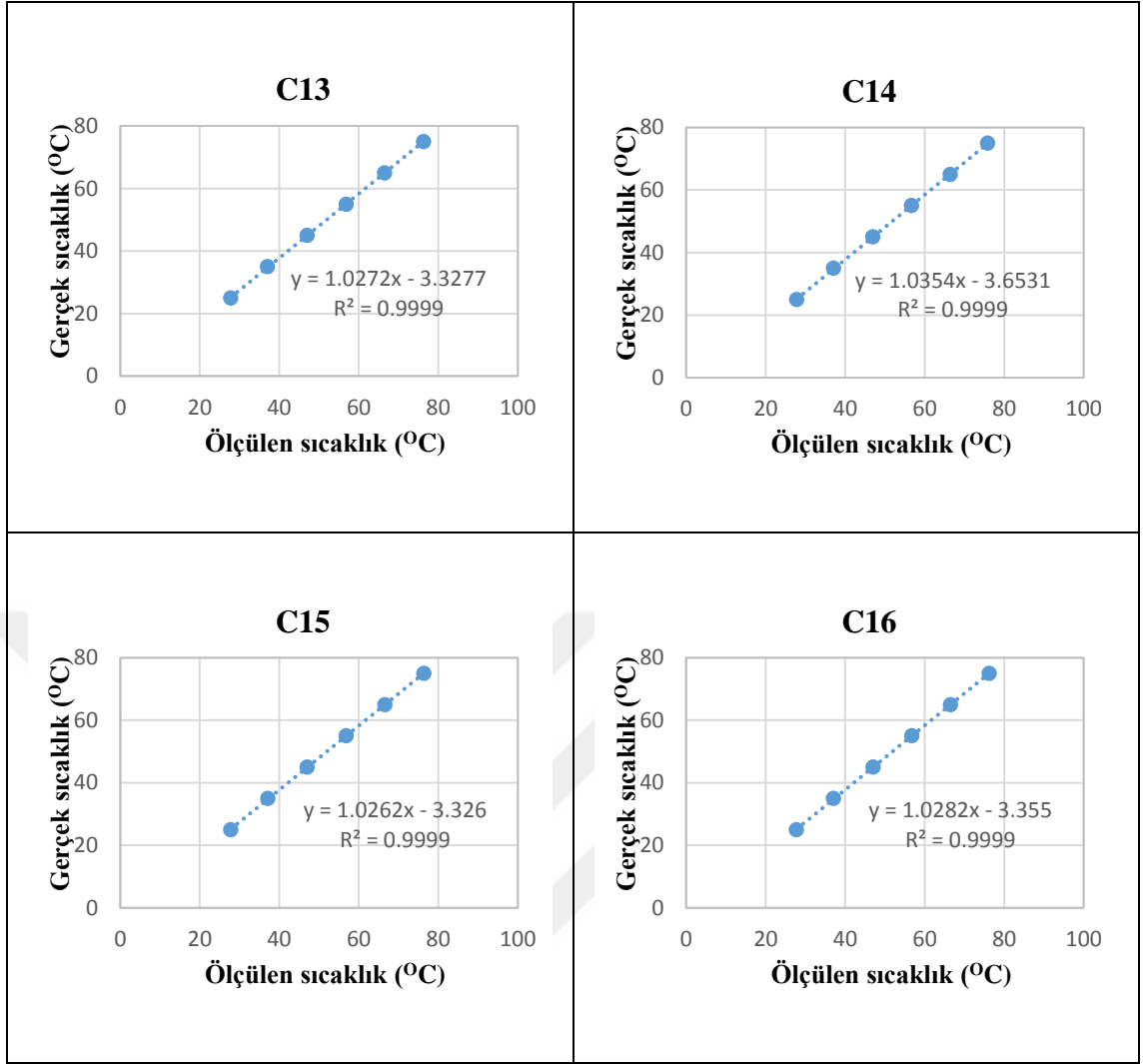
Çizelge 3. 1. Isıl çiftlere ait kalibrasyon eğrileri ve denklemleri



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

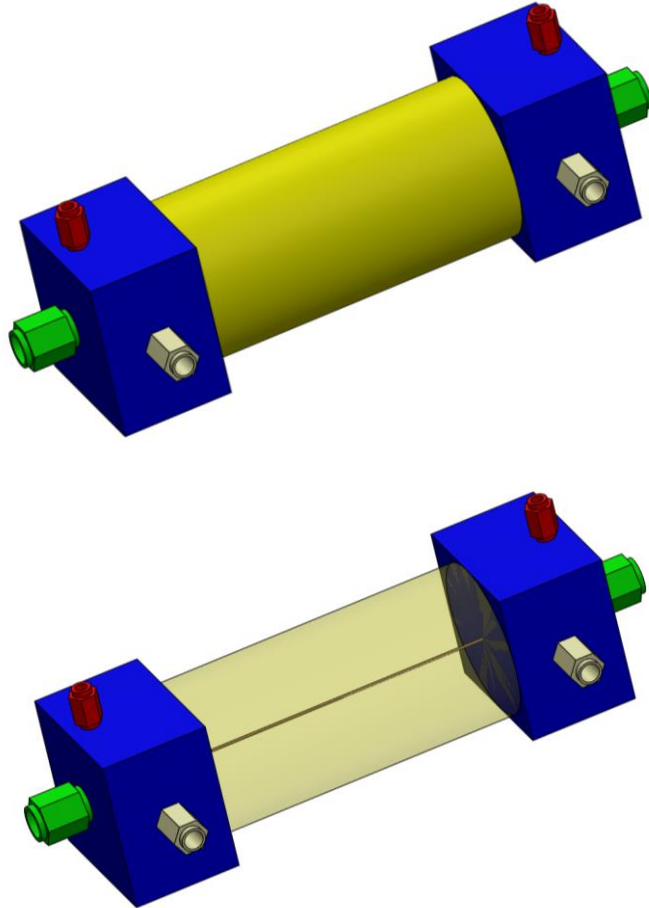


### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

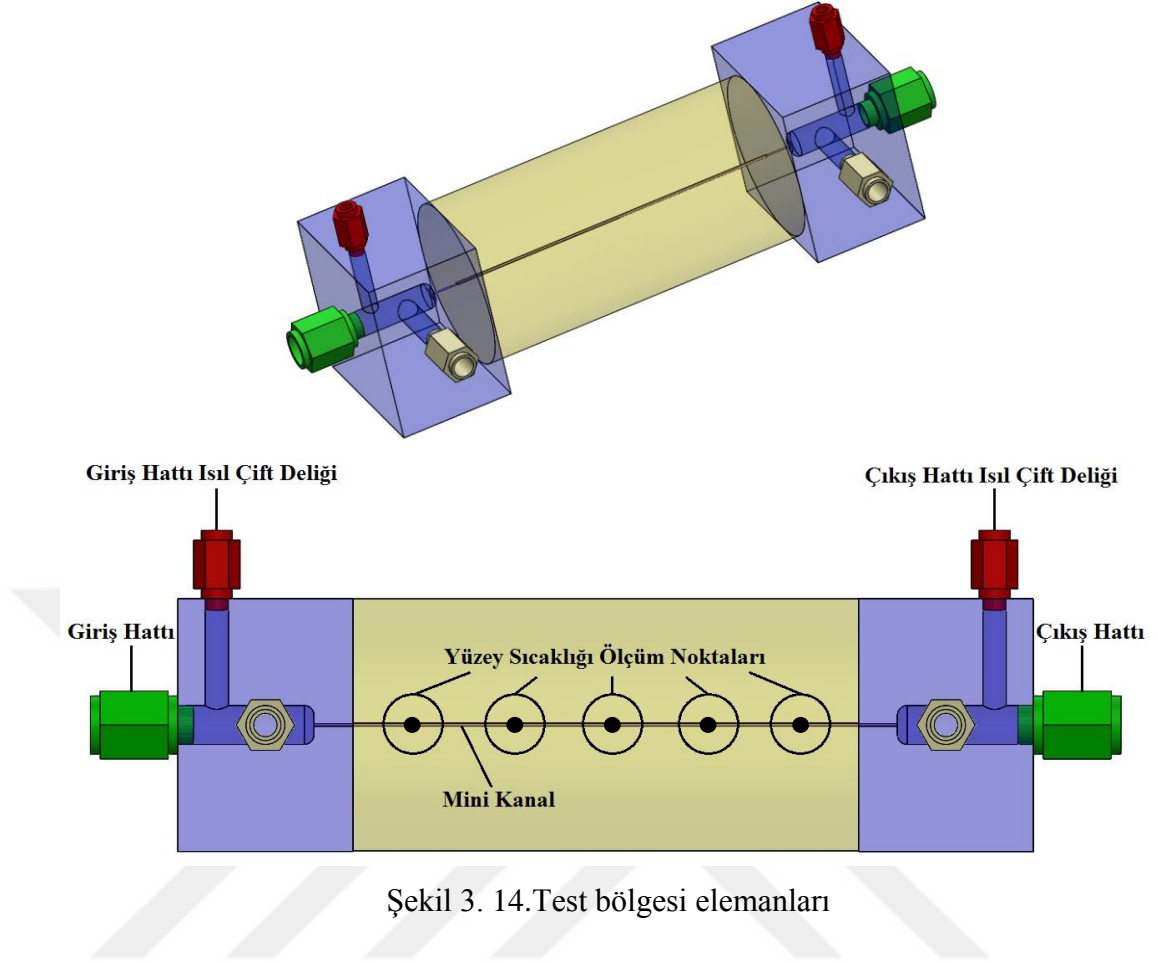


#### 3.2. Test Bölgesi

Test bölgesi polietilen bloklar arasına sırasıyla 10 cm uzunluğundaki 1,21 mm, 1,5 mm ve 1,91 mm iç çapa sahip mini boruların yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Polietilen bloklar üzerinde 8 mm çapında hidrolik bağlantı içeren giriş-çıkış hatları ve 6 mm hidrolik bağlantı içeren fark basınç portları mevcuttur. Mini kanal giriş ve çıkış sıcaklıkları blokların üst yüzeylerinden kanal giriş ve çıkış haznelerininin orta noktasına indirilen 2 adet ısıl çiftle ölçülmektedir. Kanal dış yüzeyine uygulanan sabit ısı akısı güç kaynağı ile sağlanmıştır. Kanal üzerine yerleştirilen 5 ısıl çift aracılığıyla 5 farklı noktadan yüzey sıcaklık ölçümü alınmaktadır. Bloklar arasında ve mini kanalın etrafında oluşabilecek ısı kaybını engellemek için termal yalıtım köpüğünden faydalanılmıştır. Test bölgesi ile ilgili şematikler Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3. 13. Test bölgesi şematığı



Şekil 3. 14. Test bölgesi elemanları

### 3.3. Hesaplamalar ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

#### 3.3.1. Nanoakışkan hazırlanması ile ilgili hesaplamalar

İki adım yöntemi kullanılarak hazırlanan 3 farklı hacimsel partikül oranındaki (%0,25, %0,75 ve %1,25) nanoakışkan için partikül kütlesi hesabıyla ilgili eşitlikler aşağıda yer almaktadır. Deneysel için %0,25, %0,75 ve %1,25 olarak belirlenen hacimsel partikül oranı yüzdeleri ve nanopartikül ile temel akışkan yoğunluğu bilindiği için nanoakışkan yoğunluğu Eşitlik 3.1’de yer alan eşitlikten faydalanılarak bulunur. Eşitlikte yer alan  $\phi$  hacimsel partikül oranını ifade etmektedir.

$$\phi = \frac{\rho_{nf} - \rho_b}{\rho_p - \rho_b} \quad (3.1)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Eşitlik 3.1 yardımıyla bulunan nanoakışkan yoğunluğu  $\rho_{nf}$  ve hazırlanmak istenilen nanoakışkan hacmi Eşitlik 3.2’de yerine yazılarak nanoakışkan kütlesi  $m_{nf}$  bulunur.

$$\rho_{nf} = \frac{m_{nf}}{V_{nf}} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.3’te yer alan  $c_m$  olarak ifade edilen nanoakışkan kütle oranı eşitliğinde partikül kütlesi  $m_p$  haricindeki değerler bilindiği için bu değerler yerine yazılarak partikül kütlesi  $m_p$  bulunur.

$$c_m = \frac{m_p}{m_{nf}} = \phi \frac{\rho_p}{\rho_{nf}} \quad (3.3)$$

Temel akışkanın kütlesi ve hacmi ise Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5’ten faydalanılarak hesaplanır.

$$m_b = m_{nf} - m_p \quad (3.4)$$

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_b} \quad (3.5)$$

Ayrıca nanoakışkanın ısı kapasitesini belirlemek için Eşitlik 3.6’da verilen ifade kullanılmıştır.

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_b + \phi(\rho c_p)_p \quad (3.6)$$

#### 3.3.2. Isı transferi hesaplamaları

Deney sisteminde test bölgesine güç kaynağı vasıtasıyla verilen toplam ısı enerjisinin tamamının taşınım mekanizması ile test bölgesinden transfer edildiği varsayılır. Bu varsayımla kayıplar ihmal edilerek Eşitlik 3.7 yazılabilir.

$$\dot{Q}_{\text{güçkaynağı}} = \dot{Q}_{\text{taşınım}} \quad (3.7)$$

Burada güç kaynağından sisteme aktarılan güç, güç kaynağı üzerinde okunan akım ve gerilimin değerlerinin çarpımına eşittir. Eşitlikte taşınım ile ısı transferinin açık şeklinin de yerine yazılması ile Eşitlik 3.8 ortaya çıkar.

$$VI = hA[T_s - T_{\text{ort}}] \quad (3.8)$$

Ortalama ısı taşınım katsayısı Eşitlik 3.9 ile hesaplanır.

$$h = \frac{VI}{A_s(T_s - (T_g + T_c)/2)} \quad (3.9)$$

Elde edilen deneysel ortalama taşınım katsayısının Eşitlik 3.10'daki ifadede kullanılmasıyla Nusselt sayısı bulunur.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.10)$$

Ayrıca U ortalama akışkan hızının Eşitlik 3.11'deki ifadede kullanılmasıyla Reynolds sayısı bulunmuştur.

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} \quad (3.11)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Akışkan üzerine etkiyen kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranı olarak tanımlanan Grashof sayısı ise Eşitlik 3.12’de verilen ifadeden faydalanılarak bulunur.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - (T_{fg} + T_{\check{c}})/2)D^3}{\nu^2} \quad (3.12)$$

Akış karakteristikleri için bir diğer önemli boyutsuz sayı olan Greatz sayısı ise Eşitlik 3.13’te verilen ifadeden faydalanılarak bulunur.

$$Gz = \frac{\pi}{4} RePr \frac{D}{L} \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.14’de verilen Rayleigh sayısı, kaldırma kuvvetleri ve viskoz kuvvetler arasındaki ilişkiyi tanımlayan Grashof sayısı ile viskoz yayılım ve termal yayılım arasındaki ilişkiyi ifade eden Prandtl sayısının çarpılmasıyla bulunur.

$$Ra = GrPr \quad (3.14)$$

Richardson sayısı kaldırma kuvvetlerinin, atalet kuvvetlerine oranı olarak tanımlanır ve Eşitlik 3.15’ten faydalanılarak bulunur.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (3.15)$$

Karma taşınım ile ısı transferi gerçekleştiği durumda Nusselt sayısı Eşitlik 3.16’da gösterildiği gibi zorlanmış ve doğal taşınım kaynaklı ısı transferinin toplanmasıyla bulunur.

$$Nu = Nu_{zorlanmış} + Nu_{doğal} \quad (3.16)$$



Literatürde karma taşınım verileri değerlendirilirken genellikle kullanılan benzer denklemlerin genel hali Eşitlik 3.17’de gösterilmiştir. İfadede yer alan ‘a’ bir sabittir ve üniform ısı akısı sınır şartında değerinin 2,11 alınması tavsiye edilmiştir.  $\phi$  ise karma taşınım içerisinde doğal taşınım etkilerini ifade eden bir parametre olarak ifade edilir (Li and Feng 2013).

$$\left( \text{Nu} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0,14} \right)^3 = \left( a \times \text{Gz}^{1/3} \right)_{\text{zorlanmış}}^3 + \left( a \times \Phi^{1/3} \right)_{\text{doğal}}^3 \quad (3.17)$$

$\phi$  sayısı Pr ve Gr sayılarının fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Doğal taşınım ile zorlanmış taşınım etkilerinin karşılaştırılmasında Eşitlik 3.17 verilen ifadeler kullanılmıştır.

#### 3.3.3. Belirsizlik analizi

Deneysel verilerin doğru değerlendirilmesi açısından bu bulguların belirsizlik analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu hususta literatürde sıkça kullanılan bir yöntem olan Kline ve McKlintock (1953) yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntemde R büyüklüğü,  $x_1, x_2, x_3$  gibi n adet bağımsız değişkenlere bağlı bir büyüklük olsun yani  $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ . Bu bağımsız değişkene ait hata oranları ise  $w_1, w_2, w_3, w_n$  olarak tanımlansın bu halde hata oranı  $w_R$  aşağıdaki gibi tanımlanır (Eşitlik 3.18).

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.19’da verilen ifadeden faydalanılarak deneysel bulgular ve tartışma kısmında konu edilecek bazı büyüklüklerin hata oranları aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir. Bu büyüklükler sırası ile Reynolds sayısı (Eşitlik 3.19), Nusselt sayısı (Eşitlik 3.20) ve Grashof sayısıdır (Eşitlik 3.21).

$$\frac{w_{Re}}{Re} = \left[ \left( \frac{w_{\dot{m}}}{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{w_D}{D} \right)^2 + \left( \frac{w_{\mu}}{\mu} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \left[ \left( \frac{w_v}{V} \right)^2 + \left( \frac{w_D}{D} \right)^2 + \left( \frac{w_I}{I} \right)^2 + \left( \frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + \left( \frac{w_k}{k} \right)^2 + \left( \frac{w_A}{A} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

$$\frac{w_{Gr}}{Gr} = \left[ \left( \frac{w_{\rho}}{\rho} \right)^2 + 9 \left( \frac{w_D}{D} \right)^2 + \left( \frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + 4 \left( \frac{w_v}{v} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

Verilen eşitliklerden de görüleceği üzere belirsizliği hesaplanacak olan büyüklüklere farklı parametreler farklı oranlarda etki etmektedir. Örneğin Reynolds sayısı için kütleli debi, kanal çapı ve dinamik viskozite değerleri aynı oranda etkili iken, Grashof sayısında en büyük etki kanal çapı parametresinden gelmiştir. Eşitliklerdeki parametrelerin belirsizlik değerleri ilgili kataloglardan temin edilerek yerine yazıldığında aşağıdaki çizelgede verilen belirsizlik değerleri elde edilmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3. 2. Belirsizlik analizi sonuçları

	Re	Nu	Gr
%	1,69	2,78	2

#### 3.4. Nanoakışkanların Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Deneylerin farklı hacimsel oranlarda iki adım yöntemiyle hazırlanan saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanları ile gerçekleştirildiği daha önce belirtilmişti. %0,25, %0,75 ve %1,25 olarak belirlenen hacimsel partikül oranlarına sahip nanoakışkanları hazırlamak için gerekli temel akışkan ve partikül miktarları Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3. 3. Hazırlanan nanoakışkanlar için gerekli partikül ve temel akışkan miktarları (1000 mL nanoakışkan için)

Hacimsel Partikül Oranı	Nanoakışkan Hacmi [mL]	Nanoakışkan Kütlesi [g]	Kütleli Oran	SiO <sub>2</sub> Kütlesi [g]	Saf Su Kütlesi [g]	Saf Su Hacmi [mL]
0,0025	1000	1001,2856	0,0059	6	995,2856	997,5
0,0075	1000	1008,2967	0,0179	18	990,2967	992,5
0,0125	1000	1015,3078	0,0295	30	985,3078	987,5

Partiküller Sigma-Aldrich firmasından satın alınmıştır ve Çizelge 3.4'te nanopartiküllere ait bazı özellikler gösterilmiştir.

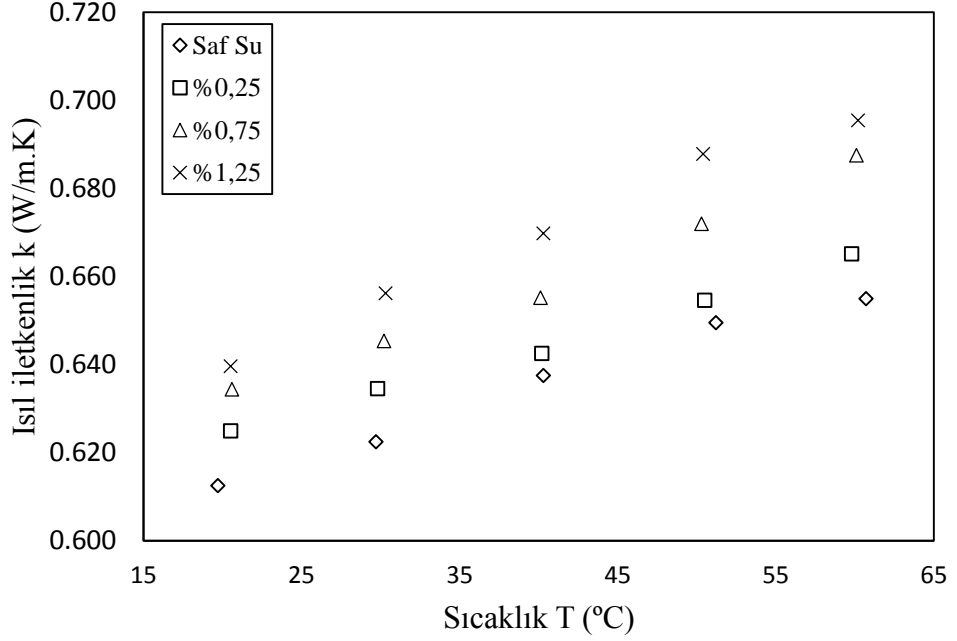
Çizelge 3. 4. SiO<sub>2</sub> nanopartikül özellikleri

Adı	Silikon Dioksit
Moleküler Formülü	SiO <sub>2</sub>
Moleküler Ağırlığı	60,08 g/mol
Bulk Yoğunluğu	0,011 g/mL
Yoğunluğu	2.2-2,6 g/mL (25°C'de)
Partikül Boyutu	10-20 nm
Renk	Beyaz
Saflık	%99,5
Kaynama Noktası	2230°C
Ergime Noktası	> 1600°C

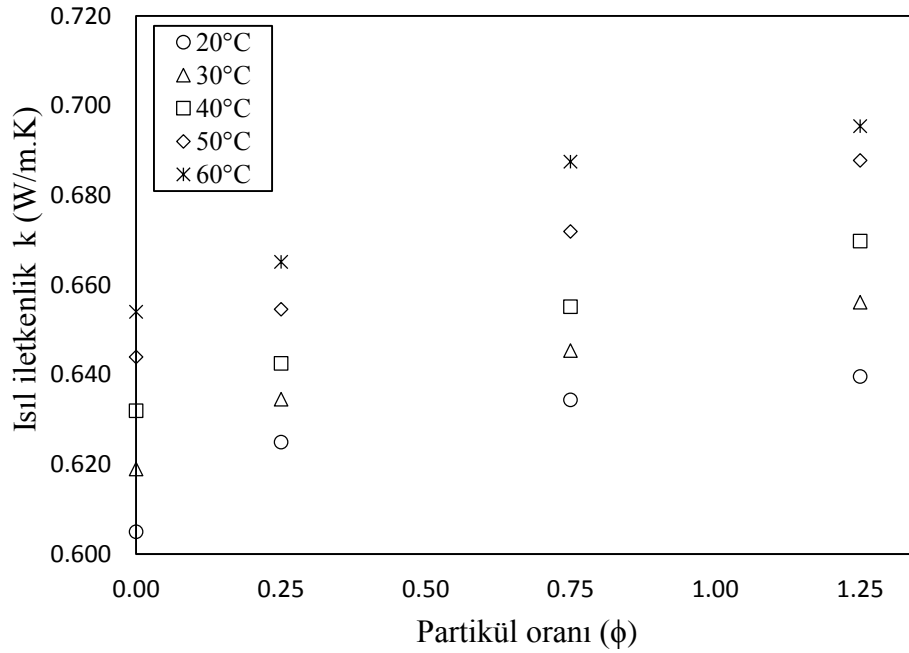
İstenilen hacimsel oranlarda nanoakışkan hazırlamak için gerekli olan temel akışkan ve partikül miktarları belirlenmiş ve hassas terazi ile ölçülmüştür. Belirlenen miktarlardaki temel akışkan saf su ve nanopartiküller boş bir kaba boşaltılmış ve mekanik olarak karıştırılmıştır. Sonrasında elde edilen karışım ultrasonik homojenizatör içerisine alınarak 10 saat süreyle homojenleştirme işlemi uygulanmıştır. Her bir hacimsel oran için aynı işlemler tekrar edilmiştir. Elde edilen nanoakışkanlarda çökeltme, topaklanma vb. gibi bir stabilizasyon problemine rastlanmamıştır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Saf su ve saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanlarının ısı iletkenlik ölçümleri için Linseis marka THB-100 model ısı iletkenlik ölçerden faydalanılmıştır. Geçici Isı Köprü (Tansient Hot Bridge) tekniği ile ölçüm yapan cihazdan elde edilen değerler Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 14. Farklı akışkanlar için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3. 15. Farklı sıcaklıklarda ısı iletkenliğin hacimsel partikül oranı ile değişimi

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

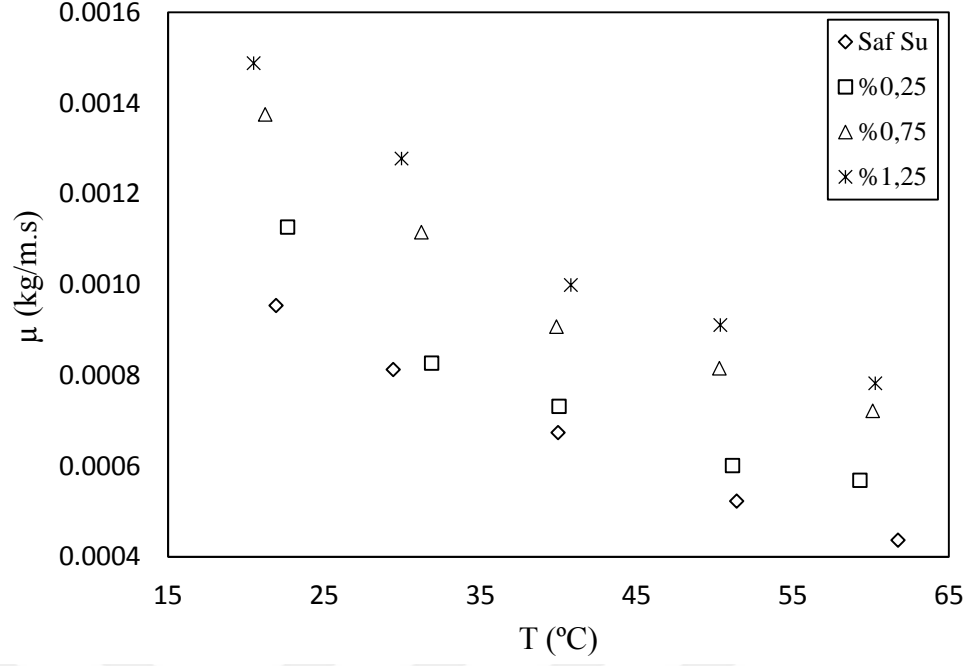
---

%0, %0,25, %0,75 ve %1,25 hacimsel oranlarda hazırlanan nanoakışkanların ısı iletkenlik ölçümleri ve 20-60°C aralığında yaklaşık olarak 10°C artışla belirlenen sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.

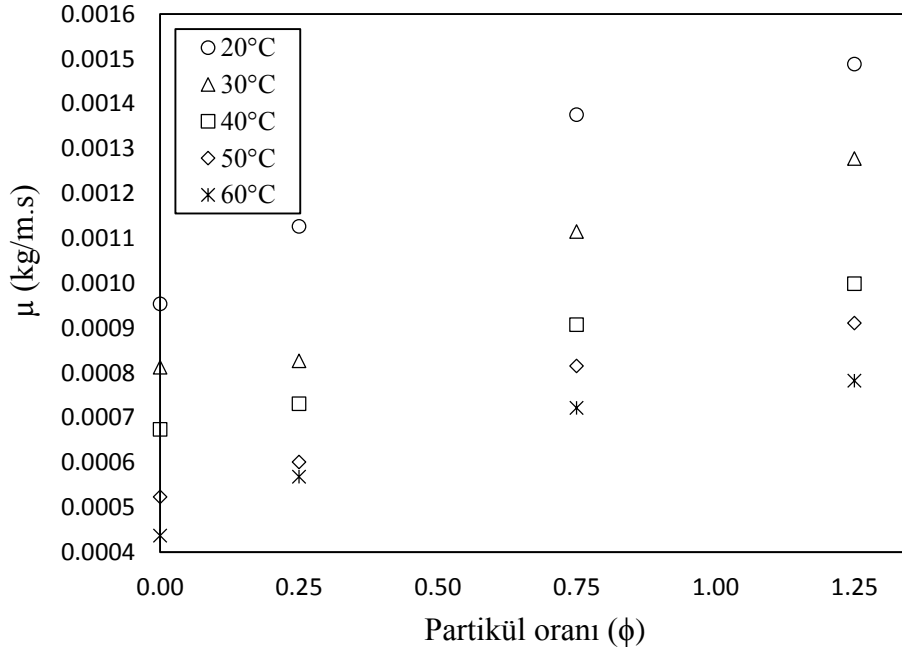
Saf su ve farklı hacimsel oranlardaki nanoakışkanlar için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişimi Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Şekle bakıldığında sıcaklığın akışkanların ısı iletkenliğini etkileyen önemli bir etken olduğu rahatlıkla görülmektedir. Sıcaklıktaki artışla bütün akışkanların ısı iletkenlik değeri artmıştır. Bunun yanısıra ölçüm yapılan tüm sıcaklıklarda nanoakışkanların ısı iletkenlik değerleri saf suyun ısı iletkenlik değerlerinden yüksektir. Isı iletkenlikteki en yüksek artış oranı %1.25 hacimsel partikül oranı için 60°C sıcaklıkta yaklaşık %13.5 olarak görülmüştür. Akışkanlarda ısı iletimi moleküllerin çarpışma ve yayılım hareketlerinin etkisiyle gerçekleşmektedir. Dolayısıyla ısı iletkenlikteki artışın sebebi sıcaklık artışıyla beraber akışkan moleküllerindeki çarpışma ve yayılım hareketlerinin artmasıdır.

Ayrıca Şekil 3.15'de farklı sıcaklık değerleri için ısı iletkenliğin hacimsel partikül oranı ile değişimi gösterilmiştir. Nanoakışkanların hacimsel partikül oranındaki artışla tüm sıcaklıklarda ısı iletkenlik değerleri artmıştır. Bu artışın sebebi olarak akla ilk basit karışım yaklaşımı gelmektedir. Temel akışkan içerisine kendi ısı iletkenliğinden yüksek ısı iletkenlikte partikül ilave edildiği zaman karışımın ısı iletkenliği temel akışkana göre yüksek bir değerde olacaktır. Burdan hareketle nanoakışkanların ısı iletkenlik değerinin hacimsel partikül oranındaki artışla artacağı söylenilebilir. Ancak bu yaklaşım yetersiz kalır. Bunun yanısıra başka bir olgu önemli ölçüde katkıda bulunur. Brownian hareketi olarak ifade edilen bu olgu nanoakışkan içerisindeki partiküllerin rastlantısal hareketi sonucu oluşan momentum ve ısı transferi etkilerini içermektedir. Nanoakışkanların hacimsel partikül oranındaki artışla ısı iletkenliğin artmasına sebep olarak bu olgu gösterilebilir.

Saf su ve saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanlarının viskozite ölçümleri için A&D marka SV-10 model vibro viskozimetreden faydalanılmıştır. Saf su ve farklı hacimsel oranlardaki nanoakışkanlar için viskozitenin sıcaklıkla değişimi Şekil 3.16'de ve farklı sıcaklık değerleri için viskozitenin hacimsel partikül oranı ile değişimi Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Farklı akışkanlar için viskozitenin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3.17. Farklı sıcaklıklarda viskozitenin hacimsel partikül oranı ile değişimi

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

%0, %0,25, %0,75 ve %1,25 hacimsel partikül oranlarında hazırlanan nanoakışkanların viskozite ölçümleri ısı iletkenlik ölçümlerinde olduğu gibi 20-60°C aralığında yaklaşık olarak 10°C artışla farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.

Beklenildiği gibi nanoakışkanların viskozite değerleri saf suyun viskozite değerinden büyük çıkmıştır. Saf su ve farklı hacimsel oranlardaki nanoakışkanlar için sıcaklığın viskozite üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu Şekil 3.16'de görülmektedir. Sıcaklık artışıyla beraber tüm akışkanların viskozite değeri azalmıştır. Şekil 3.17'ye bakıldığında farklı sıcaklık değerleri için hacimsel partikül oranının viskozite üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Hacimsel partikül oranı artışıyla beraber tüm sıcaklıklarda viskozite değeri artmıştır. Bu çıkarımlardan yola çıkarak en düşük hacimsel partikül oranı ve en yüksek sıcaklık değerinde en düşük viskozite değeri gözlemlenmiştir. En yüksek viskozite değeri 20°C sıcaklık ve %1,25 hacimsel partikül oranına sahip saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için elde edilmiş ve viskozite değeri saf suya göre yaklaşık %56 artmıştır.

Temel akışkan içerisine SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin eklenmesi viskozitenin saf suya göre %32-%56 daha yüksek olmasına neden olmuştur. Sıcaklıktaki her bir 10°C'lik artış viskoziteyi yaklaşık olarak %16 azaltmıştır.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Yapılan deneysel çalışmada SiO<sub>2</sub> partikülleri kullanılarak hazırlanan su bazlı nanoakışkanların dairesel kesitli mini kanallarda karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney parametreleri olarak çap, nanopartikül hacimsel oranı ve Reynolds sayısı seçilmiştir. Seçilen parametrelerdeki değişimle ısı transferi karakteristiklerinin değişimleri analiz edilmiştir.

##### 4.1. Isı Transfer Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması

Kullanılan sistemin doğrulamasını gerçekleştirmek üzere saf su ile elde edilen veriler dairesel kanallarda karma taşınım ile ısı transferi için geliştirilmiş modeller ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda saf su ile elde edilen verilerin karşılaştırılmasında aşağıda verilen McAdams, Oliver ve Brown-Thomas modelleri kullanılmıştır (Li and Feng 2013;Feng and Li 2013).

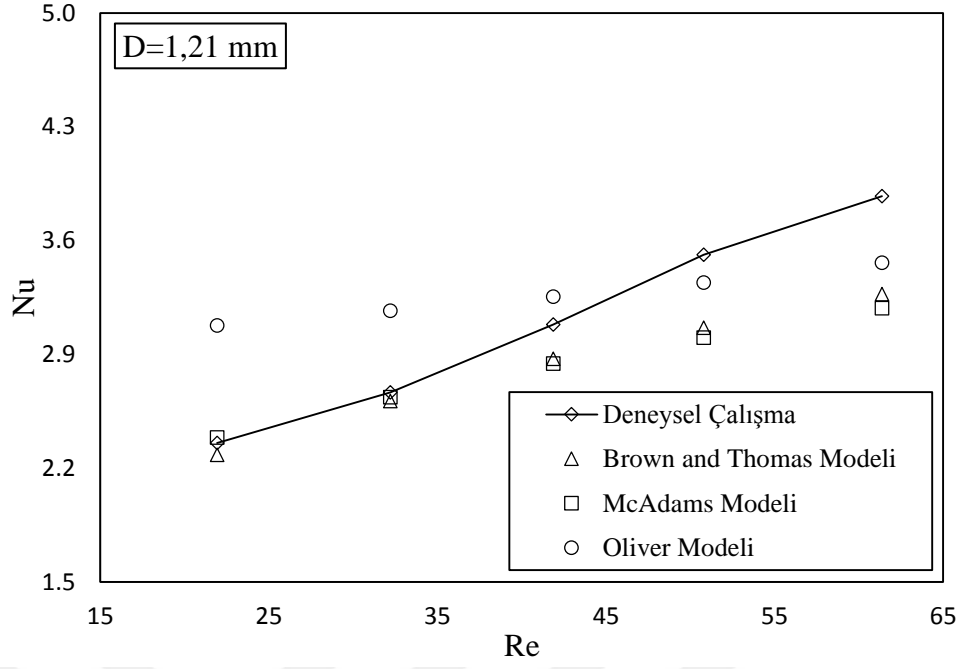
$$\text{Nu} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0,14} = 2,11 \left( \text{Gz} + 0,04 \left( \frac{\text{GrPrD}}{L} \right)^{0,75} \right)^{1/3} \quad (\text{McAdams Modeli}) \quad (4.1)$$

$$\text{Nu} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0,14} = 2,11 \left( \text{Gz} + 0,0083 (\text{GrPr})^{0,75} \right)^{1/3} \quad (\text{Oliver Modeli}) \quad (4.2)$$

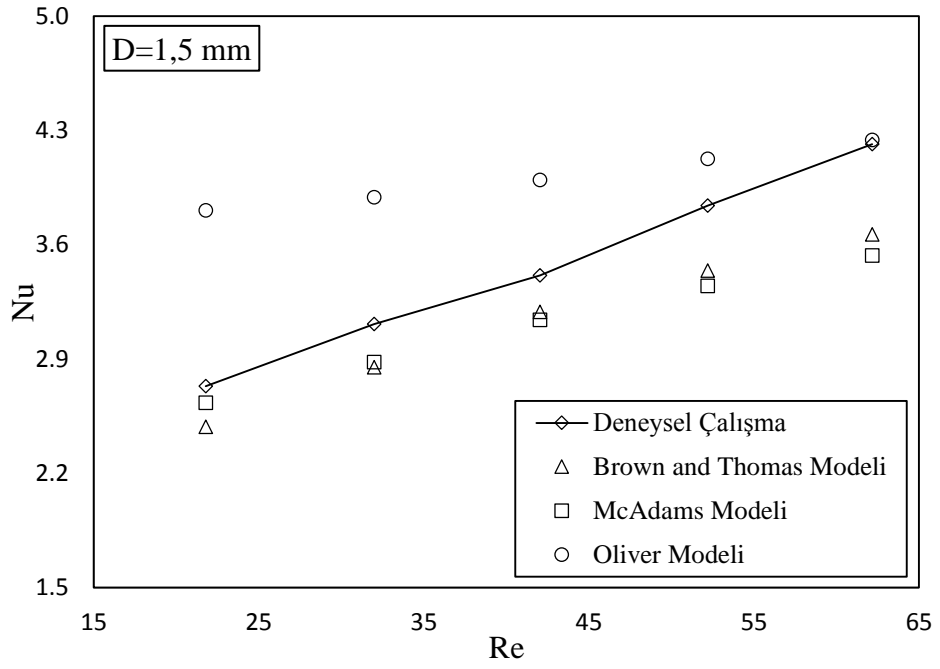
$$\text{Nu} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0,14} = 2,11 \left( \text{Gz} + 0,012 (\text{GzGr}^{1/3})^{4/3} \right)^{1/3} \quad (\text{Brown-Thomas Modeli}) \quad (4.3)$$



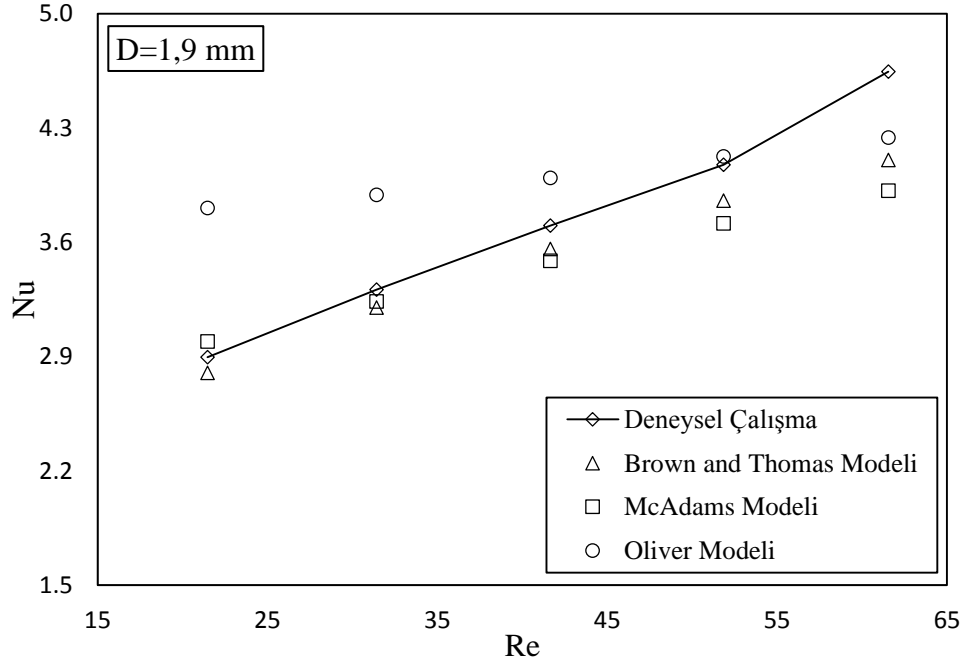
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4. 1. Saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması (D=1,21 mm)



Şekil 4.2. Saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması (D=1,5 mm)



Şekil 4. 3. Saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması (D=1,9 mm)

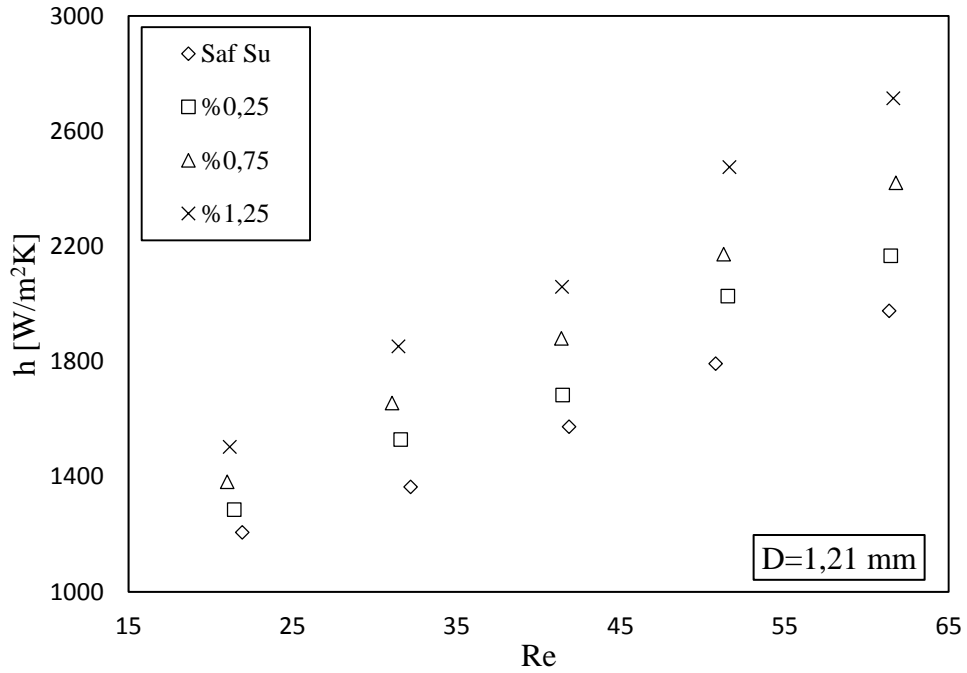
Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te kanal çapı sırasıyla 1,21 mm, 1,5 mm ve 1,9 mm olan her bir mini kanalda saf su ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen verilerin literatürle karşılaştırılması sunulmuştur. Farklı çaptaki üç mini kanalda da Reynolds sayısındaki artışla Nusselt sayısı hem modeller hem de deneysel çalışma eğrilerinde artış göstermiştir. Yalnız modeller göz önüne alındığı zaman Oliver Modeli'ndeki ısı transferi sonuçlarının Brown ve Thomas ve McAdams Modelleri'ndeki ısı transferi sonuçlarından yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Brown ve Thomas Modeli ile McAdams Modeli çok benzer eğilim gösteren modeller olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca Reynolds sayısındaki artışla beraber modellerin ısı transferi tahminleri arasındaki fark azalmaktadır. Farklı çaptaki üç mini kanal içinde deneysel eğriler modellerin eğrileri ile uyum içerisindedir. 1,21 mm kanal çapına sahip olan mini kanalın deneysel eğrisi Reynolds sayısının 45'i geçtiği bölgede modellerin eğrilerinin bir miktar üzerine çıkmıştır. 1,5 mm kanal çapına sahip olan mini kanalın deneysel eğrisi tüm Reynolds sayıları için modellerin eğrileri arasında kalmıştır. Ve son olarak 1,9 mm kanal çapına sahip olan mini kanalın deneysel eğrisi ise son Reynolds sayısı haricinde modellerin eğrileri arasında kalmıştır.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3 birlikte incelendiği zaman mini kanal çapındaki artışla deneysel ısı transferi sonuçlarının arttığı görülmektedir. Tüm Reynolds sayılarında kanal çapı en büyük olan mini kanalda en yüksek, kanal çapı en düşük olan mini kanalda ise en düşük ısı transferi sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar kanal çapındaki artışın ısı transferi yüzey alanını arttırmasından dolayı gerçekleşmiştir.

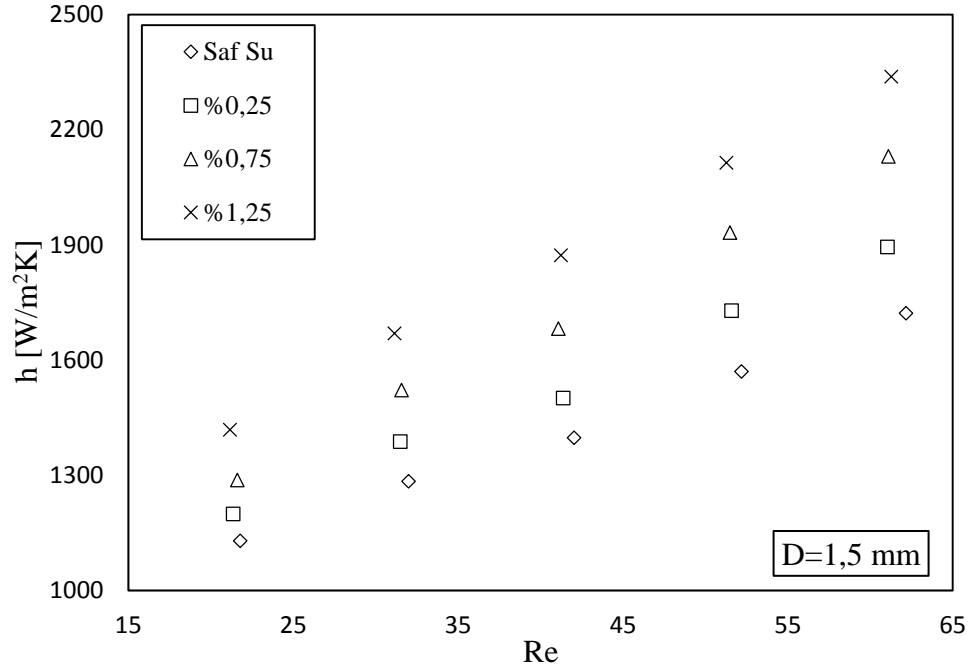
#### 4.2. Karma Taşınım Bulguları

Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’da farklı kanal çapı ve tüm iş akışkanları için taşınım ısı transferi katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Böylece kanal çapı sabit tutularak hacimsel partikül oranının ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

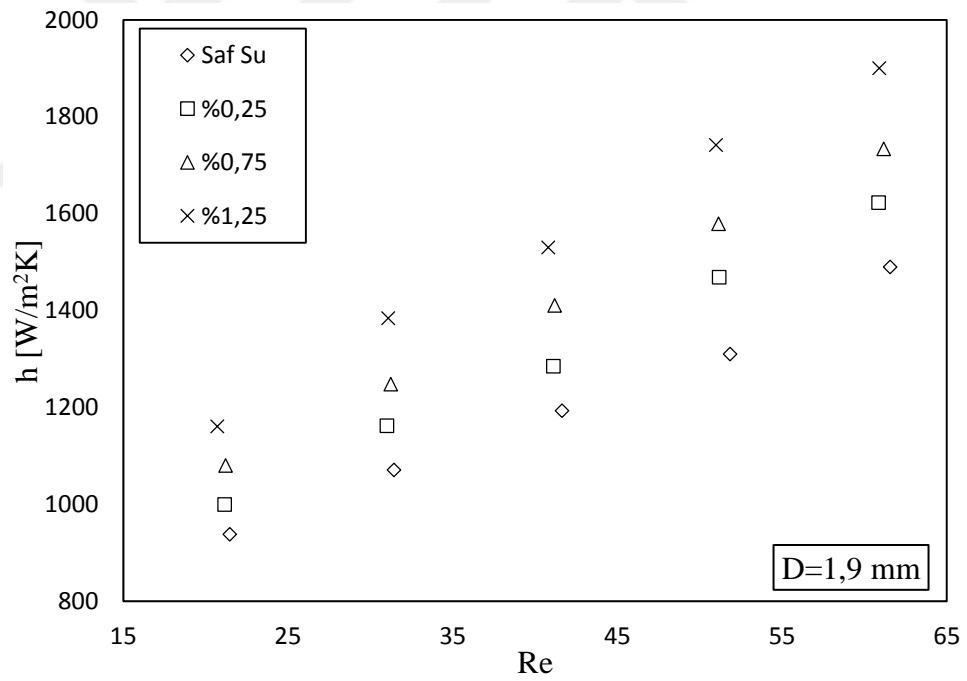


Şekil 4. 4. Isı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (D=1,21 mm)

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



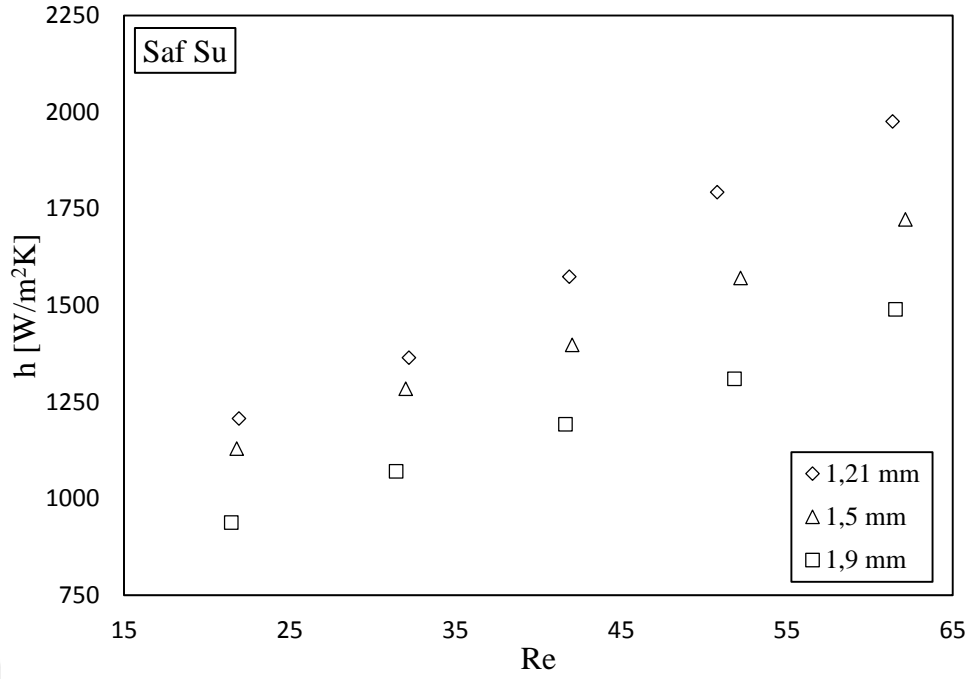
Şekil 4. 5. Isı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (D=1,5 mm)



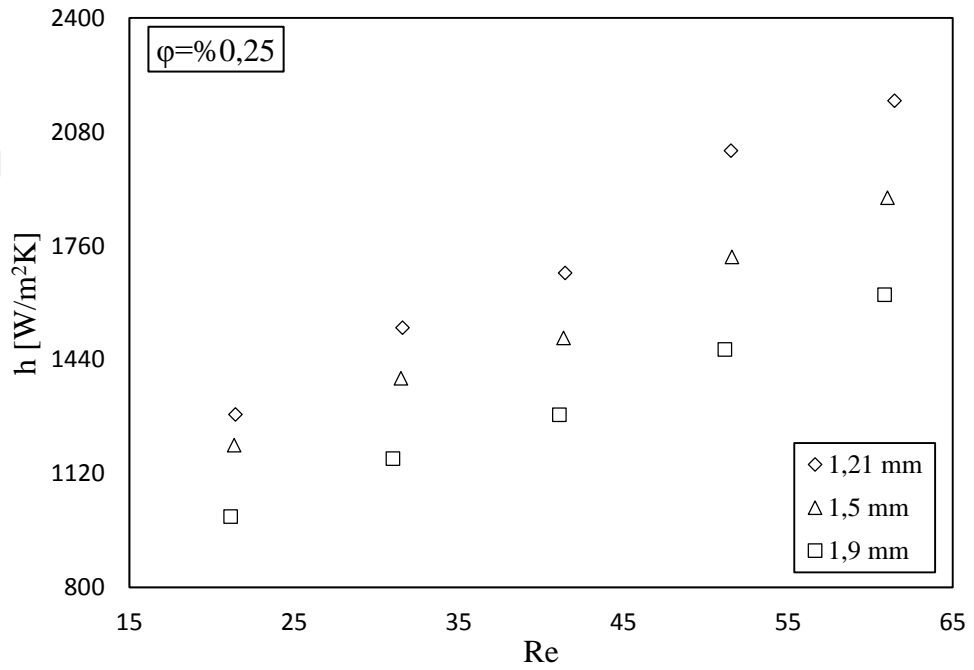
Şekil 4. 6. Isı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi (D=1,9 mm)

Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6 birlikte incelendiği zaman farklı kanal çapı ve tüm iş akışkanları için Reynolds sayısındaki artışla birlikte taşınım katsayısının arttığı görülmektedir. Bunun yanı sıra tüm Reynolds sayılarında en düşük taşınım katsayısı saf suda gözlemlenmiştir. Temel akışkana nanopartikül süspanse edilmesi tahmin edildiği gibi ısı taşınım katsayısını arttırmıştır. Deneylerin farklı hacimsel partikül oranlarında hazırlanan nanoakışkanlarla gerçekleştirilmesi hacimsel partikül oranının ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkisinin gözlemlenebilmesini mümkün kılmıştır. Aynı kanal çapı ve Reynolds sayısı için hacimsel partikül oranındaki artışla birlikte ısı taşınım katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. Aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında 1,21 mm kanal çapına sahip minikanalda %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre ısı taşınım katsayısında yaklaşık %13; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %23 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %38 artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde 1,5 mm kanal çapına sahip minikanalda aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre ısı taşınım katsayısında yaklaşık %10; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %24 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %36 artış meydana gelmiştir. 1,9 mm kanal çapına sahip minikanalda ise yine aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre ısı taşınım katsayısında yaklaşık %12; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %21 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %33 artış meydana gelmiştir.

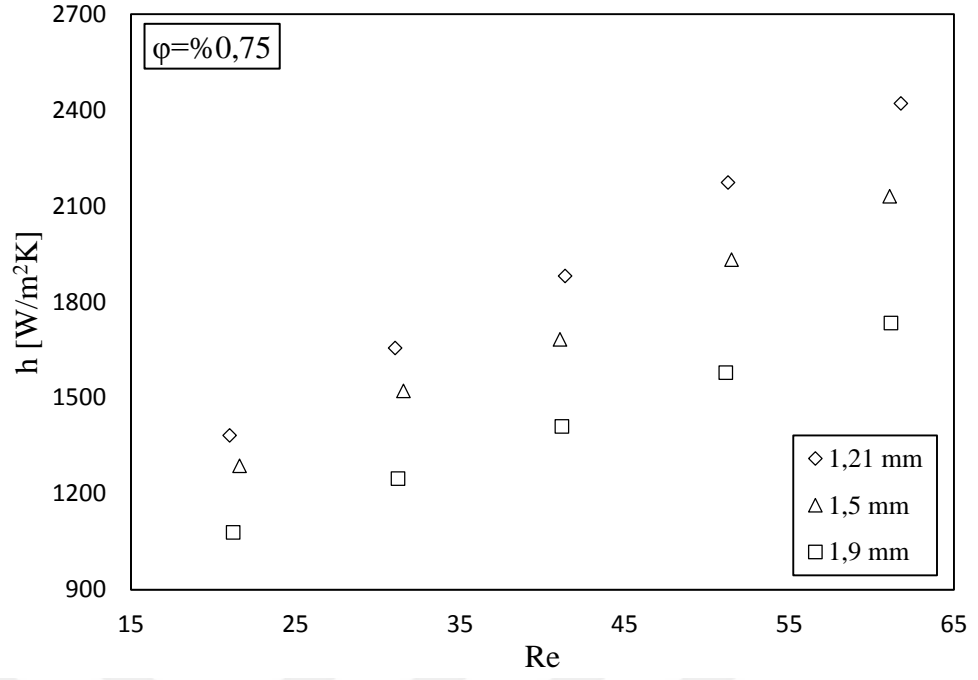
Nanopartikül ilavesinin ısı taşınım katsayısını arttırması daha önce bahsedilen nanopartiküllerin Brownian hareketi, nanopartiküllerin kümelenmesi, nanopartiküller etrafında sıvı katmanlaşması, yakın alan radyasyonu ve balistik fonon iletimi mekanizmaları ile izah edilebilir. Bu mekanizmalar içerisinde Brownian hareketinde akışkan içerisinde partiküllerin rastgele hareketi sırasında partiküller etrafında da bir akışkan hareketi yani küçük ölçekli bir taşınım etkisi daha meydana gelir ve bu da ısı transferini dolayısıyla ısı taşınım katsayısını arttırır. Burdan yola çıkarak ısı taşınım katsayısının artmasında en önemli etkiye Brownian hareketinin sahip olduğu söylenilebilir.



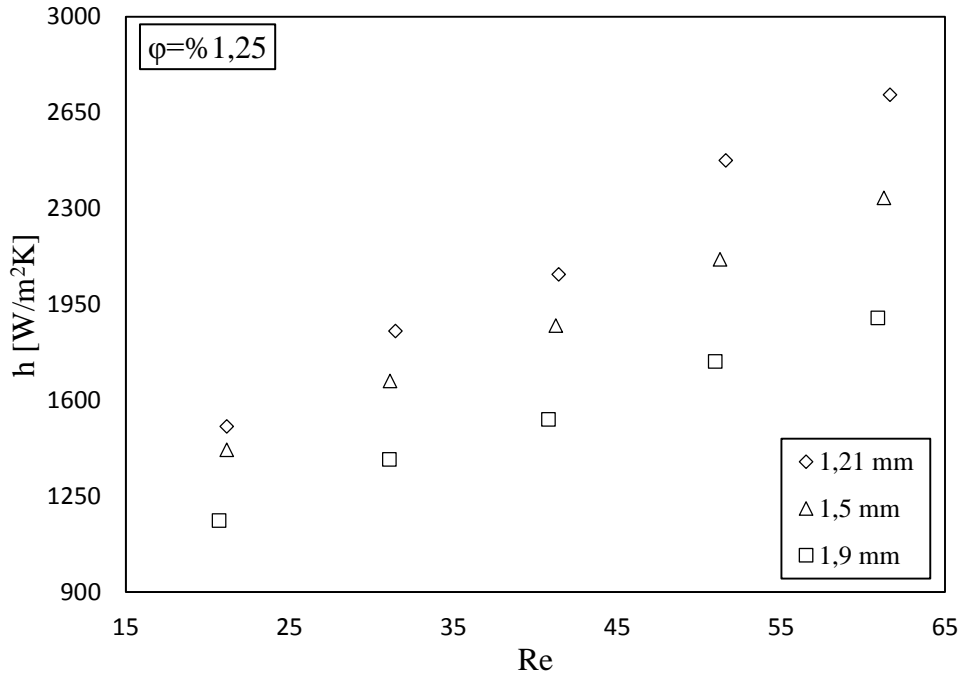
Şekil 4. 7. Saf Su için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4. 8. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi



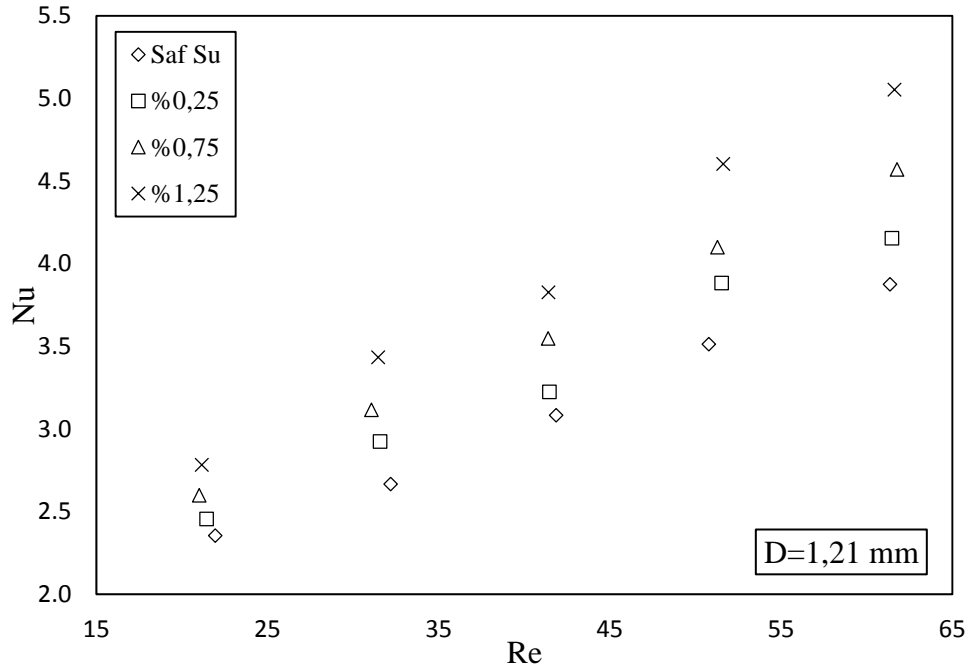
Şekil 4. 9. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $SiO_2$  nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4. 10. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $SiO_2$  nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

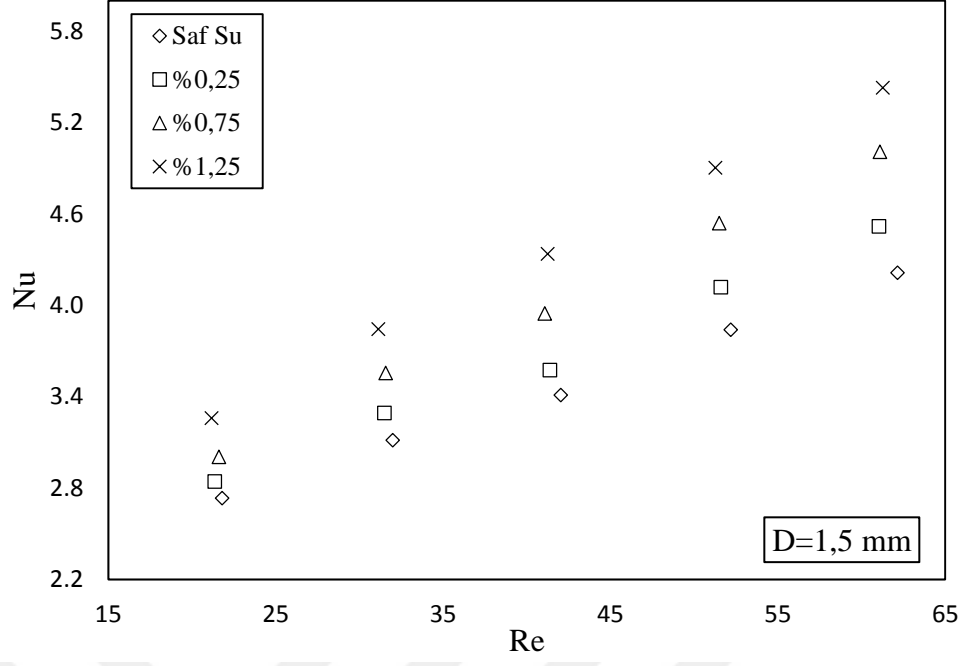
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10'da farklı hacimsel partikül oranı ve kanal çapı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Böylece hacimsel partikül oranı sabit tutularak mini kanal çapının taşınım katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Verilen şekillerdeki noktasal eğriler birlikte incelendiği zaman mini kanal çapıyla ısı taşınım katsayısının birbirine bağlı büyüklükler olduğu anlaşılmaktadır. İş akışkanının tüm hacimsel partikül oranları için kanal çapındaki artışla birlikte ısı taşınım katsayısının azaldığı görülmektedir. Deney parametrelerinden biri olan Reynolds sayısı değişimi kütleli debinin dolayısıyla akış hızının ayarlanmasıyla elde edilmiştir. Kanal içerisinde akış hızındaki artışla vizkoz alt tabaka incelmış bunun neticesinde momentum transferi artmıştır. Bu nedenle artan Reynolds sayısı ile ısı transferi önemli ölçüde artmaktadır.

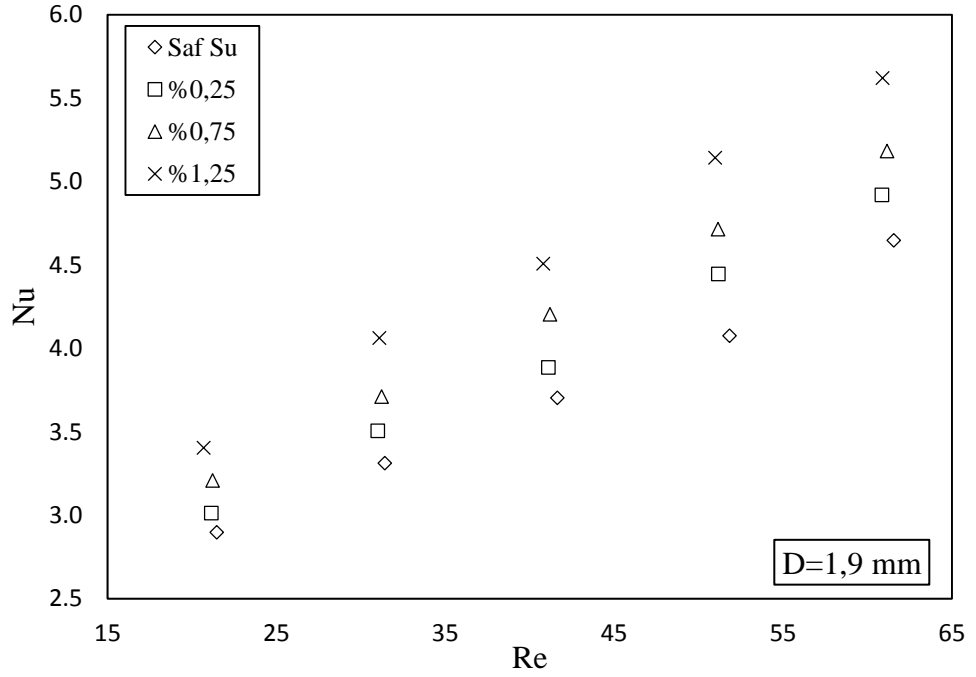


Şekil 4. 11. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi





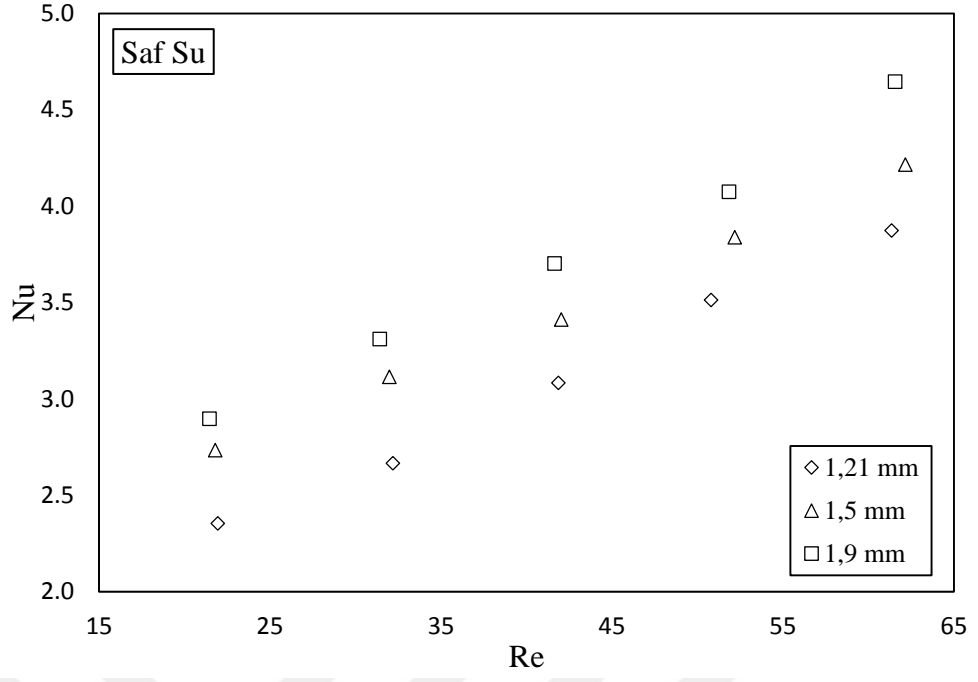
Şekil 4. 12. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi



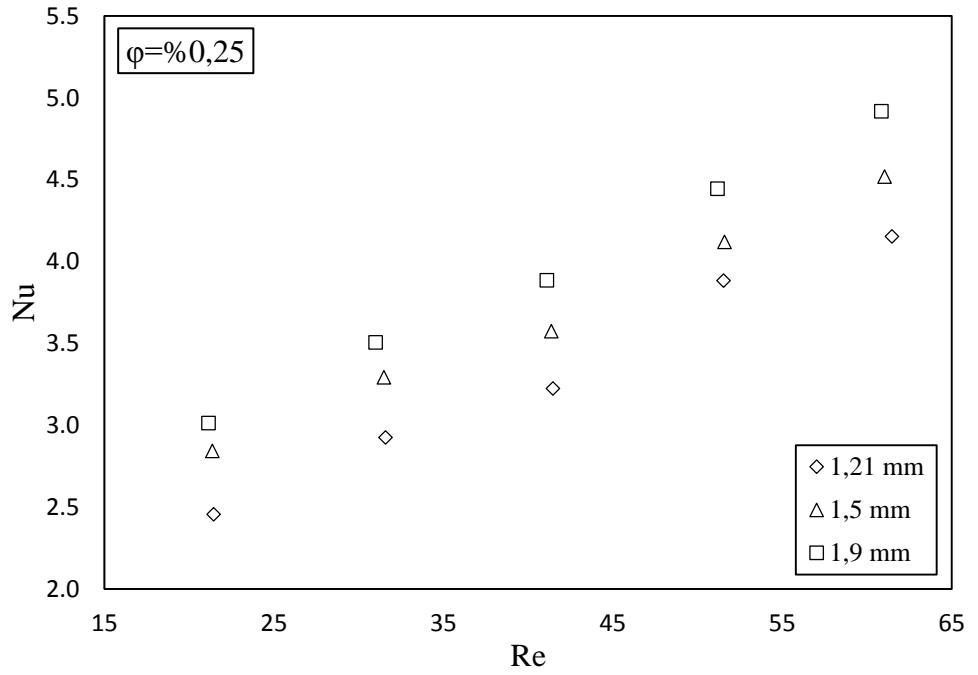
Şekil 4. 13. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te farklı kanal çapı ve tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Kanal çapı sabit tutularak hacimsel partikül oranının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekiller incelendiği zaman ısı taşınım katsayısı ile Reynolds sayısı değişimine benzer biçimde tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Reynolds sayısındaki artışla birlikte arttığı görülmektedir. Isı transferi kabiliyetinin kullanılan nanoakışkanlara göre daha kötü olmasından dolayı tüm Reynolds sayıları için en düşük Nusselt sayısı saf suda gözlemlenmiştir. Saf su içerisine daha iyi ısı transferi kabiliyetine sahip nanopartiküllerin eklenmesiyle ısı transferinde iyileştirmeler elde edilmiştir. Aynı kanal çapı ve Reynolds sayısı için hacimsel partikül oranındaki artışla birlikte Nusselt sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında 1,21 mm kanal çapına sahip mini kanalda %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık %11; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %18 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %31 artış meydana gelmiştir. Benzer şekilde 1,5 mm kanal çapına sahip mini kanalda aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık %7; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %19 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %29 artış meydana gelmiştir. 1,9 mm kanal çapına sahip mini kanalda ise yine aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık %9; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %16 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %27 artış meydana gelmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

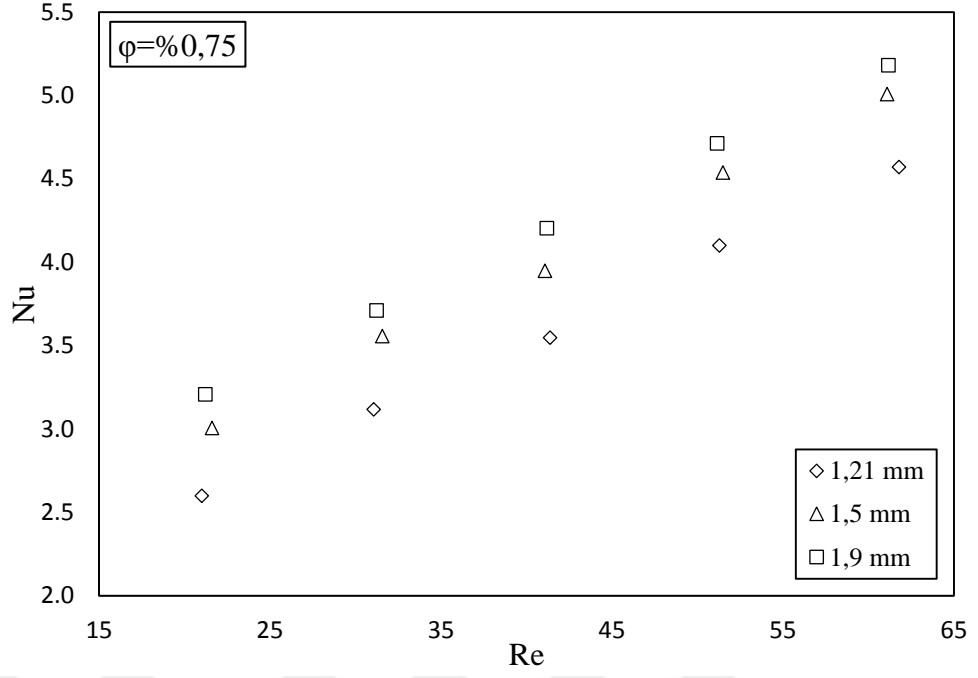


Şekil 4. 14. Saf su için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

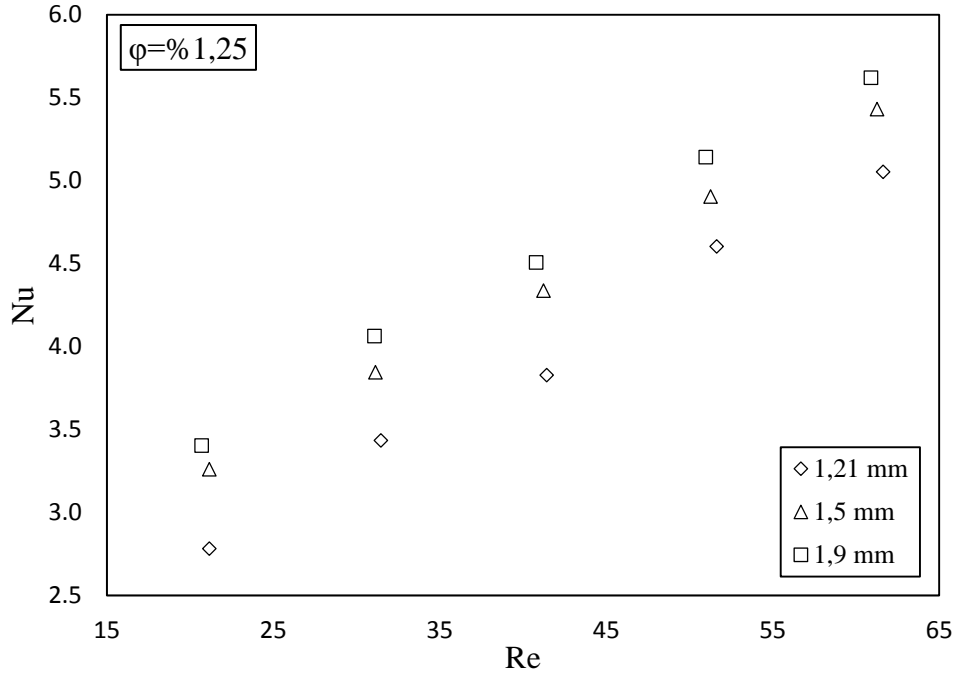


Şekil 4. 15. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



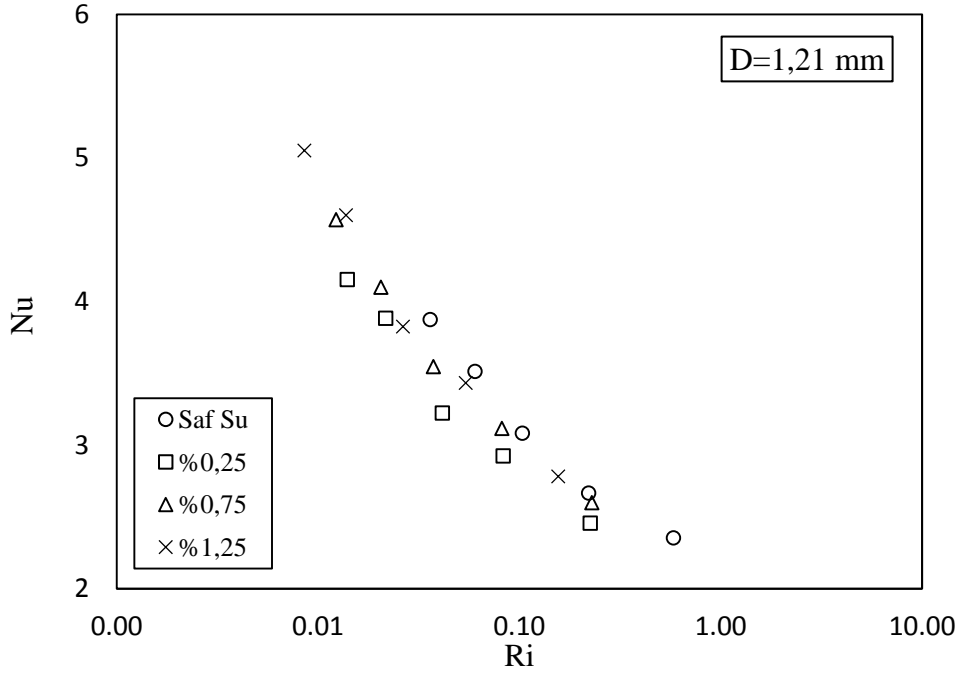
Şekil 4. 16. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4. 17. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

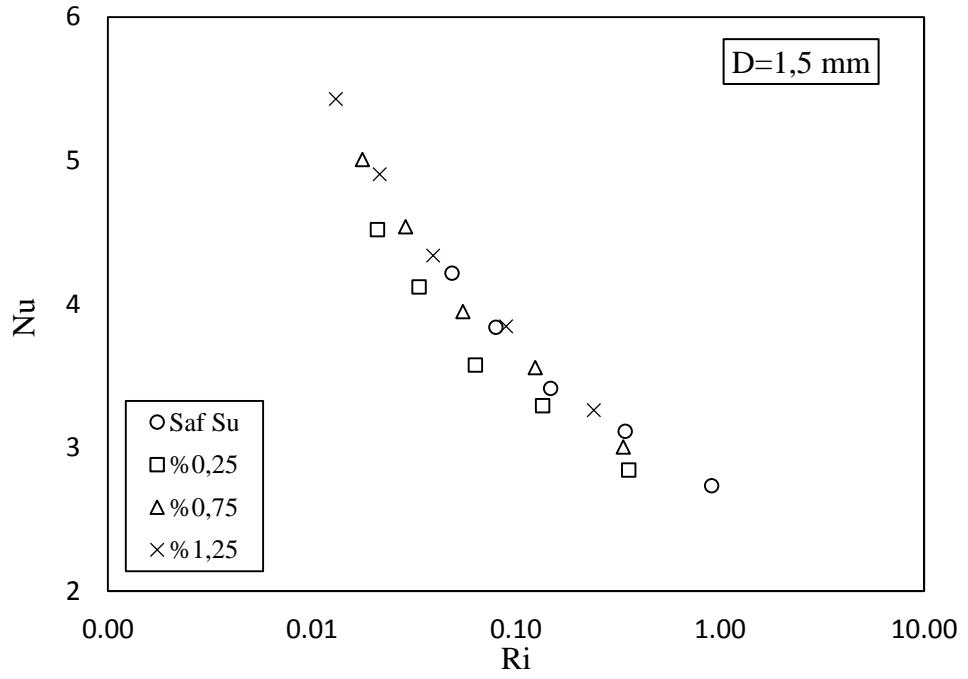
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17’de farklı hacimsel partikül oranı ve kanal çapı için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Hacimsel partikül oranı sabit tutularak kanal çapının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm hacimsel partikül oranlarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi artan Reynolds sayısı ile birlikte Nusselt sayısında artış olacak biçimde benzer eğilime sahiptir. Ayrıca tüm hacimsel partikül oranlarında kanal çapındaki artışla birlikte Nusselt sayısında artış gözlemlenmiştir. En yüksek Nusselt sayısı 1,9 mm kanal çapı ve %1,25 hacimsel partikül oranında 5,6 olarak elde edilmiştir. Aynı Reynolds sayısı iş akışkanı göz önüne alınarak değerlendirme yapıldığı zaman kanal çapı 1,21’den 1,5 mm’ye yükseltildiğinde Nusselt sayısındaki en fazla artış ortalama %16 olurken, kanal çapı 1,21’den 1,9 mm’ye yükseldiğinde ortalama %23 olmuştur.

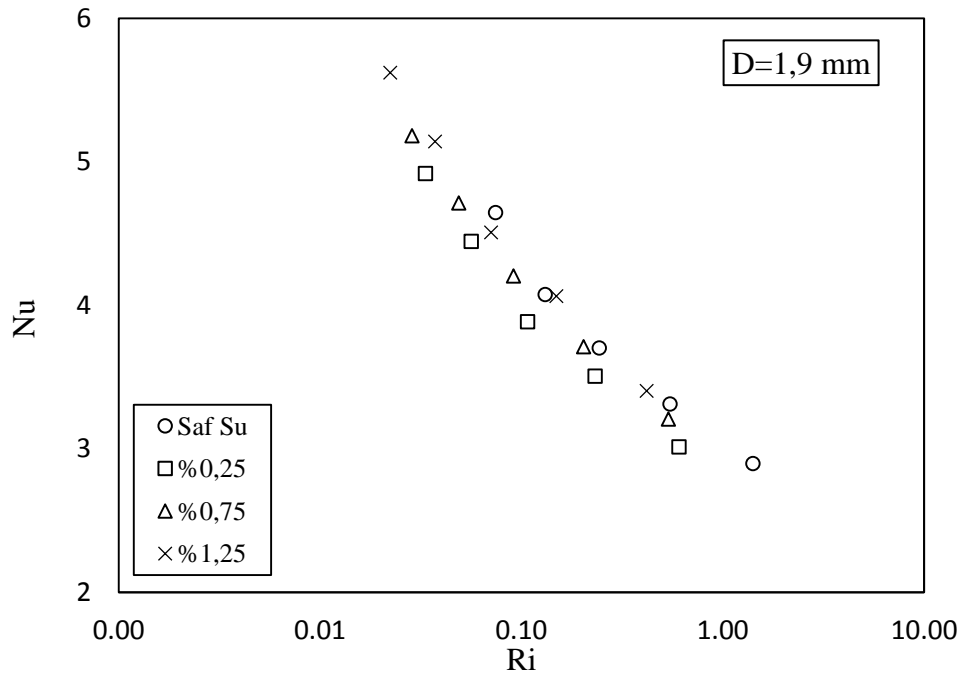


Şekil 4. 18. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

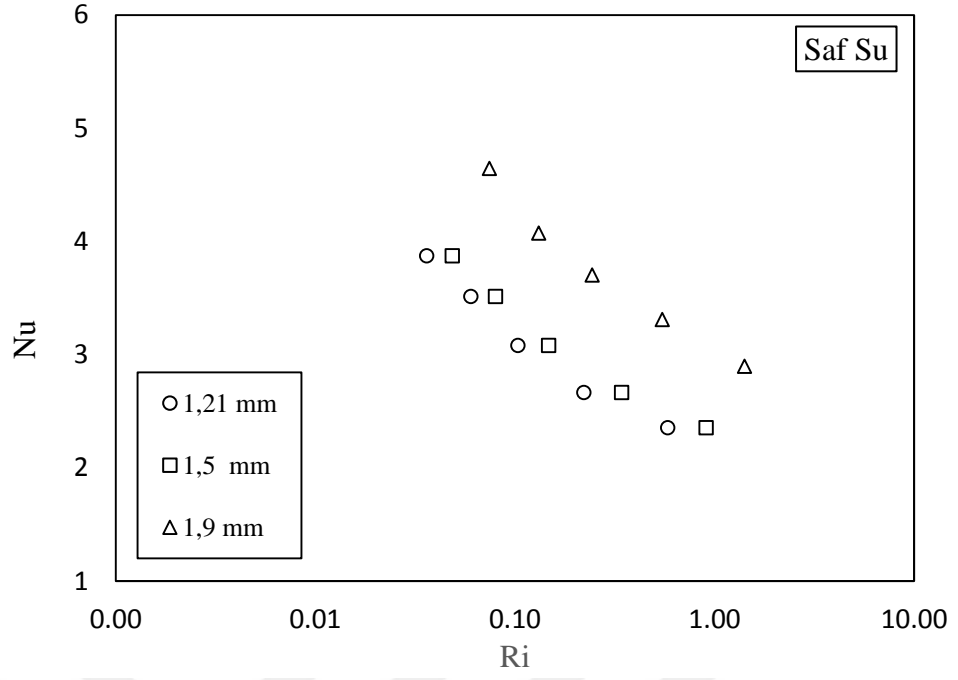


Şekil 4. 19. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi

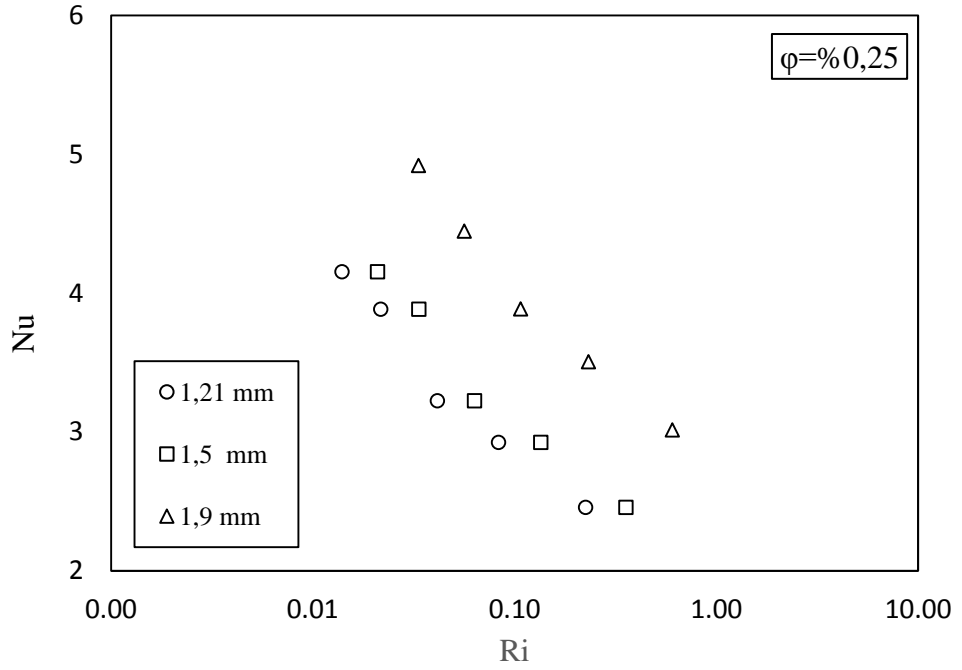


Şekil 4. 20. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

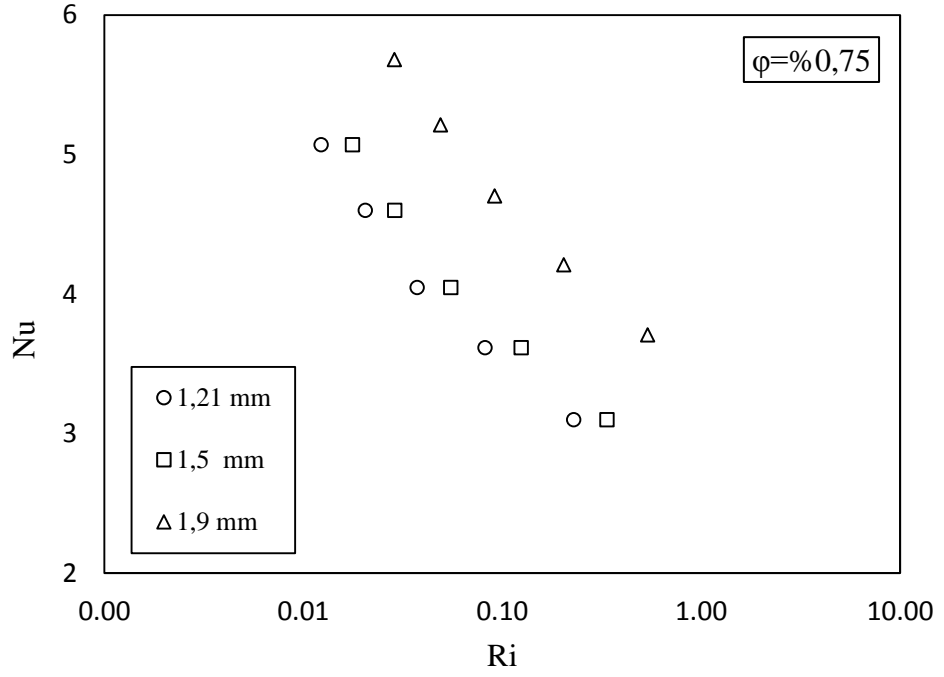


Şekil 4. 21. Saf Su için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi

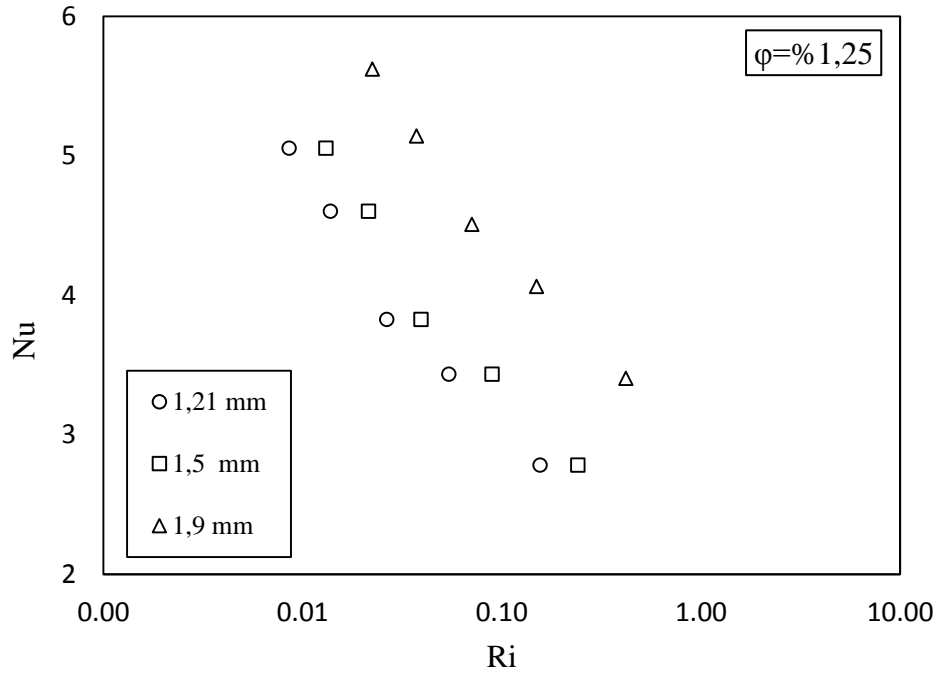


Şekil 4. 22. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4. 23. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $SiO_2$  nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi

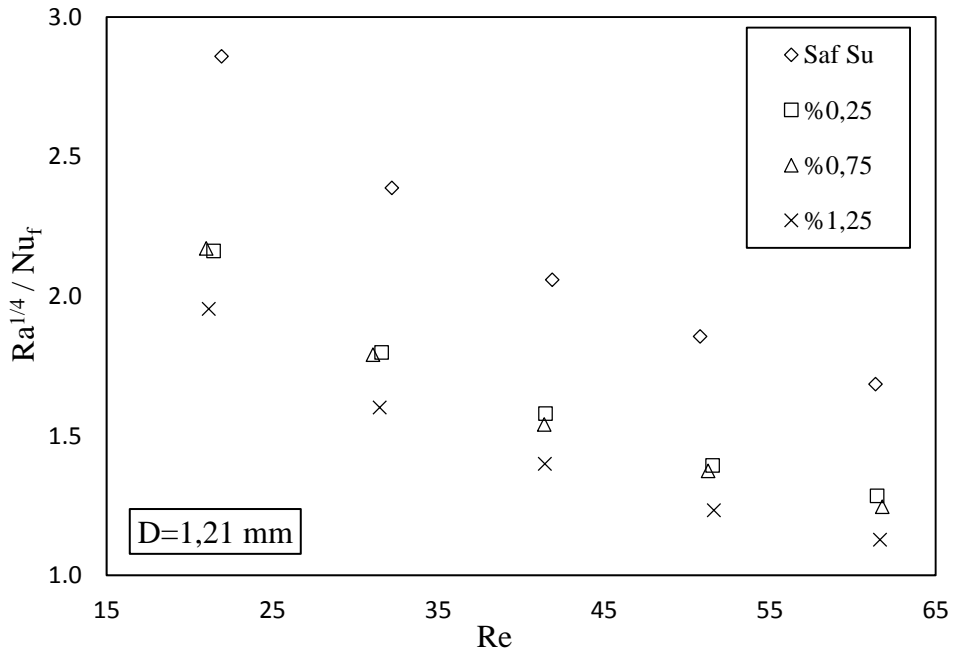


Şekil 4. 24. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $SiO_2$  nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



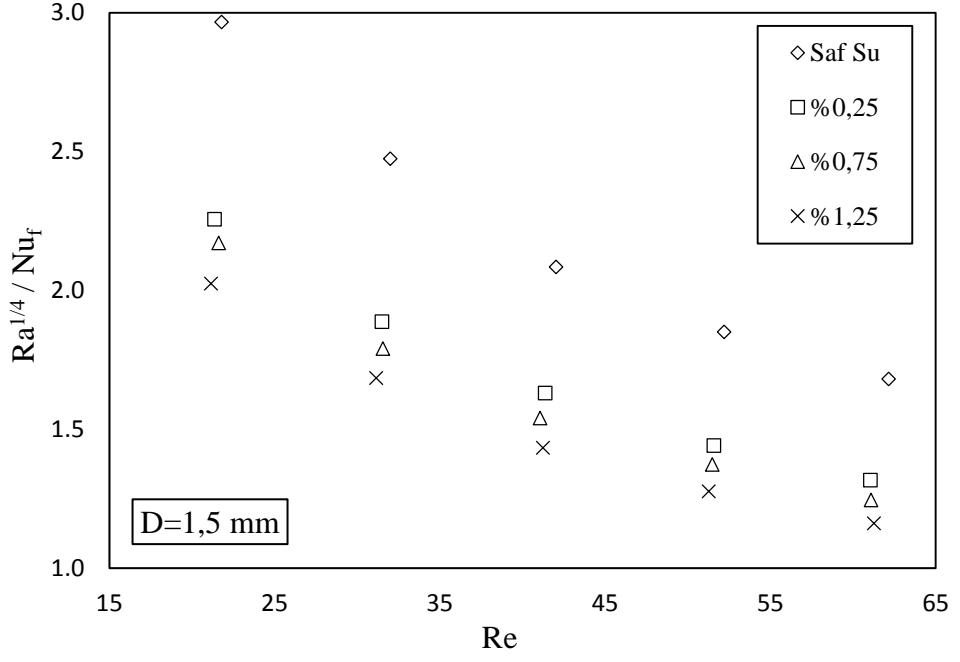
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20’de her bir kanal çapı için farklı hacimsel partikül oranlarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi Şekil 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24’te ise her bir hacimsel partikül oranı için farklı kanal çaplarında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Richardson sayısının 1’den çok küçük olduğu durumda zorlanmış taşınım şartlarının, 1’den çok büyük olduğunda doğal taşınım şartlarının ve 0,01 ile 10 arasında olduğunda ise karma taşınım şartlarının meydana geldiği daha önce ifade edilmişti. Şekiller incelendiğinde Richardson sayısının çalışılan tüm durumlarda karma taşınım aralığında olduğu belirgin şekilde görülmektedir. Tüm şekillerde Richardson sayısındaki azalmayla birlikte Nusselt sayısında artış gerçekleşmiştir. Bu artış azalan Richardson sayılarının artan Reynolds sayılarında görülmesi dolayısıyla toplam Nusselt sayısı göz önüne alındığında Reynolds sayısındaki artışla birlikte zorlanmış taşınım bileşeninin artmasından ötürü meydana gelmiştir. Aynı Richardson sayısı değeri göz önüne alındığı zaman en yüksek Nusselt sayısı değeri 1,9 mm kanal çapı ve %1,25 hacimsel partikül oranında ortaya çıkmıştır.

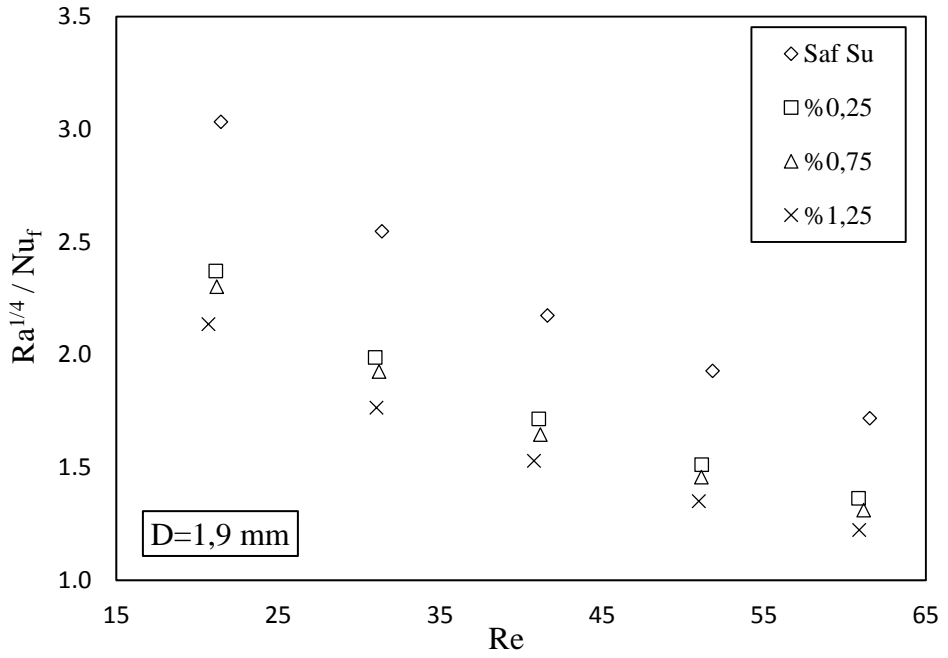


Şekil 4. 25. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds sayısı ile değişimi

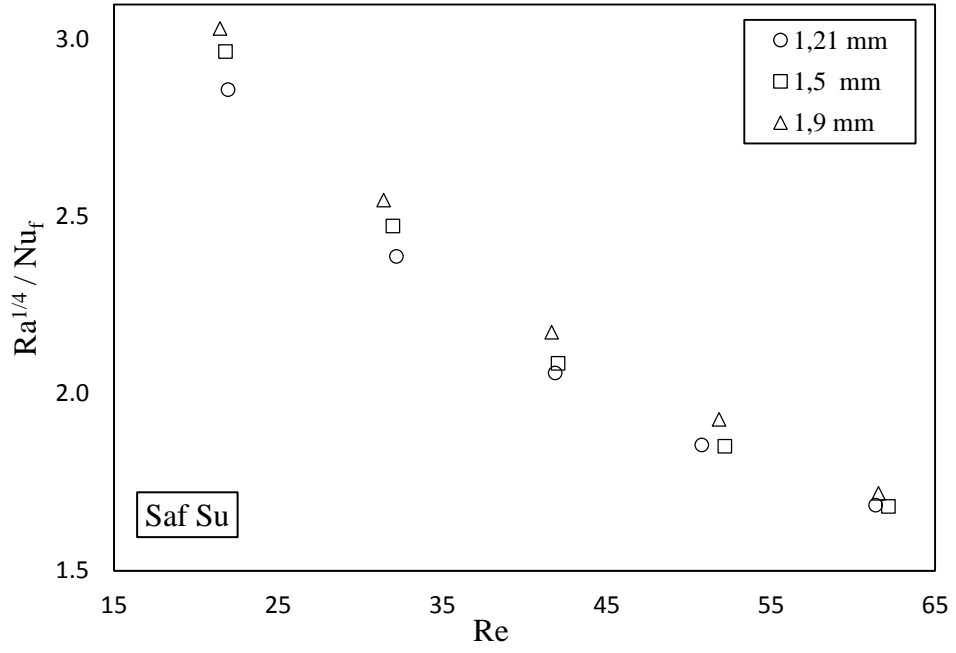
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



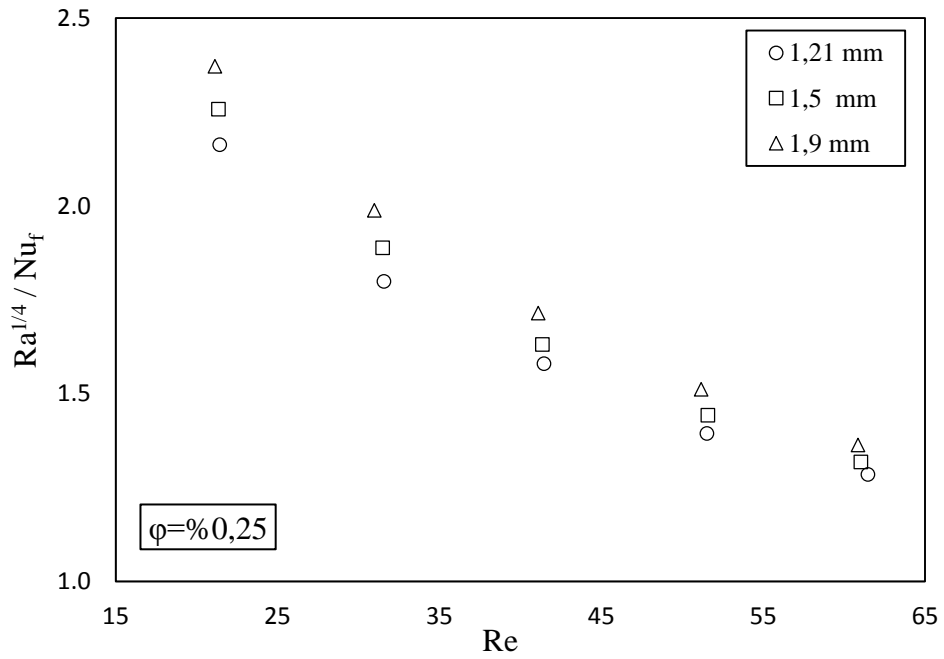
Şekil 4. 26. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4. 27. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds sayısı ile değişimi

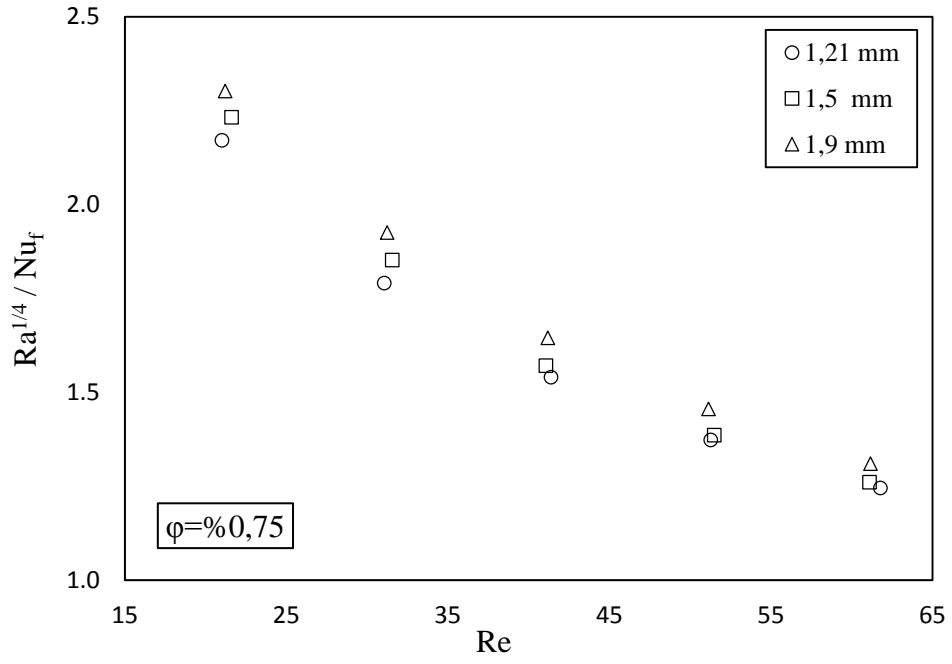


Şekil 4. 28. Saf su için tüm kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds sayısı ile değişimi

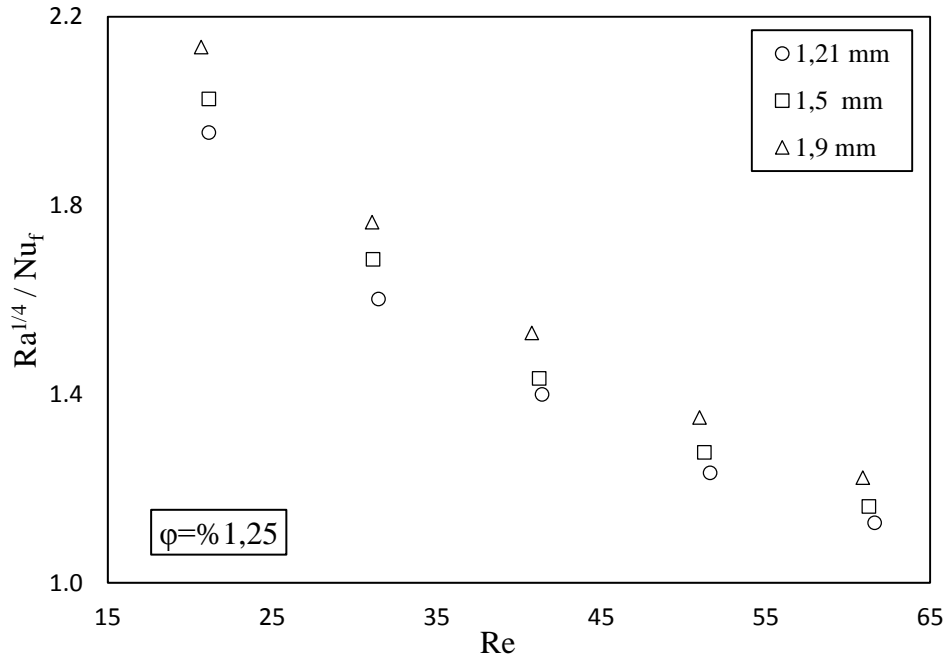


Şekil 4. 29. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $SiO_2$  nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds sayısı ile değişimi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



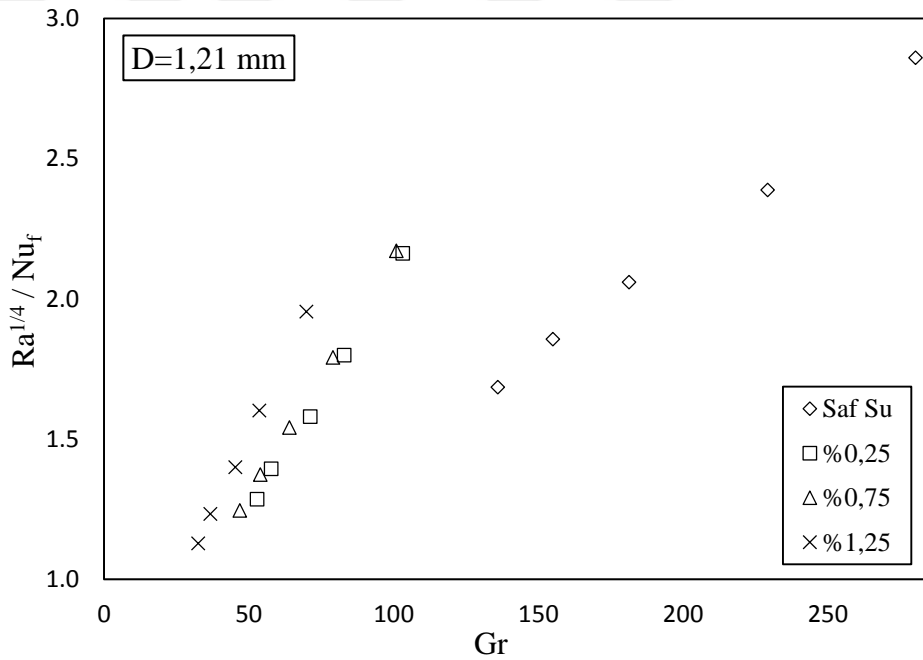
Şekil 4. 30. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4. 31. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds sayısı ile değişimi

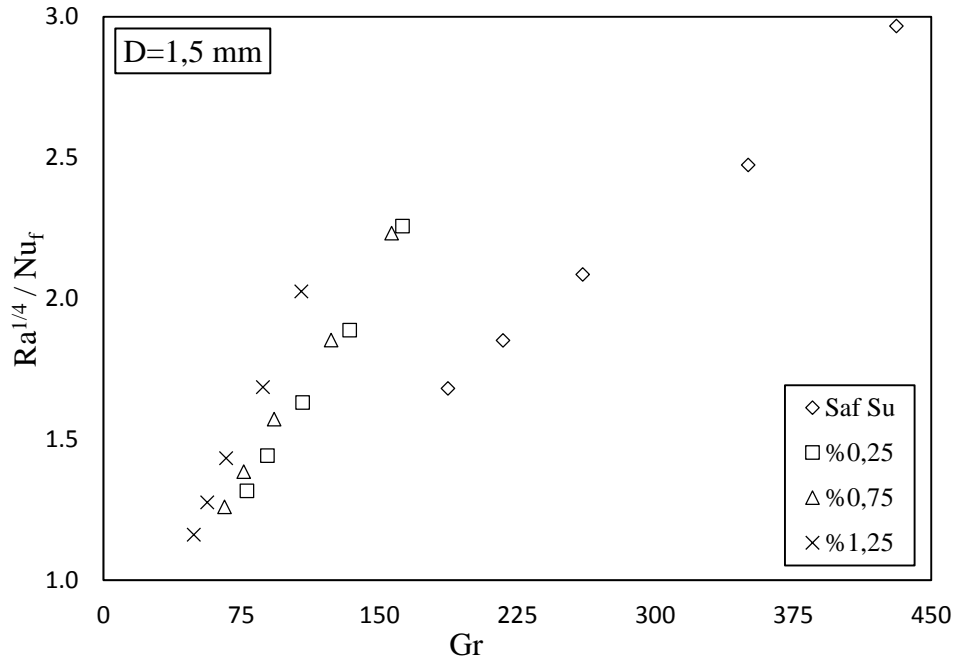
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27’de her bir kanal çapı için farklı hacimsel partikül oranlarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds sayısı ile değişimi; Şekil 4.28, 4.29, 4.30 ve 4.31’te ise her bir hacimsel partikül oranı için farklı kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds sayısı ile değişimi gösterilmiştir.  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminde  $Ra^{1/4}$  terimi toplam ısı transferinin doğal taşınım bileşeni,  $Nu_f$  terimi ise zorlanmış taşınım bileşenini temsil etmektedir.  $Ra^{1/4}/Nu_f$ , toplam ısı transferinde doğal taşınım etkilerinin zorlanmış taşınım etkilerine oranıdır.  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin 1’e eşit olması toplam ısı transferi üzerinde doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin eşit olduğunu gösterir. Şekillere bakıldığında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin yaklaşık 1 ile 3 arasında değerler aldığı görülmektedir. Tüm şekillerde Reynolds sayısındaki artışla  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin değeri azalmaktadır. Bu azalma Reynolds sayısındaki artışla zorlanmış taşınım etkilerinin doğal taşınım etkilerine göre daha baskın olmasından dolayı gerçekleşmiştir.

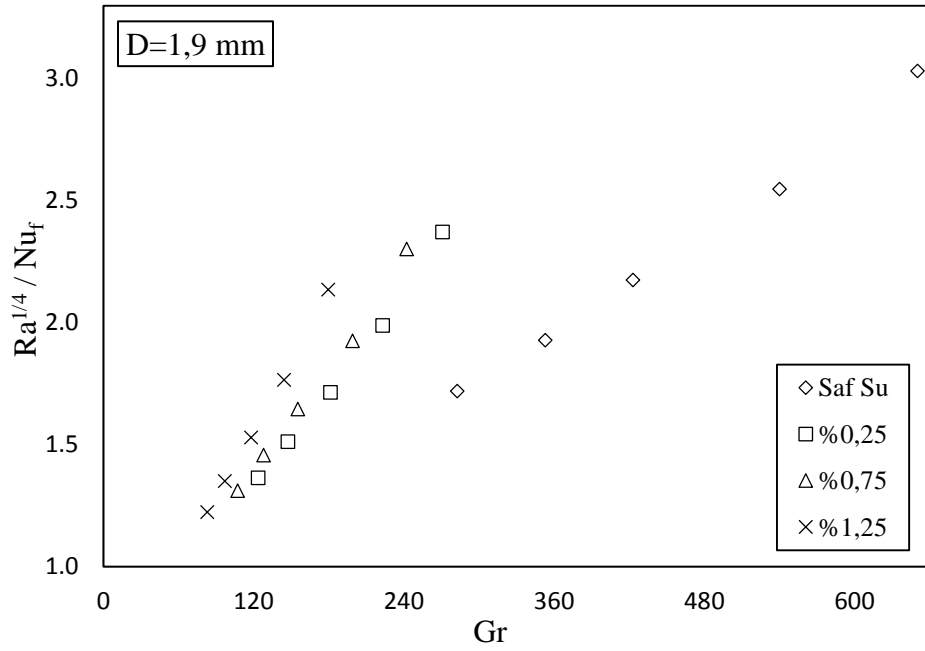


Şekil 4. 32. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

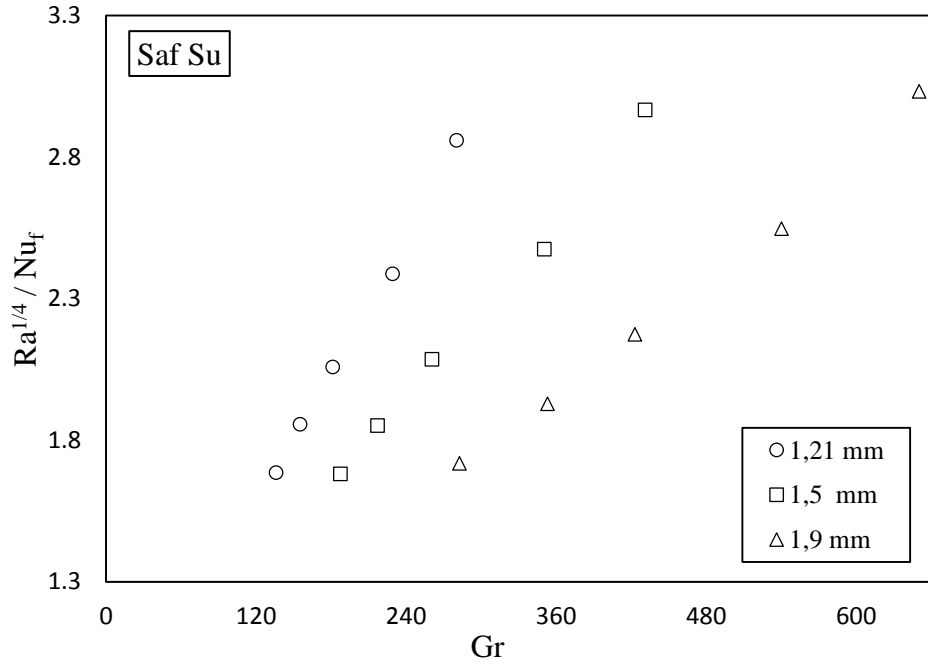


Şekil 4. 33. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

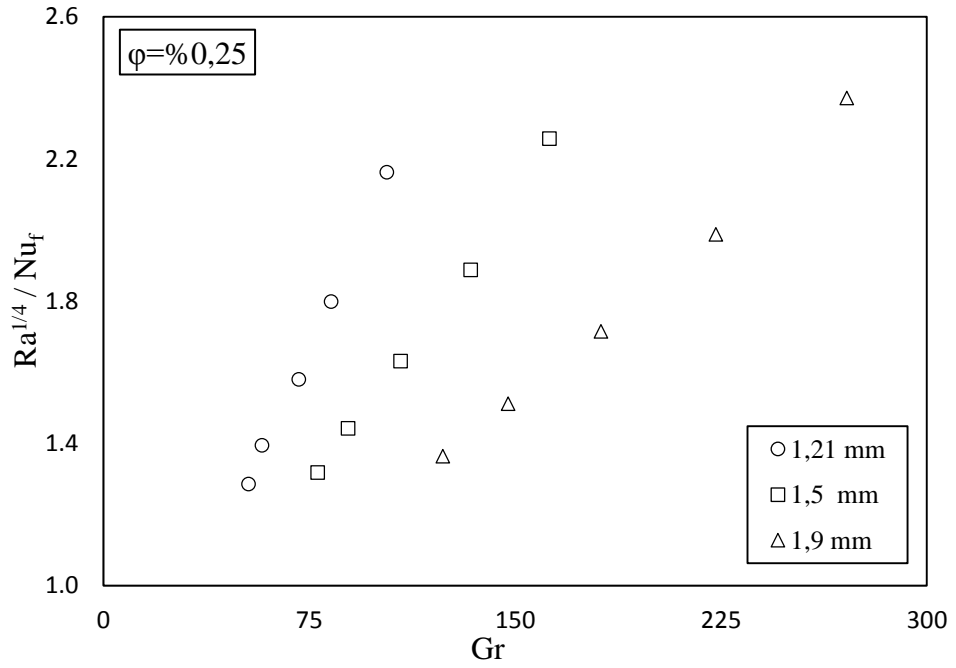


Şekil 4. 34. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

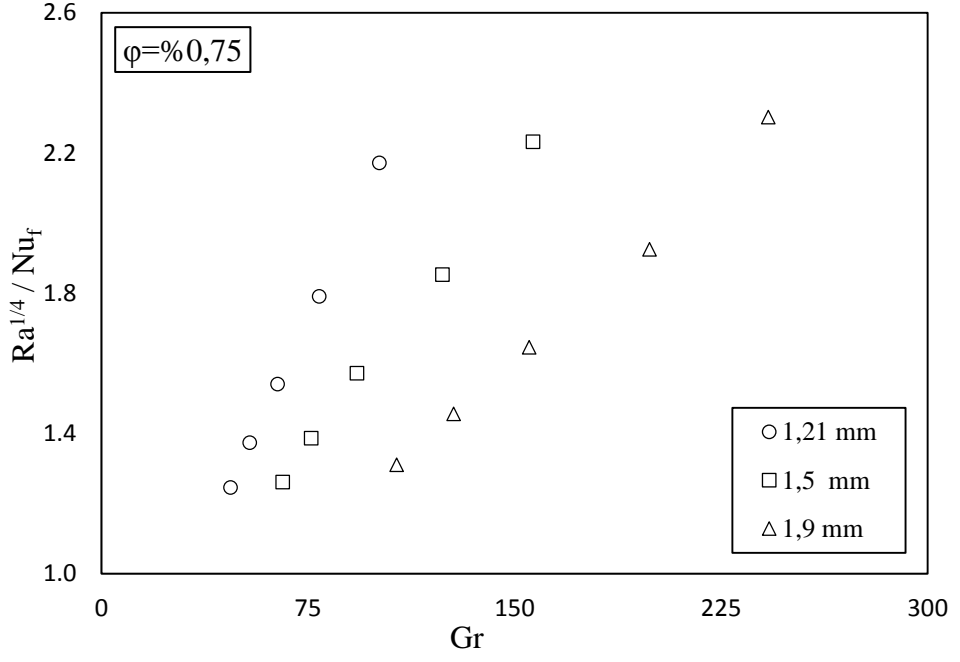


Şekil 4. 35. Saf Su için tüm kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

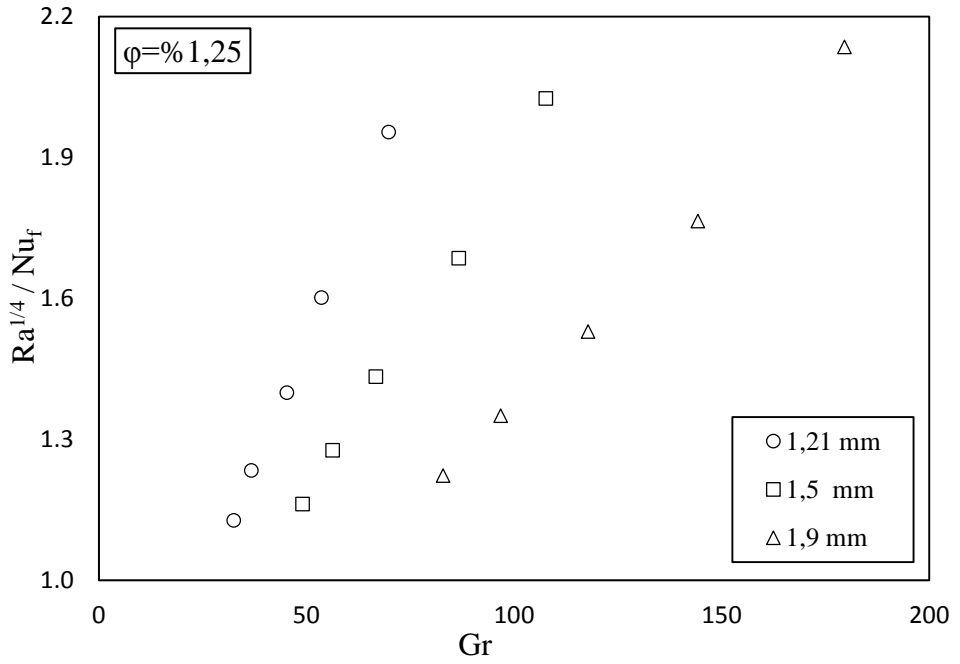


Şekil 4. 36. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $SiO_2$  nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



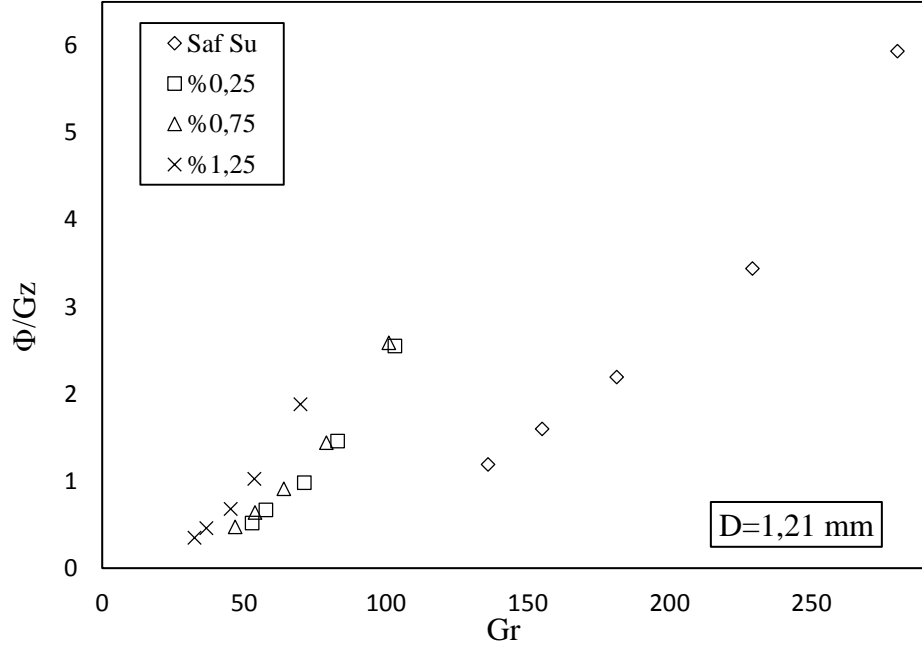
Şekil 4. 37. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $SiO_2$  nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi



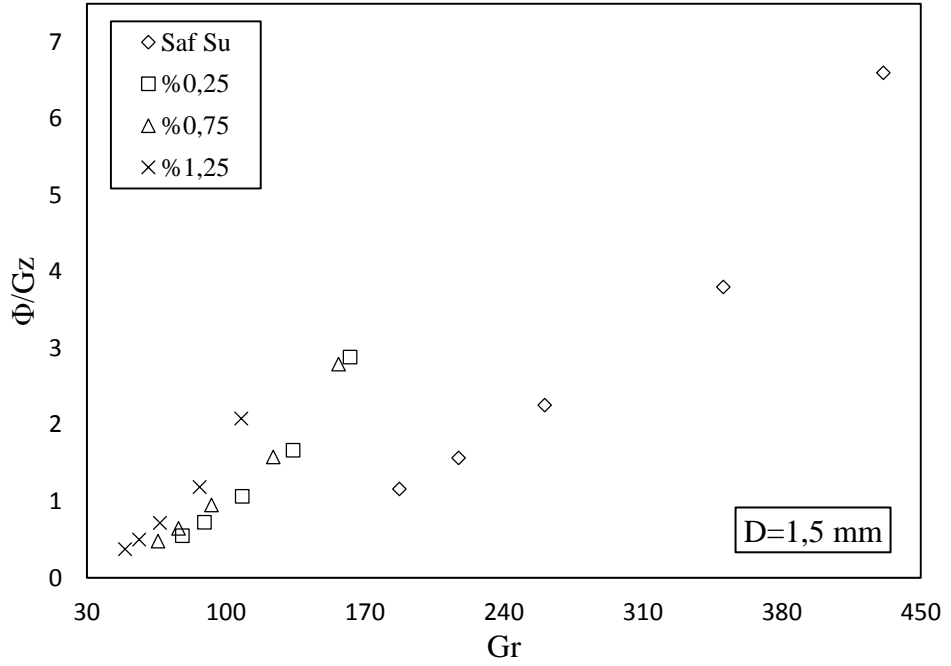
Şekil 4. 38. %1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $SiO_2$  nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi



Şekil 4.32, 4.33 ve 4.34’de her bir kanal çapı için farklı hacimsel partikül oranlarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi; Şekil 4.35, 4.36, 4.37 ve 4.38’te ise her bir hacimsel partikül oranı için farklı kanal çaplarında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Tüm şekillerde Grashof sayısındaki artışla birlikte toplam ısı transferinde doğal taşınım etkilerinin zorlanmış taşınım etkilerine oranı olarak tanımlanan  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin arttığı görülmektedir. Bu artışın tahmin edilen bir sonuç olduğunu söylemek mümkündür. Grashof sayısı akış içerisindeki kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranı olarak ilk bölümde tanımlanmıştı. Grashof sayısındaki artışla birlikte akışkan üzerine etkiyen kaldırma kuvvetleri dolayısıyla doğal taşınım etkileri artmış böylece doğal taşınım etkilerinin zorlanmış taşınım etkilerine oranının ifade eden  $Ra^{1/4}/Nu_f$  terimi artmıştır. Ayrıca Şekil 4.32, 4.33, 4.34 incelendiğinde aynı Grashof sayısı için artan hacimsel partikül oranıyla  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin arttığı görülmektedir. Bu artış Rayleigh sayısındaki artışa bağlı olarak gerçekleşmiştir. Rayleigh sayısı Grashof sayısı ile Prandtl sayısının çarpımıyla elde edilir. Prandtl sayısı viskoz yayınının termal yayınıma oranı olarak tanımlanan bir büyüklüktür. Temel akışkan içerisine nanopartikül ilavesi sonucu akışkan viskozitesinde ısı iletkenliğe kıyasla daha yüksek bir artış meydana gelmiştir. Dolayısıyla nanoakışkanın Prandtl sayısı temel akışkanın Prandtl sayısından yüksek bir değer almıştır. Prandtl sayısındaki artış ise Rayleigh sayısını dolayısıyla doğal taşınım etkilerinin artmasını sağlamıştır. Ayrıca yine Şekil 4.35, 4.36, 4.37 ve 4.38’a bakıldığında zaman tüm iş akışkanlarında aynı Grashof sayısı için kanal çapındaki artışla  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin azaldığı görülmektedir. Bu durum aynı Grashof sayısı için kanal çapındaki artışla zorlanmış taşınım etkilerinin artmasından kaynaklanmaktadır.

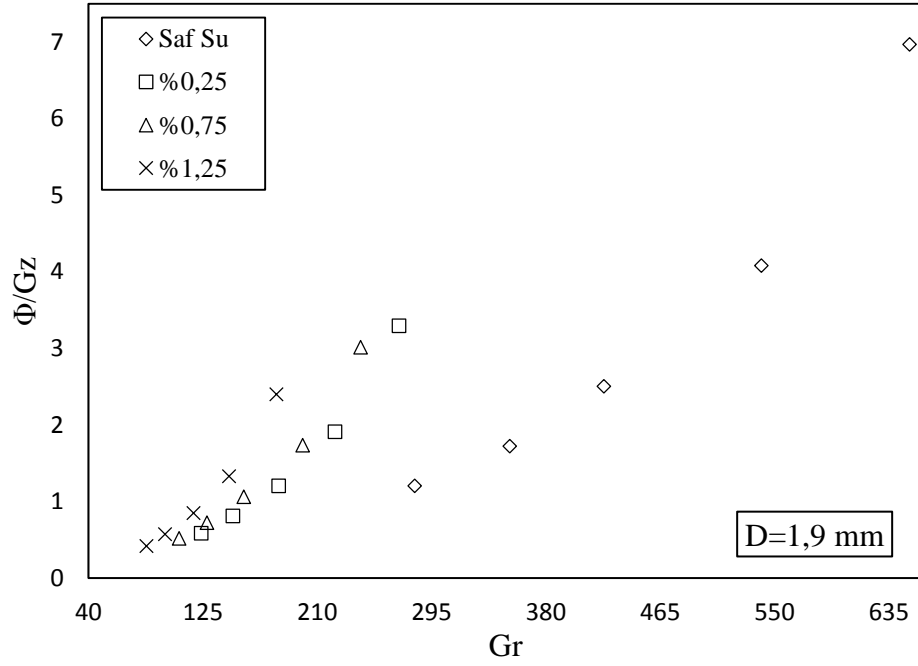


Şekil 4. 39. Kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

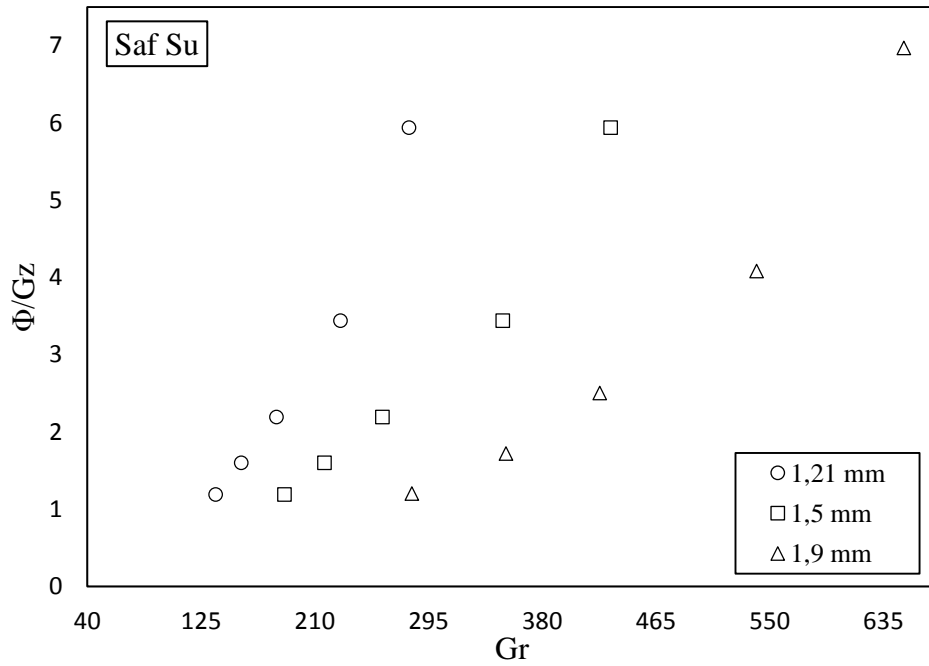


Şekil 4. 40. Kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

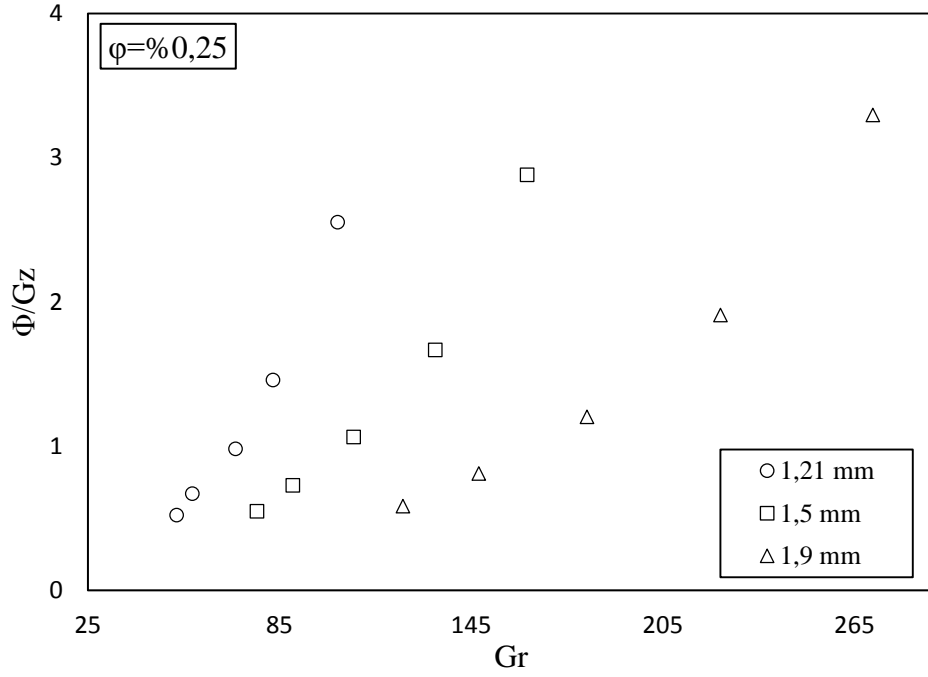


Şekil 4. 41. Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda tüm iş akışkanları için  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

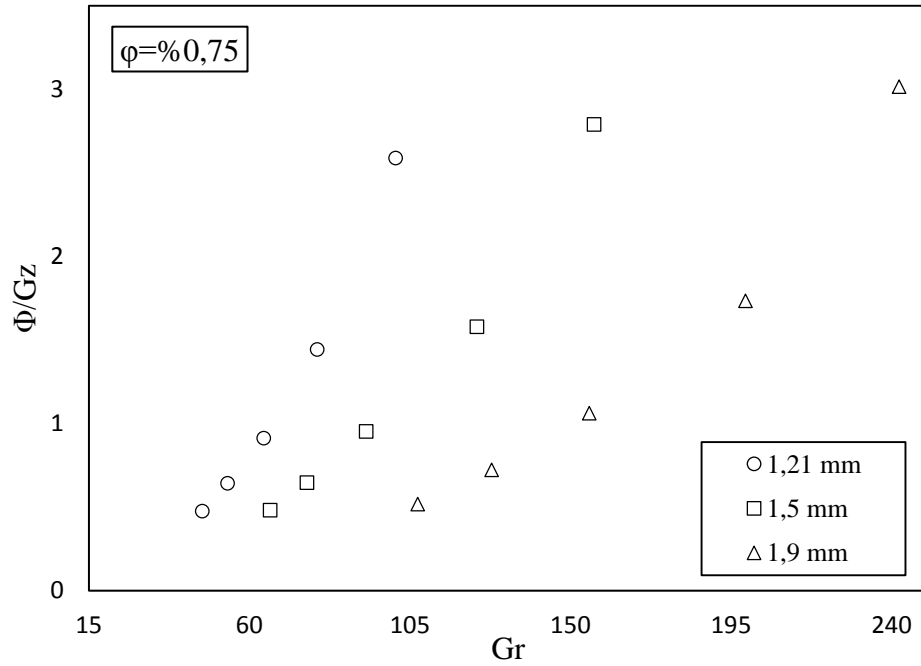


Şekil 4. 42. Saf Su için tüm kanal çaplarında  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

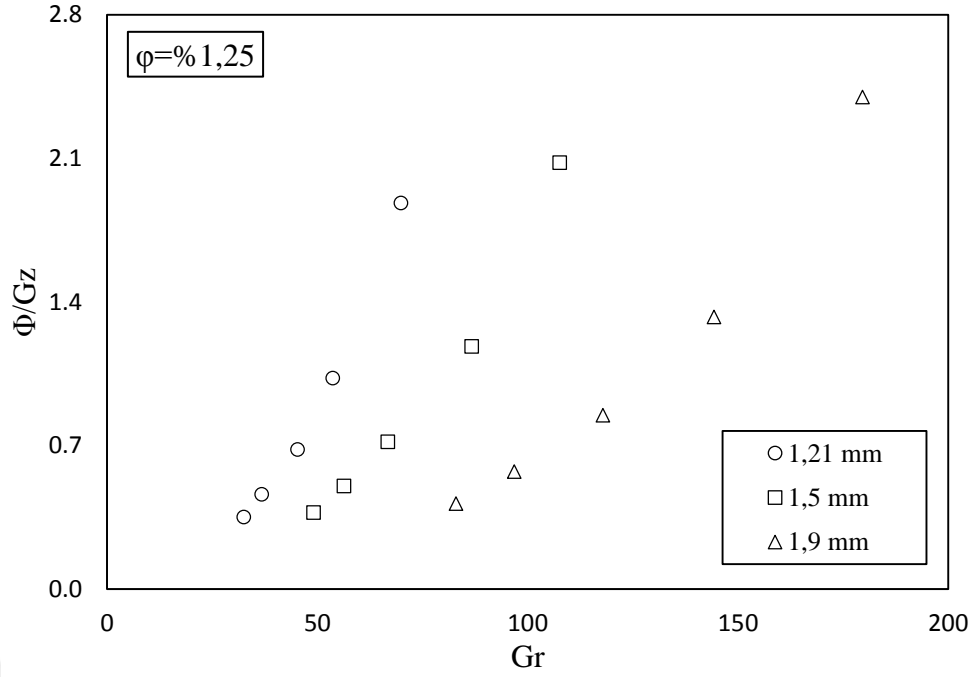
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4. 43. %0,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $\text{SiO}_2$  nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi



Şekil 4. 44. %0,75 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı  $\text{SiO}_2$  nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi



Şekil 4. 45. % 1,25 hacimsel partikül oranındaki saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için tüm kanal çaplarında  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi

Şekil 4.39, 4.40 ve 4.41’de her bir kanal çapı için farklı hacimsel partikül oranlarında  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi; Şekil 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45’te ise her bir hacimsel partikül oranı için farklı kanal çaplarında  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi gösterilmiştir.  $\Phi/Gz$  terimi doğal taşınımın toplam ısı transferine oranını ifade eden bir büyüklük olarak karşımıza çıkmaktadır. Burdan hareketle verilen bir Grashof sayısı için  $\Phi/Gz$  terimi yardımıyla toplam ısı transferine doğal taşınım etkilerinin ne kadar katkıda bulunduğu gözlemlenebilir. Şekil 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45 birlikte incelendiği zaman Grashof sayısındaki artışla tüm hacimsel partikül oranlarında  $\Phi/Gz$  değerinin dolayısıyla doğal taşınım etkilerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca 4.39, 4.40 ve 4.41 incelendiği zaman aynı Grashof sayısı için artan hacimsel partikül oranıyla  $\Phi/Gz$  teriminin arttığı görülmektedir. Hacimsel partikül oranındaki artışın doğal taşınım etkilerine olumlu katkısı Brownian hareketlerine bağlanabilir. Hacimsel partikül oranındaki artışla Brownian hareketleri dolayısıyla doğal taşınım etkileri artmaktadır. Yine Şekil 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45 incelendiğinde kanal çapındaki artışla daha yüksek Grashof sayılarına çıkıldığı ve  $\Phi/Gz$  terimindeki artışın daha belirgin olduğu görülmektedir.

### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmada sırasıyla 1,21 mm, 1,5 mm ve 1,9 mm çapa sahip dairesel kesitli mini kanalda karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmada iş akışkanı olarak sırasıyla saf su ve hacimsel partikül oranları %0,25, %0,75 ve %1,25 olan saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı kullanılmıştır. Deneysel Reynolds sayısının 15-65 olduğu aralıkta gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen önemli çıkarımlar aşağıda sunulmuştur.

10 saat süreyle ultrasonik homojenizatörde dağıtma/karıştırma işlemi uygulanarak hazırlanan nanoakışkanların çökelme ve topaklanma gibi kararlılık problemleri taşımadığı görülmüştür.

Temel akışkan olan saf suya nano ölçekteki SiO<sub>2</sub> partiküllerinin ilave edilmesiyle ısı iletkenlik değerinin arttığı görülmüştür. Burdan yola çıkarak hacimsel partikül oranındaki artışın nanoakışkanların ısı iletkenliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sıcaklıktaki artışla birlikte tüm iş akışkanlarının ısı iletkenlik değerinin arttığı saptanmıştır. Sıcaklığın ısı iletkenlik üzerindeki en belirgin etkisi en yüksek hacimsel partikül oranına sahip nanoakışkan üzerinde meydana gelmiştir.

Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda en yüksek ısı iletkenlik değeri 60°C sıcaklık ve %1,25 hacimsel partikül oranına sahip saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için 0,696 W/m<sup>2</sup>K olarak elde edilmiş ve bu değerle saf suyun ısı iletkenlik değerine göre yaklaşık %14 artış sağlandığı görülmüştür.

Temel akışkan olan saf suya nano ölçekteki SiO<sub>2</sub> partiküllerinin ilave edilmesiyle viskozite değerinin de arttığı görülmüştür. Burdan yola çıkarak hacimsel partikül oranındaki artışın nanoakışkanların viskozitesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sıcaklıktaki artışla birlikte tüm iş akışkanlarının viskozite değerinin azaldığı saptanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan tüm iş akışkanlarının sıcaklığa bağlı viskozite değişiminin benzer eğilimde olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda en yüksek viskozite değeri 20°C sıcaklık ve %1,25 hacimsel partikül oranına sahip saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için 14,8x10<sup>-4</sup> kg/m.s olarak elde edilmiş ve bu değerle saf suyun göre viskozite değerine göre yaklaşık %56 artış sağlandığı görülmüştür.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda saf su için elde edilen ısı transferi verileri literatürde yer alan McAdams, Oliver ve Brown-Thomas modelleri ile karşılaştırılmış ve iyi bir uyum sağlandığı görülmüştür.

Aynı kanal çapı ve Reynolds sayısı için hacimsel partikül oranındaki artışla birlikte ısı taşınım katsayısının arttığı görülmüştür. Hacimsel partikül oranındaki artışla birlikte ısı taşınım katsayısının artmasında en önemli etkinin Brownian hareketinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında kanal çapı 1,21 mm olan minikanalda %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre ısı taşınım katsayısında yaklaşık %13; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %23 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %38 artış meydana geldiği görülmüştür.

Benzer şekilde kanal çapı 1,5 mm olan minikanalda aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre ısı taşınım katsayısında yaklaşık %10; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %24 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %36 artış meydana gelmiştir.

Kanal çapı 1,9 mm olan minikanalda ise yine aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre ısı taşınım katsayısında yaklaşık %12; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %21 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %33 artış meydana geldiği görülmüştür.

İş akışkanının tüm hacimsel partikül oranları için kanal çapındaki artışla birlikte ısı taşınım katsayısının azaldığı görülmüştür.

Aynı kanal çapı ve Reynolds sayısı için hacimsel partikül oranındaki artışla birlikte Nusselt sayısının arttığı görülmüştür.

Aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında kanal çapı 1,21 mm olan mini kanalda %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık %11; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %18 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %31 artış meydana geldiği görülmüştür.

Benzer şekilde kanal çapı 1,5 mm olan mini kanalda aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık %7; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %19 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %29 artış meydana geldiği görülmüştür.

Kanal çapı 1,9 mm olan mini kanalda ise yine aynı Reynolds sayıları göz önüne alındığında %0,25 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık %9; %0,75 hacimsel partikül oranında yaklaşık %16 ve %1,25 hacimsel partikül oranında ise yaklaşık %27 artış meydana geldiği görülmüştür.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda en yüksek Nusselt sayısı 1,9 mm kanal çapı ve %1,25 hacimsel partikül oranına sahip saf su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanı için 5,6 olarak elde edilmiştir.

Farklı hacimsel partikül oranı ve kanal çapı için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi incelenmiş böylece hacimsel partikül oranı sabit tutularak minikanal çapının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. İş akışkanının tüm hacimsel partikül oranları için kanal çapındaki artışla birlikte Nusselt sayısının arttığı görülmüştür.

Aynı Reynolds sayısı ve iş akışkanı göz önüne alınarak değerlendirme yapıldığı zaman kanal çapı 1,21'den 1,5 mm'ye yükseltildiğinde Nusselt sayısındaki en fazla artış ortalama %16 olurken kanal çapı 1,21'den 1,9 mm'ye yükseldiğinde ise Nusselt sayısındaki en fazla artış ortalama %23 olmuştur.



Gerçekleştirilen tüm deneyler için Richardson sayısının 0,01 ile 1,4 arasında kaldığı dolayısıyla etkin ısı transferi mekanizmasının karma taşınım olduğu görülmüştür.

Tüm kanal çapı ve hacimsel partikül oranlarında Richardson sayısındaki artışla Nu sayısında dolayısıyla ısı transferinde azalma görülmüştür. Bu azalmanın artan Richardson sayılarının azalan Reynolds sayıları anlamına geldiği için toplam Nusselt sayısı göz önüne alındığında Reynolds sayısındaki azalmayla zorlanmış taşınım bileşenin azalmasından ötürü meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Toplam ısı transferi göz önüne alındığı zaman, doğal taşınım etkilerinin zorlanmış taşınım etkilerine oranını gösteren  $Ra^{1/4}/Nu_f$  teriminin Reynolds ve Grashof sayıları ile değişimi incelenmiştir. Grashof sayısındaki artışla birlikte doğal taşınım etkilerinin zorlanmış taşınım etkilerine göre baskın olduğu ve Reynolds sayısındaki artışla birlikte zorlanmış taşınım etkilerinin doğal taşınım etkilerine göre baskın olduğu görülmüştür.

Doğal taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin toplam ısı transferine oranını gösteren  $\Phi/Gz$  teriminin Grashof sayısı ile değişimi incelenmiş ve Grashof sayısındaki artışla birlikte doğal taşınım etkilerinin arttığı görülmüştür.

Aynı Grashof sayısı için artan hacimsel partikül oranıyla Brownian hareketi etkilerine bağlı olarak  $\Phi/Gz$  teriminin arttığı ve aynı hacimsel partikül oranı için kanal çapındaki artışla daha yüksek Grashof sayılarına çıkıldığı böylece  $\Phi/Gz$  terimindeki artışın daha belirgin olduğu görülmüştür.

Bu çalışma, kaldırma kuvvetinin etkili olduğu, zorlanmış akışla ilgili detaylı üç özel durum; aynı yönlü (destekleyen akış), karşı yönlü (engelleyen akış) ve dik yönlü (çapraz) hareket göz önüne alındığı zaman dik yönlü (çapraz) hareket durumu için gerçekleştirilmiştir. Sonraki çalışmalarda test bölgesinin farklı açılarda konumlandırılmasıyla aynı yönlü (destekleyen akış) ve karşı yönlü (engelleyen akış) hareket durumları incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- Agarwal, A., Bandhauer, T.M., and Garimella, S. 2010. Measurement and modeling of condensation heat transfer in non-circular microchannels. *International journal of refrigeration*, 33(6): 1169–1179. Elsevier.
- Agopyan, S. 2007. Buzdolaplarında Mikrokanal Dondurucu Bölme Evaporatör Performansının Deneysel Olarak Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Akbari, M., Behzadmehr, A., and Shahraki, F. 2008. Fully developed mixed convection in horizontal and inclined tubes with uniform heat flux using nanofluid. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(2): 545–556. Elsevier.
- Akyürek, E.F. 2014. Nanoakışkanların ve türbülatorlerin iç içe borulu ısı değiştirici ısı performansına etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Erzurum.
- Angayarkanni, S.A., and Philip, J. 2014. Effect of nanoparticles aggregation on thermal and electrical conductivities of nanofluids. *Journal of Nanofluids*, 3(1): 17–25. American Scientific Publishers.
- Angayarkanni, S.A., and Philip, J. 2015. Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments. *Advances in colloid and interface science*, 225: 146–176. Elsevier.
- Anoop, K.B., Kabelac, S., Sundararajan, T., and Das, S.K. 2009. Rheological and flow characteristics of nanofluids: influence of electroviscous effects and particle agglomeration. *Journal of Applied Physics*, 106(3): 34909. AIP.
- Asthana, A., Zinovik, I., Weinmueller, C., and Poulidakos, D. 2011. Significant Nusselt number increase in microchannels with a segmented flow of two immiscible liquids: An experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(7–8): 1456–1464. Elsevier.
- Avsec, J., and Oblak, M. 2007. The calculation of thermal conductivity, viscosity and thermodynamic properties for nanofluids on the basis of statistical nanomechanics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(21–22): 4331–4341. Elsevier.
- Azmi, W.H., Hamid, K.A., Usri, N.A., Mamat, R., and Sharma, K. V. 2016a. Heat transfer augmentation of ethylene glycol: water nanofluids and applications—a review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 75: 13–23. Elsevier.
- Azmi, W.H., Sharma, K. V, Mamat, R., Alias, A.B.S., and Misnon, I.I. 2012. Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. p. 12029.
- Azmi, W.H., Sharma, K. V, Mamat, R., Najafi, G., and Mohamad, M.S. 2016b. The enhancement of effective thermal conductivity and effective dynamic viscosity of nanofluids—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 1046–1058. Elsevier.
- Azmi, W.H., Sharma, K. V, Sarma, P.K., Mamat, R., and Anuar, S. 2014a. Comparison of convective heat transfer coefficient and friction factor of TiO<sub>2</sub> nanofluid flow in a tube with twisted tape inserts. *International Journal of Thermal Sciences*, 81: 84–93. Elsevier.
- Azmi, W.H., Sharma, K. V, Sarma, P.K., Mamat, R., Anuar, S., and Rao, V.D. 2013. Experimental determination of turbulent forced convection heat transfer and friction factor with SiO<sub>2</sub> nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51: 103–111. Elsevier.

- Azmi, W.H., Sharma, K. V, Sarma, P.K., Mamat, R., and Najafi, G. 2014b. Heat transfer and friction factor of water based TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> nanofluids under turbulent flow in a tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 59: 30–38. Elsevier.
- Balandin, A.A. 2011. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials. *Nature materials*, 10(8): 569. Nature Publishing Group.
- Batchelor, G.K. 1977. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of fluid mechanics*, 83(1): 97–117. Cambridge University Press.
- Bavière, R., Favre-Marinet, M., and Le Person, S. 2006. Bias effects on heat transfer measurements in microchannel flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(19–20): 3325–3337. Elsevier.
- Beck, M.P., Yuan, Y., Warriar, P., and Teja, A.S. 2009. The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 11(5): 1129–1136. Springer.
- Ben-Abdallah, P. 2006. Heat transfer through near-field interactions in nanofluids. *Applied physics letters*, 89(11): 113117. AIP.
- Berber, S., Kwon, Y.-K., and Tománek, D. 2000. Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes. *Physical review letters*, 84(20): 4613. APS.
- Bertsch, S.S., Groll, E.A., and Garimella, S. V. 2009. Effects of heat flux, mass flux, vapor quality, and saturation temperature on flow boiling heat transfer in microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 35(2): 142–154. Elsevier.
- Bhattacharya, P., Saha, S.K., Yadav, A., Phelan, P.E., and Prasher, R.S. 2004. Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 95(11): 6492–6494. AIP.
- Bogojevic, D., Sefiane, K., Walton, A.J., Lin, H., Cummins, G., Kenning, D.B.R., and Karayiannis, T.G. 2011. Experimental investigation of non-uniform heating effect on flow boiling instabilities in a microchannel-based heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(3): 309–324. Elsevier.
- Braginsky, L., and Shklover, V. 2008. Thermal conductivity of low-particle-concentration suspensions: Correlation function approach. *Physical Review B*, 78(22): 224205. APS.
- Branson, B.T., Beauchamp, P.S., Beam, J.C., Lukehart, C.M., and Davidson, J.L. 2013. Nanodiamond nanofluids for enhanced thermal conductivity. *Acs Nano*, 7(4): 3183–3189. ACS Publications.
- Brinkman, H.C. 1952. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20(4): 571. AIP.
- Brown, C.K., and Gauvin, W.H. 1965. Combined free-and-forced convection: I. Heat transfer in aiding flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 43(6): 306–312. Wiley Online Library.
- Bruggeman, V.D.A.G. 1935. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Annalen der physik*, 416(7): 636–664. Wiley Online Library.
- De Bruijn, H. 1942. The viscosity of suspensions of spherical particles.(The fundamental  $\eta$ -c and  $\phi$  relations). *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, 61(12): 863–874. Wiley Online Library.

- Buongiorno, J., Venerus, D.C., Prabhat, N., McKrell, T., Townsend, J., Christianson, R., Tolmachev, Y. V., Keblinski, P., Hu, L., and Alvarado, J.L. 2009. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 106(9): 94312. AIP.
- Callister, W.D.W. d W.D., Rethwisch, D.G.D. g, and Wiley, J. 2014. *Materials science and engineering: an introduction*. *Materials Science and Engineering*, 7(6058): 266–267. doi:10.1016/0025-5416(87)90343-0.
- Celata, G.P., Saha, S.K., Zummo, G., and Dossevi, D. 2010. Heat transfer characteristics of flow boiling in a single horizontal microchannel. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(7): 1086–1094. Elsevier.
- Cengel, Y. 2014. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. McGraw-Hill Higher Education.
- Çetin, M. 2010. Design and experimental investigation of a microchannel heat exchanger. M. Sc, METU,.
- Chandrasekar, M., Suresh, S., and Bose, A.C. 2010. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(2): 210–216. Elsevier.
- Chandrasekar, M., Suresh, S., Srinivasan, R., and Bose, A.C. 2009. New analytical models to investigate thermal conductivity of nanofluids. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 9(1): 533–538. American Scientific Publishers.
- Chang, C.-W., Han, W.-Q., and Zettl, A. 2005. Thermal conductivity of BCN and BN nanotubes. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 23(5): 1883–1886. AVS.
- Che, J., Cagin, T., and Goddard III, W.A. 2000. Thermal conductivity of carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 11(2): 65. IOP Publishing.
- Chen, C.-H., and Ding, C.-Y. 2011. Study on the thermal behavior and cooling performance of a nanofluid-cooled microchannel heat sink. *International journal of thermal sciences*, 50(3): 378–384. Elsevier.
- Chen, G., Yu, W., Singh, D., Cookson, D., and Routbort, J. 2008a. Application of SAXS to the study of particle-size-dependent thermal conductivity in silica nanofluids. *Journal of Nanoparticle research*, 10(7): 1109–1114. Springer.
- Chen, H., Ding, Y., and Lapkin, A. 2009a. Rheological behaviour of nanofluids containing tube/rod-like nanoparticles. *Powder Technology*, 194(1–2): 132–141. Elsevier.
- Chen, L., Xie, H., Li, Y., and Yu, W. 2008b. Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. *Thermochimica Acta*, 477(1–2): 21–24. Elsevier.
- Chen, Y., Wu, R., Shi, M., Wu, J., and Peterson, G.P. 2009b. Visualization study of steam condensation in triangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(21–22): 5122–5129. Elsevier.
- Chen, Y., Zhang, C., Shi, M., and Wu, J. 2009c. Three-dimensional numerical simulation of heat and fluid flow in noncircular microchannel heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(9): 917–920. Elsevier.
- Cherif, A.S., Kassim, M.A., Benhamou, B., Harmand, S., Corriou, J.P., and Jabrallah, S. Ben. 2011. Experimental and numerical study of mixed convection heat and mass transfer in a vertical channel with film evaporation. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(6): 942–953. Elsevier.

- Chiu, H.-C., Jang, J.-H., Yeh, H.-W., and Wu, M.-S. 2011. The heat transfer characteristics of liquid cooling heatsink containing microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1–3): 34–42. Elsevier.
- Cho, T., Baek, I., Lee, J., and Park, S. 2005. Preparation of Nanofluids Containing Suspended Silver Particles for Enhancing Fluid Thermal Conductivity of Fluids. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 11(3): 400–406. Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry/한국공업화학회.
- Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu, W.L., Lockwood, F.E., and Grulke, E.A. 2001. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Applied physics letters*, 79(14): 2252–2254. AIP.
- Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P., and Choi, S.U.S. 2005. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*, 87(15): 153107. AIP.
- Chong, D., Liu, J., Yan, J., and Zhou, Z. 2007. Experimental investigation of mixed convection in a rectangular duct with a heated plate in the middle of cross section. *Heat and Mass Transfer*, 43(12): 1283. Springer.
- 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. Elsevier.
- Chou, F. 1990. Laminar mixed convection in the thermal entrance region of horizontal rectangular channels with uniform heat input axially and uniform wall temperature circumferentially. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68(4): 577–584. Wiley Online Library.
- Chou, F.C., and Hwang, G.J. 1986. Prandtl number effect on combined free and forced laminar convection in the thermal entrance region of a horizontal rectangular channel. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64(5): 858–861. Wiley Online Library.
- Çomaklı, Ö., Yılmaz, M., Bedir, Ö., and Şahin, B. 2007. Isı Transfer İyileştirmesinin İki Fazlı Akış Kararsızlıklarına Etkisi. *Mühendis Ve Makina*, 48(565): 9–17.
- Corcione, M. 2011. Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 52(1): 789–793. Elsevier.
- Corcione, M., Cianfrini, M., and Quintino, A. 2012. Heat transfer of nanofluids in turbulent pipe flow. *International Journal of Thermal Sciences*, 56: 58–69. Elsevier.
- Das, S.K., Putra, N., and Roetzel, W. 2003. Pool boiling characteristics of nano-fluids. *International journal of heat and mass transfer*, 46(5): 851–862. Elsevier.
- Daungthongsuk, W., and Wongwises, S. 2007. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. 11: 797–817. doi:10.1016/j.rser.2005.06.005.
- Depew, C.A., and August, S.E. 1971. Heat transfer due to combined free and forced convection in a horizontal and isothermal tube. *Journal of Heat Transfer*, 93(4): 380–384. American Society of Mechanical Engineers.
- Diaz, M.C., and Schmidt, J. 2007. Experimental investigation of transient boiling heat transfer in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(1): 95–102. Elsevier.
- Ding, Y., Alias, H., Wen, D., and Williams, R.A. 2006. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(1–2): 240–250. Elsevier.
- Dodd, A.E., Murfin, D., and (Firm), K. 1994. *Dictionary of ceramics*, 3rd ed. Institute of Materials, London.

- Dogan, M., and Sivrioglu, M. 2010. Experimental investigation of mixed convection heat transfer from longitudinal fins in a horizontal rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(9–10): 2149–2158. Elsevier.
- Domingues, G., Volz, S., Joulain, K., and Greffet, J.-J. 2005. Heat transfer between two nanoparticles through near field interaction. *Physical review letters*, 94(8): 85901. APS.
- Duangthongsuk, W., and Wongwises, S. 2009. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids. *Experimental thermal and fluid science*, 33(4): 706–714. Elsevier.
- Duangthongsuk, W., and Wongwises, S. 2010. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1–3): 334–344. Elsevier.
- Duclaux, L., Nysten, B., Issi, J.P., and Moore, A.W. 1992. Structure and low-temperature thermal conductivity of pyrolytic boron nitride. *Physical Review B*, 46(6): 3362. APS.
- Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L.J. 2001. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied physics letters*, 78(6): 718–720. AIP.
- Eastman, J.A., Choi, U.S., Li, S., Thompson, L.J., and Lee, S. 1996. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 457. Cambridge University Press.
- Einstein, A. 1906. Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. *Annalen der Physik*, 324(2): 289–306. Wiley Online Library.
- Emami-Meibodi, M., Vafaie-Sefti, M., Rashidi, A.M., Amrollahi, A., Tabasi, M., and Sid-Kalal, H. 2010. A model for thermal conductivity of nanofluids. *Materials Chemistry and Physics*, 123(2–3): 639–643. Elsevier.
- Ergu, O.B., Sara, O.N., Yapıcı, S., and Arzutug, M.E. 2009. Pressure drop and point mass transfer in a rectangular microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(6): 618–623. Elsevier.
- Esfe, M.H., Saedodin, S., Wongwises, S., and Toghraie, D. 2015. An experimental study on the effect of diameter on thermal conductivity and dynamic viscosity of Fe/water nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119(3): 1817–1824. Springer.
- Evans, W., Fish, J., and Keblinski, P. 2006. Role of Brownian motion hydrodynamics on nanofluid thermal conductivity. *Applied Physics Letters*, 88(9): 93116. AIP.
- Evans, W., Prasher, R., Fish, J., Meakin, P., Phelan, P., and Keblinski, P. 2008. Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(5–6): 1431–1438. Elsevier.
- Fang, C., David, M., Wang, F., and Goodson, K.E. 2010. Influence of film thickness and cross-sectional geometry on hydrophilic microchannel condensation. *International journal of multiphase flow*, 36(8): 608–619. Elsevier.
- Feng, Y., Yu, B., Xu, P., and Zou, M. 2007. The effective thermal conductivity of nanofluids based on the nanolayer and the aggregation of nanoparticles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(10): 3164. IOP Publishing.
- Feng, Z.-Z., and Li, W. 2013. Laminar mixed convection of large-Prandtl-number in-tube nanofluid flow, Part I: Experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56: 919–927. Elsevier.

- Fotukian, S.M., and Esfahany, M.N. 2010. Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(2): 214–219. Elsevier.
- Frankel, N.A., and Acrivos, A. 1967. On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres. *Chemical Engineering Science*, 22(6): 847–853. Elsevier.
- García-Hernando, N., Acosta-Iborra, A., Ruiz-Rivas, U., and Izquierdo, M. 2009. Experimental investigation of fluid flow and heat transfer in a single-phase liquid flow micro-heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(23–24): 5433–5446. Elsevier.
- Geliş, K. 2013. Şerit eleman kullanılan bir ısı değiştiricide nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümünün incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Erzurum.
- Ghosh, dS, Calizo, I., Teweldebrhan, D., Pokatilov, E.P., Nika, D.L., Balandin, A.A., Bao, W., Miao, F., and Lau, C.N. 2008. Extremely high thermal conductivity of graphene: Prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits. *Applied Physics Letters*, 92(15): 151911. AIP.
- Godfrey, D., and Herguth, W.R. 1995. Physical and chemical properties of industrial mineral oils affecting lubrication. *Lubrication engineering*, 51(10).
- Godson, L., Raja, B., Lal, D.M., and Wongwises, S. 2010. Experimental investigation on the thermal conductivity and viscosity of silver-deionized water nanofluid. *Experimental Heat Transfer*, 23(4): 317–332. Taylor & Francis.
- Graham, A.L. 1981. On the viscosity of suspensions of solid spheres. *Applied Scientific Research*, 37(3–4): 275–286. Springer.
- Gupte, S.K., Advani, S.G., and Huq, P. 1995. Role of micro-convection due to non-affine motion of particles in a mono-disperse suspension. *International journal of heat and mass transfer*, 38(16): 2945–2958. Elsevier.
- Hadadian, M., Samiee, S., Ahmadzadeh, H., and Goharshadi, E.K. 2013. Nanofluids for heat transfer enhancement—a review. *Physical chemistry research*, 1(1): 1–33. Iranian Chemical Society.
- Hamilton, R.L., and Crosser, O.K. 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, 1(3): 187–191. ACS Publications.
- Hammerschmidt, U., and Meier, V. 2006. New transient hot-bridge sensor to measure thermal conductivity, thermal diffusivity, and volumetric specific heat. *International Journal of Thermophysics*, 27(3): 840–865. Springer.
- Harirchian, T., and Garimella, S. V. 2008. Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(15–16): 3724–3735. Elsevier.
- Hashin, Z., and Shtrikman, S. 1962. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. *Journal of applied Physics*, 33(10): 3125–3131. AIP.
- Hasselman, D.P.H., and Johnson, L.F. 1987. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance. *Journal of Composite Materials*, 21(6): 508–515. Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA.
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., and Lu, H. 2007. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International journal of heat and mass transfer*, 50(11–12): 2272–2281. Elsevier.

- Heris, S.Z., Esfahany, M.N., and Etemad, S.G. 2007. Experimental investigation of convective heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in circular tube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(2): 203–210. Elsevier.
- Heris, S.Z., Etemad, S.G., and Esfahany, M.N. 2006. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33(4): 529–535. Elsevier.
- Ho, C.-J., Wei, L.C., and Li, Z.W. 2010. An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 30(2–3): 96–103. Elsevier.
- Hong, H., Zheng, Y., and Roy, W. 2007. Nanomaterials for efficiently lowering the freezing point of anti-freeze coolants. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 7(9): 3180–3184. American Scientific Publishers.
- Hong, T.-K., Yang, H.-S., and Choi, C.J. 2005. Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 97(6): 64311. AIP.
- Hung, T.-C., and Yan, W.-M. 2012. Enhancement of thermal performance in double-layered microchannel heat sink with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(11–12): 3225–3238. Elsevier.
- Hwang, K.S., Jang, S.P., and 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 and mass transfer*, 52(1–2): 193–199. Elsevier.
- Hwang, Y., Lee, J.K., Lee, C.H., Jung, Y.M., Cheong, S.I., Lee, C.G., Ku, B.C., and Jang, S.P. 2007. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. *Thermochimica Acta*, 455(1–2): 70–74. Elsevier.
- Hwang, Y.J., Ahn, Y.C., Shin, H.S., Lee, C.G., Kim, G.T., Park, H.S., and Lee, J.K. 2006. Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. *Current Applied Physics*, 6(6): 1068–1071. Elsevier.
- Iijima, S. 1991. Helical microtubules of graphitic carbon. *nature*, 354(6348): 56. Nature Publishing Group.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., and Derbentli, T. 2010. Isı ve kütle geçişinin temelleri. *Literatür Yayıncılık*.
- Islam, N., Gaitonde, U.N., and Sharma, G.K. 2001. Mixed convection heat transfer in the entrance region of horizontal annuli. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(11): 2107–2120. Elsevier.
- Izadi, M., Shahmardan, M.M., Maghrebi, M.J., and Behzadmehr, A. 2013. Numerical study of developed laminar mixed convection of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in an annulus. *Chemical Engineering Communications*, 200(7): 878–894. Taylor & Francis.
- James, F., Shackelford, E.J.F., and Alexander, W. 2001. *Materials Science Engineering Hand Book. In Materials Science and Engineering Handbook.* doi:10.1126/science.232.4757.1485.
- Jana, S., Salehi-Khojin, A., and Zhong, W.-H. 2007. Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition of single and hybrid nano-additives. *Thermochimica acta*, 462(1–2): 45–55. Elsevier.
- Jang, S.P., and Choi, S.U.S. 2004. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. *Applied physics letters*, 84(21): 4316–4318. AIP.
- Jang, S.P., and Choi, S.U.S. 2006. Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 26(17–18): 2457–2463. Elsevier.
- Ji, Y., Yuan, K., and Chung, J.N. 2006. Numerical simulation of wall roughness on gaseous flow and heat transfer in a microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(7–8): 1329–1339. Elsevier.



- Jiang, H., Xu, Q., Huang, C., and Shi, L. 2015. Effect of temperature on the effective thermal conductivity of n-tetradecane-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Particuology*, 22: 95–99. Elsevier.
- Jung, J.-Y., Oh, H.-S., and Kwak, H.-Y. 2009. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(1–2): 466–472. Elsevier.
- Kakaç, S., and Pramuanjaroenkij, A. 2016. Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids—a state-of-the-art review. *International Journal of Thermal Sciences*, 100: 75–97. Elsevier.
- Kalteh, M. 2013. Investigating the effect of various nanoparticle and base liquid types on the nanofluids heat and fluid flow in a microchannel. *Applied Mathematical Modelling*, 37(18–19): 8600–8609. Elsevier.
- Kandlikar, S., Garimella, S., Li, D., Colin, S., and King, M.R. 2005. Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. Elsevier.
- Kandlikar, S.G. 2002. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(2–4): 389–407. Elsevier.
- Kang, H.U., Kim, S.H., and Oh, J.M. 2006. Estimation of thermal conductivity of nanofluid using experimental effective particle volume. *Experimental Heat Transfer*, 19(3): 181–191. Taylor & Francis.
- Keblinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S., and Eastman, J.A. 2002. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). *International journal of heat and mass transfer*, 45(4): 855–863. Elsevier.
- Keblinski, P., Prasher, R., and Eapen, J. 2008. Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over? *Journal of Nanoparticle research*, 10(7): 1089–1097. Springer.
- Kihm, K.D., Chon, C.H., Lee, J.S., and Choi, S.U.S. 2011. A new heat propagation velocity prevails over Brownian particle velocities in determining the thermal conductivities of nanofluids. *Nanoscale research letters*, 6(1): 361. Springer.
- Kim, D., Kwon, Y., Cho, Y., Li, C., Cheong, S., Hwang, Y., Lee, J., Hong, D., and Moon, S. 2009. Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions. *Current Applied Physics*, 9(2): e119–e123. Elsevier.
- Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., and McEuen, P.L. 2001. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. *Physical review letters*, 87(21): 215502. APS.
- Kim, S.H., Choi, S.R., and Kim, D. 2007. Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: particle size dependence and effect of laser irradiation. *Journal of Heat Transfer*, 129(3): 298–307. American Society of Mechanical Engineers.
- Kohl, M.J., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S.M., and Sadowski, D.L. 2005. An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements. *International journal of heat and mass transfer*, 48(8): 1518–1533. Elsevier.
- Kole, M., and Dey, T.K. 2010. Thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid based on car engine coolant. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(31): 315501. IOP Publishing.
- Koşar, A. 2010. Effect of substrate thickness and material on heat transfer in microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(4): 635–642. Elsevier.
- Krato, H.W., and Heath, J.R. 1985. O'Brien, SC, Curl, RF & Smalley, RE. *Nature*, 318: 162–163.
- Krieger, I.M., and Dougherty, T.J. 1959. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the Society of Rheology*, 3(1): 137–152. SOR.

- Kumar, D.H., Patel, H.E., Kumar, V.R.R., Sundararajan, T., Pradeep, T., and Das, S.K. 2004. Model for heat conduction in nanofluids. *Physical Review Letters*, 93(14): 144301. APS.
- Lee, D. 2007. Thermophysical properties of interfacial layer in nanofluids. *Langmuir*, 23(11): 6011–6018. ACS Publications.
- Lee, J.-H., Hwang, K.S., Jang, S.P., Lee, B.H., Kim, J.H., Choi, S.U.S., and Choi, C.J. 2008. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(11–12): 2651–2656. Elsevier.
- Lee, J., and Mudawar, I. 2007. Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(3–4): 452–463. Elsevier.
- Lee, P.-S., Garimella, S. V, and Liu, D. 2005. Investigation of heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(9): 1688–1704. Elsevier.
- 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.
- Lee, S.W., Park, S.D., Kang, S., Bang, I.C., and Kim, J.H. 2011. Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1–3): 433–438. Elsevier.
- Leong, K.C., Yang, C., and Murshed, S.M.S. 2006. A model for the thermal conductivity of nanofluids—the effect of interfacial layer. *Journal of nanoparticle research*, 8(2): 245–254. Springer.
- Li, C.H., and Peterson, G.P. 2007. Mixing effect on the enhancement of the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(23–24): 4668–4677. Elsevier.
- Li, Q., Xuan, Y., and Wang, J. 2005. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30(2): 109–116. Elsevier.
- Li, W., and Feng, Z.-Z. 2013. Laminar mixed convection of large-Prandtl-number in-tube nanofluid flow, Part II: Correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65: 928–935. Elsevier.
- Li, Y., Tung, S., Schneider, E., and Xi, S. 2009. A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology*, 196(2): 89–101. Elsevier.
- Lindsay, L., and Broido, D.A. 2012. Theory of thermal transport in multilayer hexagonal boron nitride and nanotubes. *Physical Review B*, 85(3): 35436. APS.
- Liu, M.-S., Lin, M.C.-C., Huang, I.-T., and Wang, C.-C. 2005. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. *International communications in heat and mass transfer*, 32(9): 1202–1210. Elsevier.
- Liu, M.-S., Lin, M.C.-C., Tsai, C.Y., and Wang, C.-C. 2006. Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(17–18): 3028–3033. Elsevier.
- Lundgren, T.S. 1972. Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, 51(2): 273–299. Cambridge University Press.
- Ma, L., Wang, J., Marconnet, A.M., Barbaty, A.C., McKinley, G.H., Liu, W., and Chen, G. 2014. Viscosity and thermal conductivity of stable graphite suspensions near percolation. *Nano letters*, 15(1): 127–133. ACS Publications.

- Mahbubul, I.M., Saidur, R., and Amalina, M.A. 2012. Latest developments on the viscosity of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(4): 874–885. Elsevier.
- Mahbubul, I.M., Saidur, R., and Amalina, M.A. 2013. Influence of particle concentration and temperature on thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/R141b nanorefrigerant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 43: 100–104. Elsevier.
- Mariano, A., Pastoriza-Gallego, M.J., Lugo, L., Mussari, L., and Piñeiro, M.M. 2015. Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ethylene glycol-based nanofluids: thermal conductivity, viscosity and high pressure density. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85: 54–60. Elsevier.
- Marquis, F.D.S., and Chibante, L.P.F. 2005. Improving the heat transfer of nanofluids and nanolubricants with carbon nanotubes. *Jom*, 57(12): 32–43. Springer.
- Masoumi, N., Sohrabi, N., and Behzadmehr, A. 2009. A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(5): 55501. IOP Publishing.
- Masuda, H., Ebata, A., and Teramae, K. 1993. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles. *Netsu Bussei*.
- Matos, D., and Valerio, C. 2009. *Fluid Mechanics and Pipe Flow: Turbulence, Simulation and Dynamics*.
- Maxwell, J.C. 1881. *A treatise on electricity and magnetism*. Clarendon press.
- Megahed, A. 2011. Experimental investigation of flow boiling characteristics in a cross-linked microchannel heat sink. *International Journal of Multiphase Flow*, 37(4): 380–393. Elsevier.
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S.T., Kazi, S.N., Mehrali, M., Zubir, M.N.B.M., and Metselaar, H.S.C. 2014a. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets. *Nanoscale research letters*, 9(1): 15. Springer.
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S.T., Mehrali, M., Togun, H., Zubir, M.N.M., Kazi, S.N., and Metselaar, H.S.C. 2014b. Preparation, characterization, viscosity, and thermal conductivity of nitrogen-doped graphene aqueous nanofluids. *Journal of materials science*, 49(20): 7156–7171. Springer.
- Mirmasoumi, S., and Behzadmehr, A. 2008. Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model. *Applied Thermal Engineering*, 28(7): 717–727. Elsevier.
- Mlcak, J.D., Anand, N.K., and Rightley, M.J. 2008. Three-dimensional laminar flow and heat transfer in a parallel array of microchannels etched on a substrate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(21–22): 5182–5191. Elsevier.
- Mohammed, H.A. 2009. The effect of different inlet geometries on laminar flow combined convection heat transfer inside a horizontal circular pipe. *Applied Thermal Engineering*, 29(2–3): 581–590. Elsevier.
- Mokrani, O., Bourouga, B., Castelain, C., and Peerhossaini, H. 2009. Fluid flow and convective heat transfer in flat microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(5–6): 1337–1352. Elsevier.
- Mooney, M. 1951. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *Journal of colloid science*, 6(2): 162–170. Elsevier.

- Murshed, S.M.S., Leong, K.C., and Yang, C. 2005. Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>—water based nanofluids. *International Journal of thermal sciences*, 44(4): 367–373. Elsevier.
- Murshed, S.M.S., Leong, K.C., and Yang, C. 2008. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(5): 560–568. Elsevier.
- Namburu, P.K., Kulkarni, D.P., Dandekar, A., and Das, D.K. 2007a. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids. *Micro & Nano Letters*, 2(3): 67–71. IET.
- Namburu, P.K., Kulkarni, D.P., Misra, D., and Das, D.K. 2007b. Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2): 397–402. Elsevier.
- Ngo, T.L., Kato, Y., Nikitin, K., and Ishizuka, T. 2007. Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with S-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2): 560–570. Elsevier.
- Nguyen, C.T., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S., and Mintsa, H.A. 2008. Viscosity data for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? *International Journal of Thermal Sciences*, 47(2): 103–111. Elsevier.
- Nguyen, C.T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S., and Mintsa, H.A. 2007a. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids—hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(6): 1492–1506. Elsevier.
- Nguyen, C.T., Roy, G., Gauthier, C., and Galanis, N. 2007b. Heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—water nanofluid for an electronic liquid cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 27(8–9): 1501–1506. Elsevier.
- Niazmand, H., Renksizbulut, M., and Saeedi, E. 2008. Developing slip-flow and heat transfer in trapezoidal microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(25–26): 6126–6135. Elsevier.
- Nie, C., Marlow, W.H., and Hassan, Y.A. 2008. Discussion of proposed mechanisms of thermal conductivity enhancement in nanofluids. *International Journal of heat and Mass transfer*, 51(5–6): 1342–1348. Elsevier.
- Nielsen, L.E. 1970. Generalized equation for the elastic moduli of composite materials. *Journal of Applied Physics*, 41(11): 4626–4627. AIP.
- Osman, M.A., and Srivastava, D. 2001. Temperature dependence of the thermal conductivity of single-wall carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 12(1): 21. IOP Publishing.
- Owhaib, W., Martín-Callizo, C., and Palm, B. 2004. Evaporative heat transfer in vertical circular microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 24(8–9): 1241–1253. Elsevier.
- Özerinç, S., Yazıcıoğlu, A.G., and Kakaç, S. 2010. Convective Heat Transfer Enhancement With Nanofluids: The Effect of Temperature-Variable Thermal Conductivity. *In ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. American Society of Mechanical Engineers. pp. 719–731.
- Pak, B.C., and Cho, Y.I. 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11(2): 151–170. Taylor & Francis.

- Pang, C., Jung, J.-Y., Lee, J.W., and Kang, Y.T. 2012. Thermal conductivity measurement of methanol-based nanofluids with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21–22): 5597–5602. Elsevier.
- Parekh, K., and Lee, H.S. 2010. Magnetic field induced enhancement in thermal conductivity of magnetite nanofluid. *Journal of Applied Physics*, 107(9): 09A310. AIP.
- Park, H.S., and Punch, J. 2008. Friction factor and heat transfer in multiple microchannels with uniform flow distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(17–18): 4535–4543. Elsevier.
- Pastoriza-Gallego, M.J., Casanova, C., Legido, J.L. al, and Piñeiro, M.M. 2011. CuO in water nanofluid: influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity. *Fluid Phase Equilibria*, 300(1–2): 188–196. Elsevier.
- Pastoriza-Gallego, M.J., Casanova, C., Páramo, R., Barbés, B., Legido, J.L., and Piñeiro, M.M. 2009. A study on stability and thermophysical properties (density and viscosity) of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in water nanofluid. *Journal of Applied Physics*, 106(6): 64301. AIP.
- Patel, H.E., Das, S.K., Sundararajan, T., Sreekumaran Nair, A., George, B., and 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(14): 2931–2933. AIP.
- Patel, H.E., Sundararajan, T., and Das, S.K. 2010. An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(3): 1015–1031. Springer.
- Peimyoo, N., Shang, J., Yang, W., Wang, Y., Cong, C., and Yu, T. 2015. Thermal conductivity determination of suspended mono-and bilayer WS<sub>2</sub> by Raman spectroscopy. *Nano Research*, 8(4): 1210–1221. Springer.
- Perry, R.H., and Green, D.W. 2008. Perry's Chemical Engineers' Handbook. *In* The effects of brief mindfulness intervention on acute pain experience: An examination of individual difference. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Ponmani, S., William, J.K.M., Samuel, R., Nagarajan, R., and Sangwai, J.S. 2014. Formation and characterization of thermal and electrical properties of CuO and ZnO nanofluids in xanthan gum. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 443: 37–43. Elsevier.
- Prasher, R., Bhattacharya, P., and Phelan, P.E. 2005. Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluids). *Physical review letters*, 94(2): 25901. APS.
- Prasher, R., Phelan, P.E., and Bhattacharya, P. 2006. Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid). *Nano letters*, 6(7): 1529–1534. ACS Publications.
- Putnam, S.A., Cahill, D.G., Braun, P. V, Ge, Z., and Shimmin, R.G. 2006. Thermal conductivity of nanoparticle suspensions. *Journal of Applied Physics*, 99(8): 84308. AIP.
- Putra, N., Roetzel, W., and Das, S.K. 2003. Natural convection of nano-fluids. *Heat and mass transfer*, 39(8–9): 775–784. Springer.
- Quan, X., Dong, L., and Cheng, P. 2010. Determination of annular condensation heat transfer coefficient of steam in microchannels with trapezoidal cross sections. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(19–20): 3670–3676. Elsevier.
- Rahman, M.M., Shevade, S.S., and Ojada, E. 2010. Convective heat transfer in a composite trapezoidal microchannel during magnetic heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(9): 1175–1181. Elsevier.

- Salman, B.H., Mohammed, H.A., Munisamy, K.M., and Kherbeet, A.S. 2013. Characteristics of heat transfer and fluid flow in microtube and microchannel using conventional fluids and nanofluids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28: 848–880. Elsevier.
- Serebryakova, M.A., Dimov, S. V, Bardakhanov, S.P., and Novopashin, S.A. 2015. Thermal conductivity, viscosity and rheology of a suspension based on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and mixture of 90% ethylene glycol and 10% water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83: 187–191. Elsevier.
- Shen, S., Xu, J.L., Zhou, J.J., and Chen, Y. 2006. Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface. *Energy Conversion and Management*, 47(11–12): 1311–1325. Elsevier.
- Shima, P.D., Philip, J., and Raj, B. 2010. Influence of aggregation on thermal conductivity in stable and unstable nanofluids. *Applied Physics Letters*, 97(15): 153113. AIP.
- Shin, S., and Lee, S.-H. 2000. Thermal conductivity of suspensions in shear flow fields. *International journal of heat and mass transfer*, 43(23): 4275–4284. Elsevier.
- Singh, D., Timofeeva, E., Yu, W., Routbort, J., France, D., Smith, D., and Lopez-Cepero, J.M. 2009. An investigation of silicon carbide-water nanofluid for heat transfer applications. *Journal of Applied Physics*, 105(6): 64306. AIP.
- Slack, G.A., Tanzilli, R.A., Pohl, R.O., and Vandersande, J.W. 1987. The intrinsic thermal conductivity of AlN. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 48(7): 641–647. Elsevier.
- Sommers, A.D., and Yerkes, K.L. 2010. Experimental investigation into the convective heat transfer and system-level effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-propanol nanofluid. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(3): 1003–1014. Springer.
- Speight, J.G. 2005. *Lange's handbook of chemistry*. McGraw-Hill New York.
- Sui, Y., Teo, C.J., Lee, P.S., Chew, Y.T., and Shu, C. 2010. Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13–14): 2760–2772. Elsevier.
- Sundar, L.S., Sharma, K. V, Naik, M.T., and Singh, M.K. 2013. Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25: 670–686. Elsevier.
- Sundar, L.S., Singh, M.K., Ramana, E.V., Singh, B., Grácio, J., and Sousa, A.C.M. 2014. Enhanced thermal conductivity and viscosity of nanodiamond-nickel nanocomposite nanofluids. *Scientific reports*, 4: 4039. Nature Publishing Group.
- Taha-Tijerina, J., Narayanan, T.N., Gao, G., Rohde, M., Tsentelovich, D.A., Pasquali, M., and Ajayan, P.M. 2012. Electrically insulating thermal nano-oils using 2D fillers. *ACS Nano*, 6(2): 1214–1220. ACS Publications.
- Taha-Tijerina, J., Peña-Parás, L., and Maldonado-Cortés, D. 2016. 2D-Based Nanofluids: Materials Evaluation and Performance. *In Two-dimensional Materials-Synthesis, Characterization and Potential Applications*. InTech.
- Tang, G.H., Li, Z., He, Y.L., and Tao, W.Q. 2007. Experimental study of compressibility, roughness and rarefaction influences on microchannel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(11–12): 2282–2295. Elsevier.
- Tavman, I., Turgut, A., Chirtoc, M., Hadjov, K., Fudym, O., and Tavman, S. 2010. Experimental study on thermal conductivity and viscosity of water-based nanofluids. *Heat transfer research*, 41(3). Begel House Inc.
- Teamah, M.A., Sorour, M.M., and Saleh, R.A. 2005. Mixed convection between two horizontal concentric cylinders when the cooled outer cylinder is rotating. *Alexandria Eng. J*, 44: 347–360.

- 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.
- Tillman, P., and Hill, J.M. 2007. Determination of nanolayer thickness for a nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(4): 399–407. Elsevier.
- Timofeeva, E. V, Gavrilov, A.N., McCloskey, J.M., Tolmachev, Y. V, Sprunt, S., Lopatina, L.M., and Selinger, J. V. 2007. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. *Physical Review E*, 76(6): 61203. APS.
- Timofeeva, E. V, Yu, W., France, D.M., Singh, D., and Routbort, J.L. 2011. Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene glycol/H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 109(1): 14914. AIP.
- Tiwari, A.K., Ghosh, P., and Sarkar, J. 2013. Heat transfer and pressure drop characteristics of CeO<sub>2</sub>/water nanofluid in plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 57(1–2): 24–32. Elsevier.
- Tomcej, R., and Nandakumar, K. 1986. Mixed convection flow of a power-law fluid in horizontal ducts. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64(5): 743–751. Wiley Online Library.
- Tseng, W.J., and Lin, K.-C. 2003. Rheology and colloidal structure of aqueous TiO<sub>2</sub> nanoparticle suspensions. *Materials science and engineering: A*, 355(1–2): 186–192. Elsevier.
- Tuckerman, D.B., and Pease, R.F.W. 1981. Microchannels applications. VLSI.
- Turgut, A., Tavman, I., Chirtoc, M., Schuchmann, H.P., Sauter, C., and Tavman, S. 2009. Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO<sub>2</sub> nanofluids. *International Journal of Thermophysics*, 30(4): 1213–1226. Springer.
- Vajjha, R.S., and Das, D.K. 2009. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(21–22): 4675–4682. Elsevier.
- Vand, V. 1948a. Viscosity of solutions and suspensions. I. Theory. *The Journal of Physical Chemistry*, 52(2): 277–299. ACS Publications.
- Vand, V. 1948b. Viscosity of Solutions and Suspensions. II. Experimental Determination of the Viscosity–Concentration Function of Spherical Suspensions. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 52(2): 300–314. American Chemical Society. doi:10.1021/j150458a002.
- Wan, M., Yadav, R.R., Yadav, K.L., and Yadav, S.B. 2012. Synthesis and experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids containing functionalized Polyaniline nanofibers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 41: 158–164. Elsevier.
- Wang, B.-X., Sheng, W.-Y., and Peng, X.-F. 2009a. A novel statistical clustering model for predicting thermal conductivity of nanofluid. *International Journal of Thermophysics*, 30(6): 1992. Springer.
- Wang, B.-X., Zhou, L.-P., and Peng, X.-F. 2003. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(14): 2665–2672. Elsevier.
- Wang, C., Nguyen, N.-T., Wong, T.N., Wu, Z., Yang, C., and Ooi, K.T. 2007a. Investigation of active interface control of pressure driven two-fluid flow in microchannels. *Sensors and Actuators A: Physical*, 133(2): 323–328. Elsevier.
- Wang, G., and Cheng, P. 2008. An experimental study of flow boiling instability in a single microchannel. *International communications in heat and mass transfer*, 35(10): 1229–1234. Elsevier.

- Wang, J., Lee, C.H., Bando, Y., Golberg, D., and Yap, Y.K. 2009b. Multiwalled boron nitride nanotubes: growth, properties, and applications. *In* BCN Nanotubes and Related Nanostructures. Springer. pp. 23–44.
- Wang, X., Xu, X., and S. Choi, S.U. 1999. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 13(4): 474–480.
- Wang, Z.L., Tang, D.W., Liu, S., Zheng, X.H., and Araki, N. 2007b. Thermal-conductivity and thermal-diffusivity measurements of nanofluids by  $3\omega$  method and mechanism analysis of heat transport. *International Journal of Thermophysics*, 28(4): 1255–1268. Springer.
- Wei, W. 2017. A comprehensive model for the enhanced thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Advanced Research in Physics*, 3(2).
- Wen, D., and Ding, Y. 2004. Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids). *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 18(4): 481–485.
- Wilcox, W.R. 1973. *Transport phenomena in metallurgy*. GH Geiger and DR Poirier, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass.(1973). 616 pages. \$19.95. *AIChE Journal*, 19(6): 1282–1283. Wiley Online Library.
- Williams, W., Buongiorno, J., and Hu, L.-W. 2008. Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes. *Journal of Heat Transfer*, 130(4): 42412. American Society of Mechanical Engineers.
- Wojtan, L., Revellin, R., and Thome, J.R. 2006. Investigation of saturated critical heat flux in a single, uniformly heated microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30(8): 765–774. Elsevier.
- Wu, H.-W., and Perng, S.-W. 1999. Effect of an oblique plate on the heat transfer enhancement of mixed convection over heated blocks in a horizontal channel. *International journal of heat and mass transfer*, 42(7): 1217–1235. Elsevier.
- Wu, H.Y., and Cheng, P. 2003. An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(14): 2547–2556. Elsevier.
- Wu, J., Shi, M., Chen, Y., and Li, X. 2010. Visualization study of steam condensation in wide rectangular silicon microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(6): 922–930. Elsevier.
- Wu, Z., Li, W., and Ye, S. 2011. Correlations for saturated critical heat flux in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1–3): 379–389. Elsevier.
- Xie, H., Fujii, M., and Zhang, X. 2005. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(14): 2926–2932. Elsevier.
- Xie, H., Lee, H., Youn, W., and Choi, M. 2003. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. *Journal of Applied physics*, 94(8): 4967–4971. AIP.
- Xie, H., Wang, J., Xi, T., and Liu, Y. 2001. Study on the thermal conductivity of SiC nanofluids. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 29(4): 361–364.
- Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F., and Wu, Q. 2002. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *Journal of applied physics*, 91(7): 4568–4572. AIP.
- Xu, Y., and Chung, D.D.L. 2000. Increasing the thermal conductivity of boron nitride and aluminum nitride particle epoxy-matrix composites by particle surface treatments. *Composite Interfaces*, 7(4): 243–256. Taylor & Francis.



- Xuan, Y., and Li, Q. 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of heat and fluid flow*, 21(1): 58–64. Elsevier.
- Xuan, Y., and Li, Q. 2003. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. *Journal of Heat transfer*, 125(1): 151–155. American Society of Mechanical Engineers.
- Xue, L., Keblinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.-S., and Eastman, J.A. 2004. Effect of liquid layering at the liquid–solid interface on thermal transport. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(19–20): 4277–4284. Elsevier.
- Yamada, E., and Ota, T. 1980. Effective thermal conductivity of dispersed materials. *Effektive Wärmeleitfähigkeit in dispersen Systemen. Wärme-und Stoffübertragung*, 13(1–2): 27–37. Springer.
- Yan, R., Simpson, J.R., Bertolazzi, S., Brivio, J., Watson, M., Wu, X., Kis, A., Luo, T., Hight Walker, A.R., and Xing, H.G. 2014. Thermal conductivity of monolayer molybdenum disulfide obtained from temperature-dependent Raman spectroscopy. *ACS nano*, 8(1): 986–993. ACS Publications.
- Yang, B. 2008. Thermal conductivity equations based on Brownian motion in suspensions of nanoparticles (nanofluids). *Journal of Heat Transfer*, 130(4): 42408. American Society of Mechanical Engineers.
- Yang, B., and Han, Z.H. 2006. Thermal conductivity enhancement in water-in-FC72 nanoemulsion fluids. *Applied Physics Letters*, 88(26): 261914. AIP.
- Yang, Y., Zhang, Z.G., Grulke, E.A., Anderson, W.B., and Wu, G. 2005. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(6): 1107–1116. Elsevier.
- Yoo, D.-H., Hong, K.S., and Yang, H.-S. 2007. Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids. *Thermochimica Acta*, 455(1–2): 66–69. Elsevier.
- Yu, C.-J., Richter, A.G., Datta, A., Durbin, M.K., and Dutta, P. 1999. Observation of molecular layering in thin liquid films using X-ray reflectivity. *Physical Review Letters*, 82(11): 2326. APS.
- Yu, W., and Choi, S.U.S. 2003. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *Journal of Nanoparticle Research*, 5(1–2): 167–171. Springer.
- Yu, W., and Choi, S.U.S. 2004. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Hamilton–Crosser model. *Journal of Nanoparticle Research*, 6(4): 355–361. Springer.
- Yu, W., France, D.M., Smith, D.S., Singh, D., Timofeeva, E. V, and Routbort, J.L. 2009a. Heat transfer to a silicon carbide/water nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(15–16): 3606–3612. Elsevier.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L., and Li, Y. 2009b. Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid. *Thermochimica Acta*, 491(1–2): 92–96. Elsevier.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L., and Li, Y. 2010. Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids prepared via phase-transfer method. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 355(1–3): 109–113. Elsevier.
- Yu, W., Xie, H., Li, Y., and Chen, L. 2011. Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of aluminum nitride nanofluid. *Particuology*, 9(2): 187–191. Elsevier.
- Zanchini, E. 2008. Mixed convection with variable viscosity in a vertical annulus with uniform wall temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(1–2): 30–40. Elsevier.

- Zhang, T., Peles, Y., Wen, J.T., Tong, T., Chang, J.-Y., Prasher, R., and Jensen, M.K. 2010. Analysis and active control of pressure-drop flow instabilities in boiling microchannel systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(11–12): 2347–2360. Elsevier.
- Zhang, X., Gu, H., and Fujii, M. 2006. Experimental study on the effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids. *International Journal of Thermophysics*, 27(2): 569–580. Springer.
- Zhu, H., Zhang, C., Liu, S., Tang, Y., and Yin, Y. 2006. Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> aqueous nanofluids. *Applied Physics Letters*, 89(2): 23123. AIP.
- Zhu, X., and Liao, Q. 2006. Heat transfer for laminar slip flow in a microchannel of arbitrary cross section with complex thermal boundary conditions. *Applied Thermal Engineering*, 26(11–12): 1246–1256. Elsevier.



## ÖZGEÇMİŞ

1 Mayıs 1991 yılında Hatay'ın İskenderun ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini İskenderun İnönü İlk ve Ortaokulu'nda, lise öğrenimini ise İskenderun Şemsettin Mursaloğlu Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde üniversite öğrenim hayatına başladı ve 2014 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 Şubat ayından beri Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

