



**NANOAKIŞKANLARIN MİNİKANALLARDA KARMA
TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN DESTEKLEYEN VE KARŞIT
AKIŞ KOŞULLARINDA DENEYSEL İNCELENMESİ**

Resul Önder TEMİZ
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY

2019
Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NANOAKIŞKANLARIN MİNİKANALLARDA KARMA TAŞINIMLA ISI
TRANSFERİNİN DESTEKLEYEN VE KARŞIT AKIŞ KOŞULLARINDA
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Resul Önder TEMİZ

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2019

Her hakkı saklıdır

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

**NANOAKIŞKANLARIN MİNİKANALLARDA KARMA TAŞINIMLA ISI
TRANSFERİNİN DESTEKLEYEN VE KARŞIT AKIŞ KOŞULLARINDA
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY danışmanlığında, Resul Önder TEMİZ tarafından hazırlanan bu çalışma 17 / 06 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak **oy birliği ile (.../...)** kabul edilmiştir.

Başkan	: Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

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.

17 / 06 / 2019

Resul Önder TEMİZ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANOAKIŞKANLARIN MİNİKANALLARDA KARMA TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN DESTEKLEYEN VE KARŞIT AKIŞ KOŞULLARINDA DENEYSEL İNCELENMESİ

Resul Önder TEMİZ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY

Bu çalışmada minikanallarda nanoakışkanların destekleyen ve karşıt akış durumları için karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan minikanalların çapları sırasıyla; 1,20 mm, 1,5 mm ve 1,9 mm'dir. Deneysel olarak saf su, %0,25 ve %0,75 hacimsel oranlarda saf su bazlı SiO₂ nanoakışkan kullanılmıştır. Ayrıca saf su ve nanoakışkanların sıcaklığa bağlı (20-60°C) ısı iletkenlik ve viskozite özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak karma taşınım mekanizması sınırlarında kalabilmek adına Reynolds sayısı 20 ile 60 arasında tutulmuştur. Elde edilen verilere göre artan minikanal çapının ve nanopartikül oranının, Nusselt sayısını artırdığı belirlenmiştir. Ek olarak karşıt akışlarının yönünün deneysel ortalama Nusselt sayısını belirgin şekilde etkilediği sonucuna varılmıştır. Tüm sonuçlar incelendiğinde nanoakışkan kullanımı ile Nusselt sayısında maksimum %65, minimum %25 artış gözlenmektedir. Ek olarak destekleyen akış durumunda, karşıt akış durumuna kıyasla Nusselt sayısında maksimum %18, minimum %4 artış görülmüştür.

2019, 117 sayfa

Anahtar Kelimeler: SiO₂, Minikanal, Isı Transferi, Karma Taşınım

ABSTRACT

MS. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MIXED CONVECTION HEAT TRANSFER OF NANOFLUIDS IN MINICHANNELS FOR AIDING AND OPPOSING FLOW CONDITIONS

Resul Önder TEMİZ

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Eyüphan MANAY

In this study, the characteristics of heat transfer, and mixed convection for aiding and opposing flow states in nanofluids of minichannels are experimentally analyzed. The diameters of the minichannels used in the study are respectively; 1.20 mm, 1.5 mm and 1.9 mm. In the experiments, pure water as work fluid and at %0, 25 and %0, 75 volume ratios, pure water based SiO₂ nanofluid are used. Besides, pure water and the properties of thermal (20-60°C) conductivity and viscosity of nanofluids are experimentally specified. In order to stay on the brinks of the mechanism of mixed convection, Reynold number is held between 20 and 60. According to the obtained data, it is clear that the increased diameter of minichannel and the ratio of nanoparticles significantly enhance Nusselt number. It is also inferred that the direction of secondary flows significantly effects experimentally average Nusselt number. If all the results are analyzed, the use of nanofluids and the augmentation, which is maximum %65 and minimum %25 in Nusselt number, are observed. And when compared to the state in countercurrent(opposing) flow, it is observed that an augmentation is maximum %18 and minimum %4 in Nusselt number.

2019, 117 pages

Keywords: SiO₂, Minichannel, Heat Transfer, Mixed Convection

TEŞEKKÜR

Çalışmanın her aşamasında destek ve yardımlarını gördüğüm, tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY'a teşekkür ederim. Çalışma süresince yapıcı eleştirileri ile destek olan, tecrübelerinden faydalandığım Sayın Bayram ŞAHİN'e ilgi ve alakasından ötürü teşekkür ederim.

Tez çalışmam esnasında desteğini eksik etmeyen, her kapısını çaldığımda yardımcı olan Öğr. Gör. Emre MANDEV'e ve bu süreçte alaka ve desteğini gördüğüm Öğr. Gör. Murat CEYLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam ve eğitim hayatımın her döneminde benden sevgi ve desteklerini esirgemeyen sevgili annem, babam ve kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım.

Resul Önder Temiz

Haziran / 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ	1
1.1.Isı Transferi Nedir?	3
1.1.1.Isı transferi mekanizmaları.....	4
1.1.1.a İletimle ısı transferi	5
1.1.1.b Taşınım ile ısı transferi.....	6
1.1.1.c Işınım ile ısı transferi.....	9
1.1.2.Isı transferini artırma ve iyileştirme yöntemleri	9
1.2.Nanoakışkanlar.....	11
1.2.1.Nanoakışkan çeşitleri	13
1.2.2.Nanoakışkanların hazırlanması	14
1.2.3.Nanoakışkanların kararlılığı.....	15
1.3.Minikanallar	15
2.KAYNAK ÖZETLERİ	17
2.1. Karma Taşınım.....	17
2.2. Nanoakışkanlar ve Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri	20
2.2.1 Isıl iletkenlik	21
2.2.2 Viskozite	30
2.2.3 Isıl iletkenlik ve viskozite modelleri.....	33

2.3. Nanoakışkanların Isıl İletkenlik Değerini Artıran Mekanizmalar	39
2.3.1. Nanopartiküllerin Brownian Hareketi.....	40
2.3.2. Nanopartiküllerin Kümelenmesi	41
2.3.3. Nanopartiküller Etrafında Sıvı Katmanlaşması	42
2.3.4. Nanopartiküllerde Balistik Fonon İtimi	43
2.3.5 Yakın Alan Radyasyonu	44
2.4. Nanoakışkanların ısı transferi	45
2.5 Mini ve Mikrokanllarda Taşınımın Isı Transferi.....	48
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	51
3.1. Deneysel Materyaller	53
3.1.1.Hassas terazi.....	53
3.1.2.Ultrasonik homojenizatör.....	53
3.1.3.Viskozimetre	54
3.1.4 Isıl iletkenlik ölçer.....	55
3.1.5. Akışkan besleme haznesi	55
3.1.6. Pompa.....	56
3.1.7. Debimetre	56
3.1.8. Serpantin ve sirkülatörlü su banyosu	57
3.1.9. Güç kaynağı	58
3.1.10. Veri okuma kartı	58
3.1.11. Isıl çiftler	59
3.2 Test Bölgesi.....	63
3.3. Hesaplamalar ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi.....	64
3.3.1. Nanoakışkan hazırlanması ile ilgili hesaplamalar.....	64
3.3.2. Isı transferi hesaplamaları	65
3.3.3 Belirsizlik Analizi	68
3.4. Nanoakışkanların Hazırlanması ve Karakterizasyonu	69

4.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	75
4.1. Isı Transfer verilerinin Literatürle Karşılaştırılması	75
4.2. Karma Taşınım Bulguları.....	79
5.SONUÇ ve ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	117



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Acıklama</u>
A	Isı transferi yüzey alanı (m ²)
D	Çap (m)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m ² .K)
I	Akım (A)
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m.K)
m	Metre
mm	Milimetre
T	Sıcaklık
U	Ortalama hız (m/s)
V	Gerilim (V)
Q	Isı miktarı (W)
μ	Dinamik viskozite (kg/m.s)
λ	Ortalama serbest yol (m)
°	Derece
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
β	Hacimsel genleşme katsayısı (1/K)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
σ	Stepfan-Boltzmann sabiti(W/m ² .K ⁴)
φ	Hacimsel partikül oranı
Φ	Doğal taşınım parametresi

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

<u>Alt İndisler</u>	<u>Açıklama</u>
----------------------------	------------------------

∞	Ortam
b	Temel akışkan
bulk	Bulk sıcaklık
cl	Kümeler
ç	Çıkış
eff	Efektif
f	Zorlanmış
g	Giriş
h	Hidrolik
L	Lokal
l	Nanotabaka
nf	Nanoakışkan
ort	Ortalama
p	Partikül
s	Yüzey

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Üretilmiş 12 adet basınç sensörü	1
Şekil 1.2. Isı transferi mekanizmaları	5
Şekil 1.3. Bir maddenin farklı fazları için ısı iletim mekanizmaları	5
Şekil 1.4. Taşınım ile ısı transferinin çeşitleri	7
Şekil 1.5. Doğal taşınım ile ısı transferi	8
Şekil 1.6. Nanopartiküllerin mikropartiküller ile karşılaştırılması	12
Şekil 1.7. Topaklanmış ve homojene yakın dağılmış CuO nanopartikül görüntüleri	15
Şekil 2.1 Nanoakışkan (Tarama: Başlık) çalışmalarının sayıları ve yıllara göre dağılımı	20
Şekil 2.2. Nanoakışkan (Tarama: Konu) çalışmalarının sayıları ve yıllara göre dağılımı	21
Şekil 2.3. Efektif ısı iletkenliklerin hacimsel partikül oranı ile değişimi (Murshed et al. 2008)	24
Şekil 2.4. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklık ile değişimi	33
Şekil 2.5. Yüksek ısı iletkenlik yolu	41
Şekil 2.6. Nanopartikül etrafında oluşan katmanlı yapı	42
Şekil 2.7. Deneysel bir çalışmada kullanılan mikrokanal geometrileri	49
Şekil 3.1. Minikanal deney düzeneği bileşenleri	51
Şekil 3.2. AXIS Hassas Terazisi	53
Şekil 3.3. Ultrasonik homojenizatör, soğutma sistemi ve hazırlanan nanoakışkan	54
Şekil 3.4. Viskozimetre	54
Şekil 3.5. Isıl iletkenlik ölçer	55
Şekil 3.6. Akışkan besleme haznesi	55
Şekil 3.7. Pompa	56
Şekil 3.8. Debimetre	57
Şekil 3.9. Serpantin ve WiseCirsu su banyosu	57
Şekil 3.10. Güç kaynağı	58
Şekil 3.11. Veri okuma kartı	59
Şekil 3.12. K tipi ısı çifti	59
Şekil 3.13. Test bölgesi görseli	63
Şekil 3.14. Test bölgesi elemanları	64
Şekil 3.15. Saf su ve farklı derişimdeki nanoakışkanlar için ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi	71
Şekil 3.16. Farklı sıcaklıklarda ısı iletkenliğinin hacimsel partikül oranı ile değişimi	71

Şekil 3.17. Farklı akışkanlar için viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi.....	73
Şekil 3.18. Farklı sıcaklıklarda viskozitenin hacimsel partikül oranı ile değişimi	73
Şekil 4.1. Saf su için destekleyen akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle karşılaştırılması (D=1,90 mm)	76
Şekil 4.2. Saf su için karşıt akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle karşılaştırılması (D=1,90 mm)	76
Şekil 4.3. Saf su için destekleyen akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle kıyaslanması (D=1,50 mm).....	77
Şekil 4.4. Saf su için karşıt akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle kıyaslanması (D=1,50 mm).....	77
Şekil 4.5. Saf su için destekleyen akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle kıyaslanması (D=1,20 mm).....	78
Şekil 4.6. Saf su için karşıt akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle kıyaslanması (D=1,20 mm).....	78
Şekil 4.7. Saf su için 1,90 mm çaplı kanalda farklı akış durumlarında taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi.....	79
Şekil 4.8. Saf su için 1,50 mm çaplı kanalda farklı akış durumlarında taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi.....	80
Şekil 4.9. Saf su için 1,20 mm çaplı kanalda farklı akış durumlarında taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi.....	80
Şekil 4.10. Saf su için farklı kanal çapları ve akış durumlarında taşınım katsayısı ve Reynolds sayısı ilişkisi.....	81
Şekil 4.11. %0,25 SiO ₂ nanoakışkanı için farklı kanal çapları ve akış durumlarında taşınım katsayısı ve Reynolds sayısı ilişkisi	82
Şekil 4.12. %0,75 SiO ₂ nanoakışkanı için farklı kanal çapları ve akış durumlarında taşınım katsayısı ve Reynolds sayısı ilişkisi	82
Şekil 4.13. Saf su ve farklı hacimsel oranlı SiO ₂ nanoakışkanı için 1,90 mm kanal çapında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi	83
Şekil 4.14. Saf su ve farklı hacimsel oranlı SiO ₂ nanoakışkanı için 1,50 mm kanal çapında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi	84
Şekil 4.15. Saf su ve farklı hacimsel oranlı SiO ₂ nanoakışkanı için 1,20 mm kanal çapında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi	84
Şekil 4.16. Saf su için farklı kanal çapı ve akış durumları için Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının ilişkisi.....	85
Şekil 4.17. %0,25 hacimsel oranlı SiO ₂ nanoakışkanı için farklı kanal çapı ve akış durumları için Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının ilişkisi.....	86
Şekil 4.18. %0,75 hacimsel oranlı SiO ₂ nanoakışkanı için farklı kanal çapı ve akış durumları için Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının ilişkisi.....	86
Şekil 4.19. 1,90 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanı ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardsn sayısı ile ilişkisi	88

Şekil 4.20. 1,50 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanları ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi.....	88
Şekil 4.21. 1,20 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanları ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi.....	89
Şekil 4.22. Saf su için farklı kanal çapları ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi.....	89
Şekil 4.23. %0,25 SiO ₂ için farklı kanal çapları ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi.....	90
Şekil 4.24. %0,75 SiO ₂ için farklı kanal çapları ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi.....	90
Şekil 4.25. Saf su için ifadesinin Grashof sayısına bağlı değişimi	91
Şekil 4.26. %0,25 hacimsel oranlı SiO ₂ nanoakışkanı için ifadesinin Grashof sayısına bağlı değişimi	92
Şekil 4.27. %0,75 hacimsel oranlı SiO ₂ nanoakışkanı için ifadesinin Grashof sayısına bağlı değişimi	92
Şekil 4.28. 1,90 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanları ve akış durumları için ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi	94
Şekil 4.29. 1,50 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanları ve akış durumları için ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi	94
Şekil 4.30. 1,20 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanları ve akış durumları için ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi	95
Şekil 4.31. Saf su için ifadesinin Grashof sayısı ile ilişkisi	95
Şekil 4.32. %0,25 hacimsel oranlı SiO ₂ nanoakışkanı için ifadesinin Grashof sayısı ile ilişkisi	96
Şekil 4.33. %0,75 hacimsel oranlı SiO ₂ nanoakışkanı için ifadesinin Grashof sayısı ile ilişkisi	96
Şekil 4.34. 1,90 mm çaplı kanalda, farklı akışkanlar için destekleyen ve karşıt akış durumlarında Ω ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi	97
Şekil 4.35. 1,50 mm çaplı kanalda, farklı akışkanlar için destekleyen ve karşıt akış durumlarında Ω ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi	98
Şekil 4.36. 1,20 mm çaplı kanalda, farklı akışkanlar için destekleyen ve karşıt akış durumlarında Ω ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

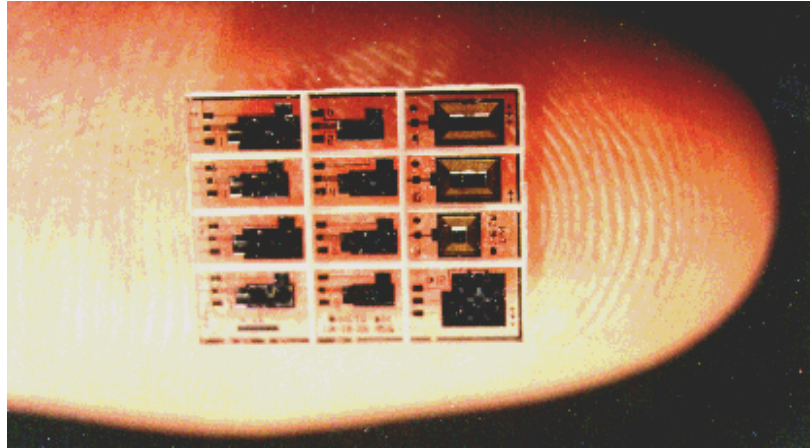
Çizelge 1.1. Aktif ve pasif Yöntemler ile ısı transferi artırma yolları.	10
Çizelge 1.2. Kanalların boyutlarına göre sınıflandırılması	16
Çizelge 2.1. Klasik ısı transferi akışkanları ve bazı katı malzemeler için ısı iletkenlikler.	22
Çizelge 2.2. Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri için birkaç örnek	25
Çizelge 2.3. Nanoakışkanların ısı iletkenliklerine ait özet çizelgesi.....	27
Çizelge 2.4. Nanoakışkan viskozitesi için özet tablo	31
Çizelge 2.5. Isı iletkenlik modelleri özet çizelgesi	34
Çizelge 2.6. Nanoakışkanların viskozite modellerine ilişkin sayısal çalışmalar	38
Çizelge 2.7. $Re=100$ değeri için ve su içerisinde %1 hacimsel oranı olan nanopartiküllerin basınç düşümü ve ortalama Nusselt sayıları.....	46
Çizelge 2.8. Su bazlı nanoakışkanların ısı transferi özet çizelgesi	46
Çizelge 3.1. Isı çiftlere ait kalibrasyon eğrileri ve denklemleri	60
Çizelge 3.2. Belirsizlik analizi sonuçları.....	69
Çizelge 3.3. Hazırlanan nanoakışkanlar için (1000 mL) gerekli temel akışkan ve partikül miktarları	69
Çizelge 3.4. SiO_2 Nanopartikülünün Özellikleri	70

1. GİRİŞ

Teknoloji, hayatımızı kolaylaştıran, temel ihtiyaçlardan başlayarak kişisel zevklerimiz de dahil hayatımızdaki bir çok noktaya temas eden ve yaşam kalitemizi artıran bir konudur. Teknolojideki gelişmeler ilerledikçe daha iyiyi yapma arzusuna; ergonomi, tasarım, taşınabilirlik, estetik gibi diğer faktörler eklenmiştir. Böylece aynı işi ya da daha iyisini yapabilen daha küçük ve performanslı ürünler ilgi odağı olmuştur.

1959 yılında Richard Feynman'ın "There is Plenty of Room at the Bottom" adlı ünlü konuşmasında malzeme ve cihazların moleküler boyutlarda üretilmesi durumunda başarılabilecekler hakkında konuşması ilgiyi bu alana çekmiş, günümüzdeki gelişmeler için de kaynak olmuştur. Feynman konuşmasında çok küçük motorların yapılabileceği, 24 ciltlik ansiklopedi setinin bir toplu iğne başı büyüklüğünde bir alana yazılabileceği, atomlara hükmetme ve yönetme, çok küçük motorların yapılabileceği gibi konulardan bahsetmiştir. Bu tarihten sonra maddeyi atomik boyutta incelemek, işlemek dahası kullanabilmek için adımlar atılmış ve nanoteknoloji kavramı doğmuştur.

Özellikle 1980'lerde başlayan çalışmalar kısaca "MEMS" olarak adlandırılan mikro elektro- mekanik sistemler teknolojisini oluşturmuştur. Bu çalışmalar Feynman'ın bahsettiği fikirlerin yapılabileceği yönünde olumlu etki yaratmıştır. MEMS teknolojisi ve nanoteknolojik gelişmeler doğrultusunda biyomedikal, savunma sanayi, telekomünikasyon, ev aletleri, kimya, havacılık, bilişim gibi alanlarda ilerleme yaşanmıştır.



Şekil 1.1. Üretilmiş 12 adet basınç sensörü (Anonim, www.mems.metu.edu.tr, 15.07.2018)

1. GİRİŞ

MEMS sistemlerinin önem kazanması, bu alanda ortaya çıkan problemlerin çözümünü de önemli kılmıştır. Sorunlardan birisi de ısı transferidir. Çünkü MEMS sistemleri ile bütünleşmiş biçimde çalışabilecek, bu boyuttaki çalışma ürünlerinin performansına katkı sağlayıp, ısı sorunlarını giderecek ürünlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple klasik ısı eşanjörlerinden çok daha küçük mikro boyutlarda eşanjör tasarımları araştırılmıştır.

Mikro boyutlarda ısı eşanjörü tasarımlarında mini ve mikro kanal tasarımları kullanılarak etkili ısı transferi sağlanabilmektedir. Minikanallar ve mikrokanallar yüksek en/boy oranı, yüksek ısı transfer katsayısı, düşük hacim, gerekli sıvı miktarının az olması ve boyutların ağırlığının az olması gibi bazı özelliklerin bir araya getirilmesiyle ısı transferinde oldukça etkili bir cihaz olan, küçük ve verimli bir ısı eşanjörüdür (Gravndyan et al. 2017). Minikanal tasarımlarında istenilen ısı transferini sağlamamız ve elde edeceğimiz verimlilik özellikle boyutun küçük olması nedeniyle akışkanlara doğrudan bağlı olmaktadır. Minikanal kullandığımız tasarımlarda boyutun artırılması ile verim almak yerine iş akışkanının ısı transfer değerlerini iyileştirmek amacımıza uygun daha faydalı bir yoldur. Bunun üzerine akışkanların ısı transfer performansını arttırmak için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Araştırmacılar, katı partikülleri sıvı içinde süspansiyon haline getirerek, baz sıvıların ısı iletkenliğini arttırmaya çalışmışlardır. Çünkü süspansiyonda kullanılan bakır, alüminyum, silikon, alüminyum oksit ve sodyum gibi katı partiküllerin ısı iletkenlikleri klasik ısı transferi akışkanı olarak kullanılan su, etilen glikol, motor yağı gibi sıvıların ısı iletkenliklerinden daha yüksektir (Wang and Mujumdar, 2007).

Maxwell yaklaşık bir asır önce teorik çalışmada akışkanların içerisine katı partikül katılması fikrini ilk kez ileri sürmüştür. Maxwell, boyutları mikrometre ve milimetre olan, askıda duran parçacıkları göz önünde bulundurmuştur. Bununla birlikte, bu boyutlara sahip olan parçacıklar hızlı çökme, aşınma ve tıkanma sorunlarına neden olmaktadır. Ayrıca bu parçacık boyutlarına sahip akışkanların ısı transferi geliştirmede sınırlı uygulamalara sahip oldukları bulunmuştur (Xuan and Li, 2000). Teknolojinin gelişmesi ve nanopartikül üretiminin sağlanmasıyla 1995 yılında Choi akışkana ilave ettiği nano boyuttaki partiküller ile nanoakışkan kavramının gelişmesine katkıda bulunmuştur. Bunun üzerine nanoakışkanların kullanıldıkları uygulamalarda ısı transfer

1. GİRİŞ

performanslarının ve ısıl özelliklerinin incelenmesine başlanmıştır. Açık ki, nanoakışkanlar ısı transferi için büyük bir potansiyele sahiptir ve pratik ısı transfer işlemlerinde uygulamaya çok uygundur. Bu, mühendislerin son derece kompakt ve etkili ısı transfer ekipmanları geliştirmesi için bir fırsat sunmaktadır. Yayımlanan çeşitli makaleler, nanoakışkanların ısı transfer katsayısının, ortak baz sıvısından çok daha yüksek olduğunu ve basınç düşüşünde çok az ya da sıfır düşüş verdiğini göstermektedir (Daungthongsuk ve Wongwies 2005).

Nanoakışkan kullanılan minikanallar, minyatür sistemlerinin ısıl performansının iyileştirilmesine olanak sağlayacak etkili ısı eşanjörü tasarımlarıdır. Tasarımda kullanılan nanoakışkan çeşidi, nanoakışkan derişimi, kanal geometrisi gibi değerler istenilen çalışma koşullarına bağlı değiştirilebilir.

Bu çalışmada düşey konumlandırılmış dairesel minikanallardaki nanoakışkan akışında karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel düzeneğinde kullanılan minikanalların çapları 1.9 mm, 1.5 mm ve 1.2 mm'dir. Minikanallarda ısıtma yüzeylere sabit ısı akısı uygulanarak sağlanmıştır. Çalışmada iş akışkanı olarak su ve su bazlı SiO₂ nanoakışkanları kullanılmıştır. Deneyler, hacimsel partikül oranının ısı transferi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, saf su ve iki farklı hacimsel oranda nanoakışkanla (%0,25 ve 0,75) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm akışkanlar için sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik ve viskozite özellikleri deneysel olarak elde edilmiştir (20-60°C sıcaklık aralığında). Deneylerde, belirlenen laminer karma taşınım şartlarında kalabilmek adına, Reynolds sayısı 20-60 aralığında tutulmuştur. Seçilen parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkileri, doğal taşınım kaynaklı ikincil akışların zorlanmış akışla aynı yönlü olduğu (destekleyen akış) ve zıt yönlü olduğu (karşıt akış) durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı minikanallarda nanoakışkanların karma taşınım ile ısı transferi performanslarını gözlemlemek ve minikanallarda karma taşınım literatürüne katkıda bulunmaktır.

1.1. Isı Transferi Nedir?

Isı kavramı bir sistemden diğerine mevcut bir sıcaklık potansiyel farkının olmasından ötürü aktarılan enerji olarak ifade edilir. Bir enerji çeşidi olup, transferi için

iki sistem arasında sıcaklık farkı olmasına ihtiyaç duyar. Nasıl ki elektrik akımını meydana getiren ve yönüne etkileyen potansiyel fark gerilim ise sıcaklıkta benzer şekilde ısı enerjisinin transferine etkileyen potansiyel farktır. Isı enerjisi yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru hareket eder. Sıcaklık potansiyel farkı ne kadar yüksekse ısı transfer hızı da buna bağlı olarak yükselir. Isı transferi ve uygulamaları doğada, günlük hayatın hemen her bölümünde yer alır. Isı transferini en rahat doğada, kendi çevremizde gözlemleyebiliriz. Örneğin çevre sıcaklığı düştüğünde üşüdüğümüzü hissetmiş ve giyinme ihtiyacımızı fark etmişiriz. Bu sayede çevremiz ile ısı transferi etkileşiminde bulunmuş bunu azaltmaya çalışmışızdır. Isı transferi konusu sadece bedensel varlığımız ile bizzat ilgili kalmayıp, geliştirdiğimiz teknolojilerde, sanayide, mühendislik alanlarında, ev aletleri, bilgisayarlar, mobil cihazlar, motorlar, enerji santralleri, elektrik devreleri gibi birçok noktada önemlidir.

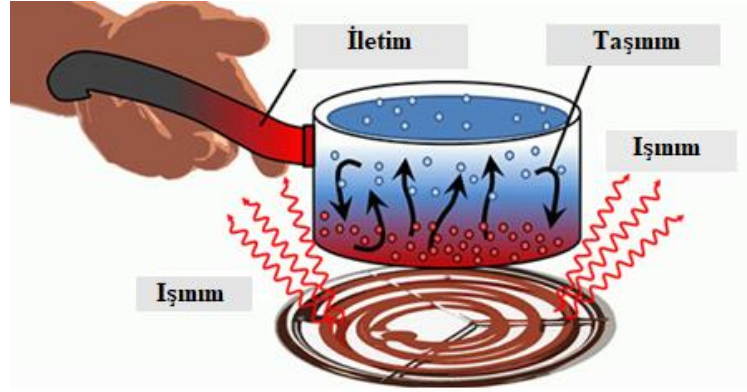
1.1.1. Isı transferi mekanizmaları

Isı transferi; iletim (kondüksüyon), taşınım (konveksiyon), ve ışınım (radyasyon) gibi üç farklı şekilde gerçekleşir. Her çeşit ısı transferi yolu için sıcaklık farkı şarttır ve hepsinde ısı transfer yönü sıcaklığın düşük olduğu yöne doğrudur.

İletim, bir maddenin atom ve moleküllerinin birbirleriyle etkileşimi sonucu meydana gelir. Yüksek enerjili parçacıkların katılarda titreşim, sıvılarda ve gazlarda çarpışma hareketlerinin de etkisi ile enerjilerini çevrelerindeki daha düşük enerjili parçacıklara aktarmasına iletim denir. Bu aktarım sayesinde ısı transferi gerçekleşebilmektedir.

Taşınım, aralarında sıcaklık farkı olan durgun bir ortam (çoğunlukla katı yüzey) ile hareketli akışkan arasında gerçekleşen ısı transferi türüdür. Ortamlardan birinin hareketli olması önemlidir çünkü tamamen durağan olan durumlarda iletimden bahsetmemiz gerekir.

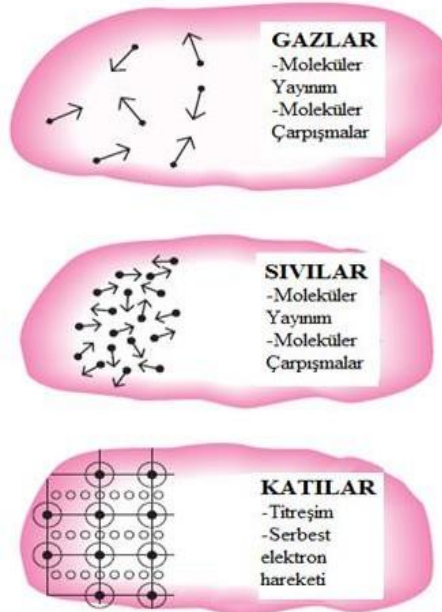
Işınım, maddenin ısı enerjisinin elektromanyetik dalga veya foton şeklinde dağılmasıdır.



Şekil 1.2. Isı transferi mekanizmaları (Anonim, www.engineeringinsider.org, 18.07.2018)

1.1.1.a İletimle ısı transferi

İletimle ısı transferi, ısı enerjisinin atom ve moleküller vasıtası ile yüksek enerjili parçacıklardan çevrelerindeki daha düşük parçacıklara enerjinin aktarılması sayesinde gerçekleşir. Bu enerji aktarımı daha sıkı forma sahip olan katılarda titreşim vasıtası ile sıvı ve gazlarda ise moleküler yayılma ve çarpışmalar vasıtası ile gerçekleşmektedir(Şekil 1.4).



Şekil 1.3. Bir maddenin farklı fazları için ısı iletim mekanizmaları (Çengel 2011)

1. GİRİŞ

İletimle ısı transferinin gerçekleşmesinde etkili olan parametreler; ısı aktarımının meydana gelmesini sağlayan sıcaklık farkı, ısı transferi yüzey alanı, malzemenin kendine özgü k ısıl iletkenlik katsayısı, ortama dahil olan bölgeler arasındaki uzaklık şeklindedir.

Bu parametreler birleştirildiğinde iletimle ısı transferi Fourier tarafından 1822’de diferansiyel şekilde ifade edilmiştir. Bu ifade Fourier ısı iletim kanunu olarak bilinmektedir.

Fourier ısı iletim kanunu diferansiyel şekilde aşağıdaki gibi ifade edilir.

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

Yukarıdaki denklem, verilen bir yönde ısı iletim hızının belirtilen bu yönde sıcaklık gradyanı ile doğru orantılı olduğunu gösterir. Sıcaklık artan x yönünde azalıyor ise ısı bu yönde iletilir ve sıcaklık gradyanı negatif olur. Bu sayede negatif işaret, pozitif x yönünde ısı transferinin pozitif bir değer olmasını sağlar.

1.1.1.b Taşınım ile ısı transferi

Taşınım, durgun bir ortam ile (çoğunlukla katı yüzey) hareket halindeki sıvı veya gaz akışkan arasında enerji aktarılmasıdır. Bu enerji transferi için de yine sıcaklık farkı gereklidir. Ayrıca taşınım ile ısı transferi olması için akışkanın hareketli olması da esastır aksi takdirde iletim mekanizmasından bahsedilmesi gerekir. Taşınım, iletim ve akışkan hareketinin birleşik etkilerini kapsar. Akışkan hızı ne kadar büyük olursa taşınım ısı aktarımı da o kadar büyük olur (Çengel, 2011).

Isı taşınımında ısı transfer hızını etkileyen parametreler; ısı transfer yüzey alanı, h ısı taşınım katsayısı, ortamlar arasındaki sıcaklık farkıdır. Isı transfer hızı bu değerler ile doğru orantılıdır. Isı taşınımını Newton’un Soğuma Yasası ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

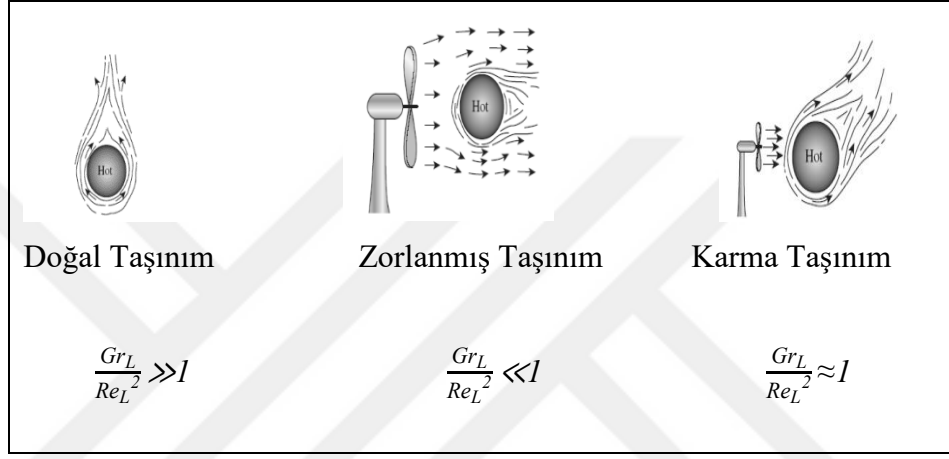
$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (1.2)$$

1. GİRİŞ

Burada h ısı taşınım katsayısı, A ısı transferi yüzey alanı, T_s ve T_∞ sırasıyla yüzey ve ortam sıcaklıklarıdır.

Çalışma konumuzun da temelinde bulunan taşınım ile ısı transferi üç çeşittir.

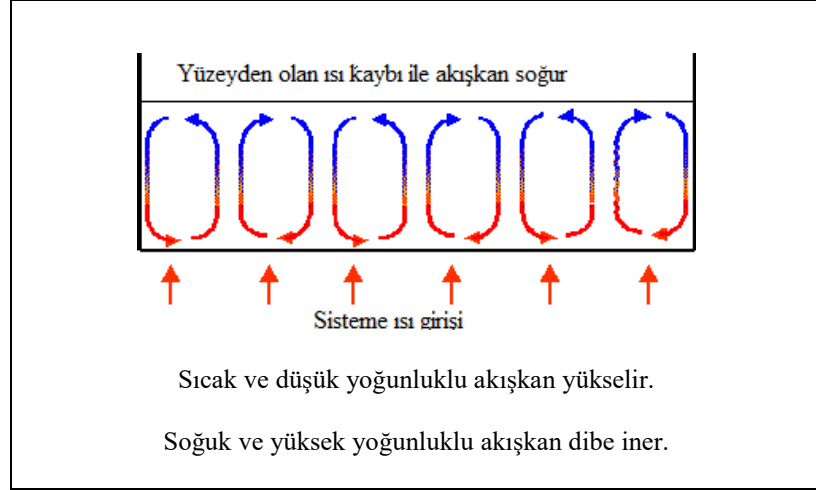
1. Doğal Taşınım
2. Zorlanmış Taşınım
3. Karma Taşınım



Şekil 1.4. Taşınım ile ısı transferinin çeşitleri (Cengel, 2011)

Doğal taşınımında akışkan hareketi bir kaldırma kuvveti oluşması sebebi ile meydana gelmektedir. Akışkan içerisindeki kaldırma kuvvetleri, akışkanın öz kütlesinin sıcaklığa göre değişmesine ve öz kütle ile orantılı olan ağırlık kuvvetlerine bağlıdır. Bir akışkanda kaldırma kuvvetlerinin oluşması için öz kütle gradyanının meydana gelmesinde birçok neden vardır. Çünkü bir akışkanın öz kütlesi sıcaklığa, basınca ve derişikliğe bağlıdır. En çok bilinen neden sıcaklık gradyanının varlığı ile ilgilidir. Gaz ve sıvıların öz kütlesi genel olarak sıcaklığın artması ile azalır (Baytaş, 2015).

Kaldırma kuvveti ve gövde kuvveti etkisine maruz kalan akışkan sirkülasyon yapar. Bu sirkülasyon sebebi ile doğal taşınım oluşur. Akışkana etkiyen gövde kuvveti ise genellikle yerçekimi kuvvetidir. Şekil 1.5'te doğal taşınım ile ısı transferi için akışkanda yaşanan sirkülasyon hareketi gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Doğal taşınım ile ısı transferi (Anonim, tr.wikipedia.org, 19.07.2018)

Doğal taşınımın olabirliğini teyid etmek için aşağıdaki orandan yararlanılır.

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

Burada Gr_L Grashof sayısını ifade eder. Grashof sayısı akışkana etkiyen kaldırma kuvvetinin viskoz kuvvete oranını belirtir. Doğal taşınımında akış rejimi Grashof sayısı ile belirlenir. Re_L Reynolds sayısını ifade etmektedir. Reynolds sayısı ise akışkan üzerine etkiyen atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını ifade etmektedir. Zorlanmış taşınım için akış rejimi Reynolds ile belirlenir. Denklem (1.3) oranı sağlanırsa, akış için zorlanmış taşınım etkilerini imal edebiliriz.

Zorlanmış taşınımında akışkan dışarıdan fan, pompa gibi dış etkenler tarafından harekete zorlanır. Dış etkiye sahip olması doğal taşınımına göre daha hızlı ısı transferi gerçekleştirmesini sağlar. Zorlanmış taşınımın baskın, doğal taşınımın ihmal edilebilir olduğunu aşağıdaki orandan teyid edebiliriz.

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

Taşınım ile ısı transferinden bahsedildiğinde çoğunlukla doğal taşınım ve etkileri ihmal edilir. Lakin bu sadece bir kabuldür. Özellikle Reynolds sayısının düşük olduğu

durumlarda doğal taşınımın etkilerini göz ardı etmek hataya sebebiyet vermektedir. Doğal taşınım etkilerinin göz ardı edilemediği, zorlanmış taşınım etkilerinin de mevcut olduğu durumlarda karma taşınımından bahsedilebilir ve aşağıdaki oran aralığında geçerlidir.

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

Karma taşınım ile ilgili çalışmalara oldukça önem verilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde zorlanmış taşınımın laminer akışlarda kaldırma etlilerinin ısı transferini önemli ölçüde artırabileceği fakat akışın türbülanslı olması durumunda bu artışın göz ardı edilebileceği söylenebilmektedir (Incropera ve Dewitt 2010).

1.1.1.c Işınım ile ısı transferi

Işınım ile ısı transferi elektromagnetik dalgalar ya da fotonlar vasıtasıyla gerçekleşir. Sonlu sıcaklığa sahip tüm cisimler ışınım ile ısı transferi yapabilirler ve ışınım ile ısı transferi için herhangi bir ortama ihtiyaç yoktur. Işınım ile ısı transfer hızını etkileyen parametreler cismin yüzey sıcaklığı, yayıcılığı ve yüzey alanıdır. Isı enerjisinin ışınım vasıtası ile transferi eşitlik 1.6' da gösterilen Stefan-Boltzmann yasasıyla ifade edilmektedir.

$$Q = \sigma AT_s^4 \quad (1.6)$$

Burada σ Stefan-Boltzmann sabitidir. T ise yüzeyin K cinsinden mutlak sıcaklığıdır. Bu bağıntı 1884'te Ludwig Boltzmann tarafından teorik olarak doğrulandı (Çengel, 2011).

1.1.2. Isı transferini artırma ve iyileştirme yöntemleri

Isı transferi enerjinin, enerji ile çalışan birçok cihazın verimli kullanılması açısından önemli bir konudur. Örneğin bir bilgisayarı ele alalım. Elektrik gücü ile

1. GİRİŞ

çalıştırdığımız bilgisayar anakart üzerindeki bileşenlerin sistemli çalışmasına ihtiyaç duymaktadır.

Üzerinden elektrik akımı geçen her bir parça sahip olduğu iç direnç nedeni ile akıma tepki vermektedir. Bu tepki sonucu bilgisayar parçalarının ısısı yükselir. Bu ısının etkili olduğu parçalardan birisi de bilgisayarın işlemcisidir. Günlük kullanımlardan da tecrübe edebiliriz ki işlemci sıcaklıkları yüksek değerlere ulaştığında bilgisayarlar koruma amaçlı kapanır ve bu kapanma bizim kullanım verimliliğimizi olumsuz etkileyen bir unsurdur. Benzer örnekler kendini farklı konularda da göstermektedir. Bu sebeple ısı transferi önemli bir araştırma konusu olmuş ve geliştirme yönünde birçok çalışma yapılmıştır.

Bergles tarafından (1983) pasif ve aktif teknikler şeklinde iki ana başlık altında olan 13 adet arttırma tekniği tanımlanmıştır. Pasif tekniklerde iyileştirme için akışkan ilaveleri ya da özel tasarlanmış yüzey geometrileri kullanılmaktadır. Aktif teknikler ise yüzey titreşimi, elektrik alan gibi harici etkenlerin kullanımını gerektirir (Webb, 1994). Aktif ve pasif yöntemler ile iyileştirme yolları Çizelge 1.2' de sunulmuştur.

Pasif yöntemler dışarıdan enerji ve iş takviyesi gerektirmemesi açısından ve ısı transferini artırması sebebi ile avantajlıdır. Pasif yöntemlerin akış alanında yüksek miktarda basınç düşümüne sebebiyet vermesi ise yöntemlerin dezavantajıdır. Pasif yöntemlerde basınç düşümü dezavantajına karşı pompa vb. elemanlara ihtiyaç artmaktadır (Çomaklı vd. 2007). Bazı durumlarda da aktif ve pasif yöntemler daha iyi bir tasarım için birlikte kullanılır.

Çizelge 1.1. Aktif ve pasif Yöntemler ile ısı transferi artırma yolları.

Aktif Yöntemler		Pasif Yöntemler	
Mekanik Araçlar	Emme	İşlenmiş ve Kaplanmış Yüzeyler	Girdap Akış Aygıtları
Yüzey Titreşimi	Jet Akış	Pürüzlü Yüzeyler	Yüzey Gerilimi Aygıtları
Akışkan Titreşimi	Enjeksiyon	Genişletilmiş Yüzeyler	Sökülüp Takılabilir Tübülötörler
Elektrostatik Alanlar	Manyetik Alanlar	Yerleşik İyileştirme	Sıvı ve Gazlar İçin Katkı Maddeleri

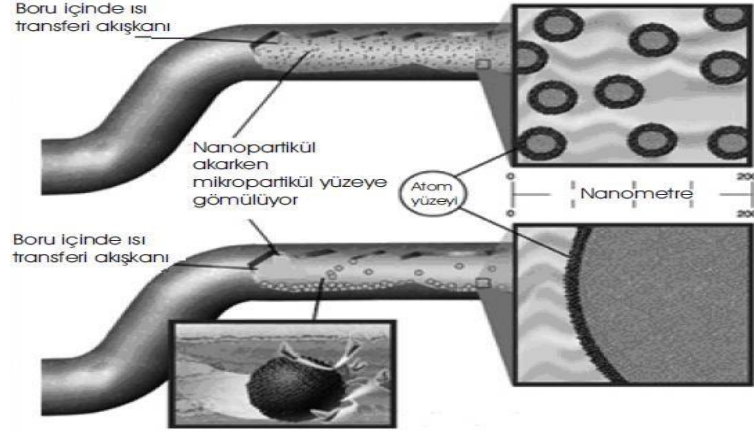
Pasif ısı transferi artırma tekniklerini tasarımın yanında klasik ısı transfer akışkanlarının ısı transfer özelliklerini geliştirmede de kullanılmaktayız. Maxwell'in akışkana mikrometre ve milimetre boyutlarında parçacık ilavesi fikri de çok önceden düşünülmüş olarak katkı maddeleri yoluna bir örnektir. Akışkana kendi ısı iletkenliğinden daha yüksek ısı iletkenliğe sahip parçacık ilave edilmesi, ısı transferini arttıracaktır. Basınç düşümü yaşanması, çökelme, aşındırma ve tıkkama gibi dezavantajlar ise teknolojik gelişme neticesinde aşılmış nanopartiküller ile büyük ölçüde yenilmiştir.

1.2. Nanoakışkanlar

Nanoakışkanlar temel akışkana ilave edilen nano boyutlu katı partiküllerin süspansiyonu olarak tanımlanabilir. Yaklaşık 100 yıl önce Maxwell temel akışkan içerisine termal iletkenliği temel akışkanınkinden daha yüksek olan partiküllerin katılması fikrini ileri sürmüştü (Dilek, 2008). Ancak, partikül boyutlarının mikrometre ve milimetre gibi mertebelerde olması sebebiyle partiküllerin basınç düşümünde çok fazla artışa sebebiyet vermesi, kararlı yapı oluşturamaması, çökmesi gibi problemler sebebi ile bu düşünce uzun süre rafa kaldırılmıştır (Manay, 2014).

Choi 1995 yılında, Argonne National Laboratory'de yaptığı çalışmasında nano boyuttaki katı partikülleri baz akışkanda süspansiyon ederek termofiziksel özelliklerin iyileşmesini sağlamıştır (Choi, 1995). Choi'nin yaptığı çalışma ve yayının ardından (Choi et al. 2001) temel sıvılara iletken nanopartiküllerin düşük hacimli fraksiyonlarının eklenmesi ile sıvıların termal iletkenliklerindeki anormal bir artışı rapor etmişlerdir.

Nanopartiküllerin kullanımı, mikrometre ve milimetre boyutundaki partiküllerin dezavantajlarını çoğunlukla gidermiş ve temel akışkana kıyasla daha yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip nanoakışkanların tasarımlarda tercih edilmesine sebep olmuştur.



Şekil 1.6. Nanopartiküllerin mikropartiküller ile karşılaştırılması (Sahin vd. 2006)

Nanoakışkanlara ait başlıca özellikler aşağıda verilmiştir.(Hadadian et al. 2013).

1. Nanoakışkanlar için gözlenen en önemli özellik, ısıl iletkenliğin beklenenden hatta herhangi bir teorik tahminden anormal şekilde yüksek olmasıdır. Saf akışkanlara göre nanoakışkanların ısıl iletkenliği sıcaklık artışına büyük ölçüde bağlıdır. Nanopartiküllerin geniş yüzey alanı daha fazla ısı transferine izin verir.
2. Nanoakışkanlar baz akışkana göre çok daha yüksek viskozite değerine sahiptir.
3. Kararlılık: Nanopartiküller küçük olduklarından hafiftirler ve bu nedenle çökme oranları daha düşüktür. Nanoakışkanları kararlı hale getiren maddelerin kullanılmasıyla aylar boyunca kararlılık sağlandığı gözlemlenmiştir.
4. Tıkanma yaşanmadan mini/mikro kanal soğutma: Nanoakışkanlar yalnızca ısı transferi için değil, yüksek ısı yüklerine ihtiyaç olan mini ve mikro kanal uygulamaları için de idealdirler. Minikanal ve nanoakışkanların kombinasyonu yüksek termal iletkenliğe sahip akışkanlar ve daha büyük ısı transferi alanı sağlayacaktır. Aynı durum minikanalları tıkanmasından ötürü mikro ve mezo partiküller ile elde edilemez.
5. Azaltılmış aşındırma şartı: Nanopartiküller çok küçüktür ve bu sebeple katı bir duvara verebilecekleri momentum değeri çok daha küçüktür. Bu özellikleri ısı değiştiricileri, pompalar ve boru hatları gibi bileşenlerde aşınma olasılığını azaltır.
6. Nanoakışkanlarda küçük bir hacim parçacık fraksiyonu ile büyük bir termal iletkenlik artışı sağlanabilirse, pompalama gücünde çok büyük bir tasarruf elde edilebilir.

7. Nanoakışkanlar sürtünmeyi etkili bir şekilde azaltabilir.
8. Nanoakışkanların başarılı bir şekilde kullanılması, önemli enerji ve maliyet tasarruflarına neden olacaktır, çünkü ısı değişim sistemleri daha küçük ve daha hafif hale getirilebilir.

1.2.1. Nanoakışkan çeşitleri

Nanoakışkanlar, parçacıkların türüne göre, seramik, saf metalik, alaşım, karbon veya karbon bazlı şeklinde dört grup halinde sınıflandırılabilir. Çeşitler hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir (Hadadian et al. 2013).

1. Seramik nanoakışkanlar: Nanoakışkanlar için denenen ilk materyaller, öncelikle kolay üretilmesi ve kimyasal olarak kararlı oldukları için seramik parçacıklardı. Seramikler alümina ve zirkonya gibi oksitler, karbürler, nitrürler ve silikatlar gibi oksitlenmeyenler ve bu iki grubun birleşimi gibi olan kompozitler şeklinde üç farklı gruba ayrılır.
2. Saf metalik nanoakışkanlar: Metal partiküller içeren nanoakışkan çalışmaları, oksit nanopartikülleri içeren nanoakışkan çalışmalarına kıyasla daha az olsa da, saf metal nanopartiküller içeren nanoakışkanların aynı hacimsel orandaki oksit nanopartiküllü nanoakışkanlardan daha yüksek ısı iletkenlik sergilediği görülmüş ve sonuçlar umut verici olmuştur.
3. Alaşım Nanoakışkanlar: Metallerin alaşım yapılmasındaki amaç ana metale kıyasla daha iyi, daha kullanışlı yeni materyaller elde edebilmektir. Alaşım nanopartikülleri üzerindeki çalışmalar, fiziksel özelliklerinin, kütle numunelerinde gözlemlenenlerinkinden farklı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Literatürde alaşım nanoakışkan çalışması az sayıdadır.
4. Karbon bazlı nanoakışkanlar: Bazı karbon bazlı nano yapıların yüksek ısı iletkenliğe sahip olması, metaller ile kıyaslandığında düşük yoğunluk göstermesi karbon bazlı nanopartiküllerin nanoakışkanlar için kullanılmasını çekici hale getirmektedir. Metal ve metal oksitlerle kıyaslandığında karbon nano tüpler daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir.

1.2.2. Nanoakışkanların hazırlanması

Nanoakışkanların hazırlanması basitçe baz akışkan içerisine nanopartiküllerin ilave edilmesi olarak düşünülemez. Bizim nanoakışkanlardan istediğimiz kararlılık, topaklanmama ve çökme olmaması önemli özelliklerdir. Bu şartların sağlanabilmesi için de nanoakışkanların hazırlanması önem arz etmektedir. Nanoakışkanların hazırlanması için temel olarak faydalanılan iki yöntem mevcuttur. Bunlar tek adım ve iki adım metotlarıdır.

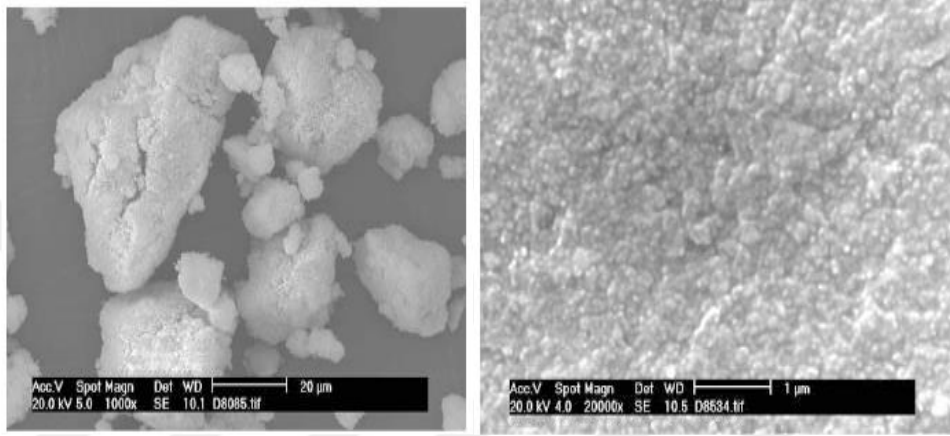
1. Tek adım metodu: Tek adımlı yöntem, nanopartiküllerin direkt fiziksel buhar biriktirme tekniği veya sıvı kimyasal yöntemle hazırlandığı nanoakışkanların sentezi ile nanopartiküllerin hazırlanmasını birleştiren bir işlemdir. Bu yöntemde nanopartiküllerin kurutulması, depolanması, taşınması, yayılması işlemlerinden kaçınılır. Böylece nanopartiküllerin topaklanması en aza indirilir. Nanoakışkanların kararlılığı artar. Yöntemin dezavantajı ise düşük buhar basınçlı olan akışkanlar işleme uygundur (Li, Y et al. 2009).

Tek adım metodu ile hazırlanan nanoakışkanların partikül dağılımının iki adım metodu ile hazırlanan nanoakışkanlardan daha iyi olduğu araştırmalar neticesinde görülebilmektedir. Fakat tek adım metodu ile bir proses sonucu fazla miktar ve farklı partikül konsantrasyonlarında nanoakışkanlar elde edilememesi söz konusudur. Bu sebeple metot ticarileştirilememiştir (Romano et al. 1997).

2. İki adım metodu: Bu yöntemde nanopartiküllerin üretimi nanoakışkanların hazırlanmasından ayrılır. Bu sebeple nanopartiküller hem üretim hem de nanoakışkanların hazırlanması aşamalarında topaklanma yapabilir. Nanopartiküller önce toz halinde üretilir. İkinci adımda nanopartiküller temel akışkana ilave edilir. Topaklanma ısı iletkenliğinin düşmesine ve kanallarda tıkanmaya neden olur. Bu sebeple bu yöntemde çözülmesi gereken önemli problem süspansiyonun kararlılığıdır. Topaklanmayı engellemek ve nanoakışkanın kararlılığını sağlamak için süspansiyonun pH değerini değiştirilmesi, ultrasonik karıştırıcılar kullanımı, süspansiyona yüzey aktif maddeler eklenmesi kullanılan yöntemlerdendir. Günümüzde nanopartiküllerin üretilmiş halde hazır olarak almanın kolay olması sebebiyle iki adım yöntemi çalışmalar oldukça yaygındır (Akyürek 2014).

1.2.3. Nanoakışkanların kararlılığı

Nanoakışkanların hazırlanmasında süspansiyonun kararlı olması oldukça önemlidir. Nanoakışkan içerisinde Wan der Waals etkileşiminin çok güçlü olması, topaklanma ve çökeltme meydana getirir. Şekil 1.8’ de TEM’de (Transmission Electron Microscope) çekilmiş görüntülerde sol tarafta topaklanmış partiküller ve sağ tarafta ise homojene yakın dağılmış partiküller görülmektedir.



Şekil 1.7. Topaklanmış ve homojene yakın dağılmış CuO nanopartikül görüntüleri (Putra et al. 2003)

Nanoakışkanların kararlılığı ilave edilen partikül ve baz akışkanın karakteristiğiyle ilgili olmaktadır. Bu karakteristiklere, partikül ve baz akışkanın kimyasal yapısı, partikül morfolojisi örnek verilebilir (Hwang et al. 2007).

Kararlı bir nanoakışkanın hazırlanması için öncelikle, partikül ile baz akışkan arasındaki yoğunluk farkının azaltılması gereklidir. Akışkanın viskozitesini artırılması ve partikül boyutlarının çok küçük olması gerekir (Boennemann et al. 2005).

1.3. Minikanallar

Minikanallar çoğunlukla minyatür ısı eşanjörü tasarımları için kullanılan elemanlardır. Kompakt ve hafif ısı eşanjörü tasarımlarına olanak tanımaktadırlar. Boyutlarının küçük olması, boyutlarına oranla yüksek performans sergilemeleri, tasarım

1. GİRİŞ

varyasyonları ve sayılarındaki değişimle etkilerinin artırılabilmesi minikanalların avantajlarındandır.

Mini ve mikrokanallar hidrolik çapları açısından geleneksel kanallardan farklıdır ve literatürde kendi aralarında kesin bir ayırım yapılmamıştır. Mehendale ve arkadaşlarının yapmış oldukları tanım (Mehendale et al. 2000) ve Kandlikar ve Grande'nin yapmış oldukları tanım (Kandlikar and Grande 2002) genellikle takip edilmektedir. Kandlikar ve Grande, üretim kısıtlamaları ve Knudsen sayısına göre kanalları ayırırken, Mehendale ve arkadaşları kanalları keyfi olarak sınıflandırmışlardır. Yine de isimlendirmelerden herhangi birinden sapmalar oldukça fazla olup ‘‘minikanallar’’ ve ‘‘mikrokanallar’’ terimleri sıklıkla birbirinin yerine kullanılır (Dixit and Ghosh 2015).

Çizel 1.2. Kanalların boyutlarına göre sınıflandırılması

Araştırmacı	Konvansiyonel (D_h)	Minikanallar (D_h)	Mikrokanallar (D_h)	Geçiş Kanalları (D_h)
(Kandlikar and Grande 2002)	$(D_h) > 3 \text{ mm}$	$200 \mu\text{m} < (D_h) \leq 3 \text{ mm}$	$10 \mu\text{m} < (D_h) \leq 200 \mu\text{m}$	$0.1 \mu\text{m} < (D_h) \leq 10 \mu\text{m}$
Araştırmacı	Konvansiyonel (D_h)	Kompakt (D_h)	Meso kanallar (D_h)	Mikroknallar (D_h)
(Mehendale et al. 2000)	$(D_h) > 6 \text{ mm}$	$1 \text{ mm} < (D_h) \leq 6 \text{ mm}$	$100 \mu\text{m} < (D_h) \leq 1 \text{ mm}$	$1 \mu\text{m} < (D_h) \leq 100 \mu\text{m}$

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Karma Taşınım

MEMS sistemleri ve diğer küçük boyutlu tasarımlarda, amaçlanan etkili soğutmayı sağlamak için karma taşınım ile ısı transferi mekanizması yaygın olarak kullanılmaktadır. Sistem boyutlarına uygun ve kompakt yapıda, etkili ısı eşanjörü tasarımları yapılması karma taşınım ile ısı transferi mekanizmasının iyileştirilmesi ile mümkün olmaktadır. Literatürde bilim insanlarının bu konuyla ilgili birçok araştırma yaptığı görülmektedir. Bilim dünyasının bu konu ile ilgili çalışmalarında genellikle Grashof ve Reynolds sayısı gibi akış parametrelerini ve geometrik parametreleri, bu parametrelerin değişimlerinin ısı performansına olan etkilerini incelediği görülmektedir.

Depew ve August (1971) tarafından yatay boruda yapılan çalışmada laminer akış şartları için karma taşınım etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonucu, verilere dayanarak 2 yeni korelasyon türetilmiş ve bu korelasyonların maksimum %40' a varan yüksek hata paylarına sahip olduğu belirtilmiştir.

Habchi and Acharya (1986) akışkanın hava olduğu dikey bir kanalda laminer karma taşınım için sayısal bir inceleme yapmıştır. Dikkate alınan termal sınır koşulları, her iki plakanın ısıtıldığı simetrik ısıtma ve bir plakanın ısıtıldığı ve diğerinin adiyabatik olduğu asimetrik ısıtmadır. Çalışmada sonuçlar 10^3 , 10^5 , 10^6 mertebelerindeki Rayleigh sayıları ve 0,1, 1, 3 ve 5 Gr/Re^2 değerleri için elde edilmiştir. Sıcaklığın artan Gr/Re^2 ve azalan Rayleigh sayısı ile arttığı gözlenmiştir.

Wu and Perng (1999) ise yatay konumdaki bir kanalda karma taşınımın sayısal olarak incelendiği bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada yatay konumdaki kanal içerisine açı parametresi $30-90^\circ$ arasında tutulmuş eğik plaka yerleştirilmiştir ve bu plakanın ısı performansındaki etkileri araştırılmıştır. Reynolds sayısı değeri 260-530 arasında Grashof sayısı $0-3,2 \times 10^6$ arasında değiştirilmiştir. Sonuç olarak kanal içerisine yerleştirilen eğik plakanın karma taşınım ısı performansını artırdığı saptanmıştır.

Ozsunar and Baskaya (2002) dikdörtgen kanallarda karma taşınım ısı transferini çeşitli çalışma koşulları için deneysel olarak incelemiştir. Sınır şartları kanalın alt yüzeyi üniform bir ısı akısına maruz kalacak, yan duvarlar yalıtılmış ve adyabatik, üst yüzey çevre sıvısına maruz kalacak şekilde belirlenmiştir. Deneyler $Pr=0,7$, en boy oranı $AR=5$ ve 10 , eğim açısı $0^\circ < \theta < 30^\circ$ aralığında, Reynolds sayısı $50 < Re < 1000$ aralığında, Grashof sayısı $7 \times 10^5 < Gr < 4 \times 10^7$ şartları için yapılmıştır. Parametrik çalışmada yerel Nusselt sayısı dağılımları elde edilmiş ve kararsızlığın başlangıcında kanal eğimi, yüzey ısı akısı ve Reynolds sayısı üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlardan bazıları da literatürle karşılaştırılmış ve iyi bir anlaşma gözlemlenmiştir. Reynolds sayısının artması ve artan eğim açısı için kararsızlığın başlamasının geciktiği belirlenmiştir.

Egan et al. (2005) tarafından cam duvarlı muhafaza içinde asılı duran ısıtmalı uzun bir silindir deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada yaygın karma taşınım rejimi olan karşıt akışa karşı kaldırma kuvveti etkileri araştırılmıştır. Muhafaza içerisindeki hava akışı, Reynolds sayısını $32-89$ değerleri arasında tutabilmek için eksenal bir fan ile kontrol edilmiştir. Silindire göre ortalama Nusselt sayıları ölçülmüş ve Rayleigh sayılarının $1,7 \times 10^4 - 4 \times 10^4$ arasında olduğu belirtilmiştir. Çapraz akışa karşı olan kaldırma kuvveti, düşük Reynolds sayılarında ve kararlı durum sıcaklıklarında silindir etrafında çalkantılı bir akış alanı yaratmıştır. Çalışmada çapraz akışa karşı artan atalet kuvvetlerinin ısı transferi değerini artırma eğilimleri açıklanmıştır.

Chong et al. (2007) dikdörtgen kesitli kanalın orta kısmına plaka yerleştirmiş ve kanalı farklı açı koşullarında, karma taşınım ile ısı transferi için deneysel olarak incelemiştir. Kanalın ortasına yerleştirilen plaka üniform ısı akısı ile ısıtılmış ve kanal konumlandırması -60° den $+60^\circ$ 'ye değiştirilmiştir. Deney için Prandtl sayısı $0,7$, Reynolds sayısı $300-1900$ arasında, Grashof sayısı $5 \times 10^2 - 5 \times 10^6$ arasında tutulmuştur. Reynolds sayısı ile ortalama Nusselt sayıları ve basınç kayıpları ilişkileri incelenmiştir. İnceleme sonucunda Reynolds sayısının 1500 'e kadar olan değerleri için ortalama Nusselt sayısının artan kanal açısı ile beraber arttığı lakin Reynolds sayısının 1500 üzeri değerleri için ortalama Nusselt sayısının değerlerindeki değişim kanalın açısından bağımsız olduğu ortaya konmuştur.

Akbari et al. (2008) tarafından yapılan sayısal çalışmada iş akışkanı olarak $H_2O-Al_2O_3$ bileşenlerinden oluşturulmuş nanoakışkan kullanılmıştır. Çalışmada yatay eğimli borularda laminer karma taşınım incelemesi yapılmıştır. Nanoakışkanın hacimsel partikül oranının %0,4 olduğu durum için ısı transfer katsayısındaki artışın saf suya oranla %15 kadar daha fazla olduğu belirlenmiştir. Çalışmada eğim açısının 45° derece olduğu durum için ısı transfer katsayısının maksimum değeri ölçülmüştür.

Shokouhmand and Jafari (2010) çalışmalarında elektrik potansiyeli tarafından etkilenen simetrik duvar sıcaklığı uygulamalı dikey bir mikrokanalda karma taşınım problemini sayısal olarak incelemiştir. Doğrusal olmayan iki boyutlu Poisson denklemi ve iyonik konsantrasyon dağılımını yöneten Nersent-Plank denklemi sonlu hacim yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Çalışmada yük yoğunluğu ve uygulanan elektrik potansiyel alanı ile kaldırma kuvveti etkisi arasındaki etkileşimin neden olduğu gövde kuvvetleri tam Navier-Stokes denklemine dahil edilmiştir. Sonlu hacim yöntemi ile formüle edilen ilgili sayısal denklemleri çözmek için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Çalışmada elektrik potansiyelini sabit tutarken Re sayısını artırıldığında, akışın Poiseuille akışına ve dolayısıyla yerel Nusselt sayısının azalmasına neden olduğu ayrıca Grashof sayısının artırılmasının akışı ve ısı transferini önemli boyutta etkilemediği bulunmuş ve belirtilmiştir.

Dogan and Sivrioglu (2010) deneysel çalışmalarında dikdörtgen kesitli kanala yerleştirdikleri farklı boyutlardaki kanatçıklarla karma taşınım ısı transferini araştırmışlardır. Çalışma sabit ısı akısı sınır şartlarında, iş akışkanı hava olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları sabit Reynolds sayısı ve değişken Rayleigh sayısı koşulları için elde edilmiş ve deney sonuçlarına göre maksimum ısı transferinin optimum 8-9 mm kanat boşluğu için bulunduğu saptanmıştır.

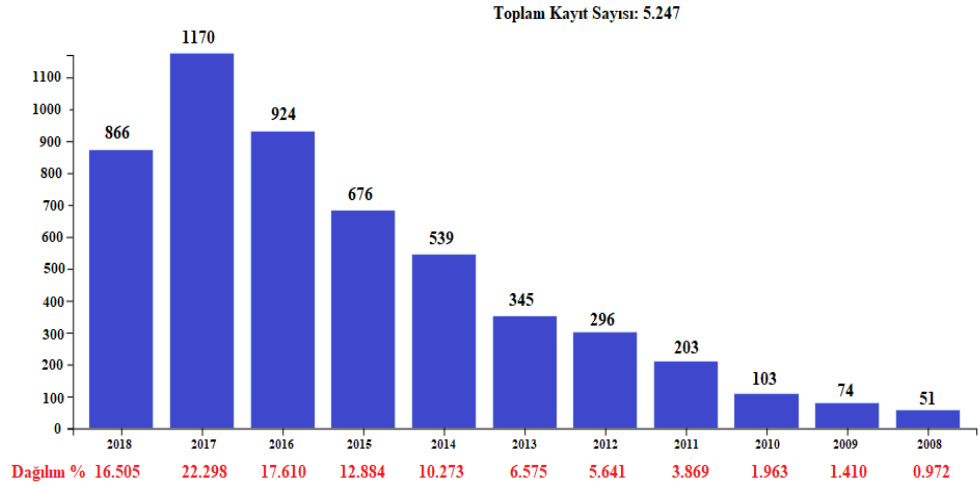
Sheikhrobat et al. (2015) tarafından yapılan çalışmada havalandırılan kare bir boşlukta baz akışkanın su olduğu sıvıya Cu nano parçacık ilavesinin karma taşınım ısı transferine etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Kare şeklindeki kavitenin alt tarafında sabit ısı akısı sınır şartı, üst tarafında sabit sıcaklık sınır şartı ve yan tarafların adyabatik olarak yalıtılması sınır şartları olarak belirlenmiştir. Sol dikey duvardaki bir porttan boşluğa giren ve sağ dikey duvardaki bir porttan ayrılan dış akış yönetim denklemleri, bir sonlu

2. KAYNAK ÖZETLERİ

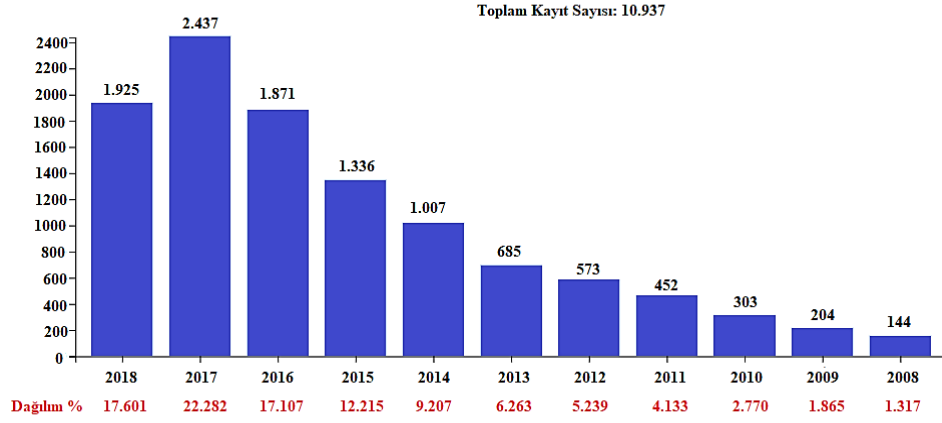
hacim yöntemi ve SIMPLE algoritması ile çözümlenmiştir. Cu partikülünün hacimsel fraksiyonunun ve Richardson sayısının ısı transferi ve akış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarla Cu partikülünün hacimsel fraksiyonundaki bir artışla ısı transferinde artış ve iyileşme gözlemlenmiştir.

2.2. Nanoakışkanlar ve Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ve ısı transferi karakteristiklerine yönelik literatür özeti olan bu bölümde nanoakışkanların ısı iletkenliklerinden, viskozitelerinden, termal performanslarını artıran parametrelerden ve bu artışa sebep olan mekanizmalardan bahsedilecektir. İlave olarak termofiziksel özelliklerin belirlenmesinde önerilmiş modellere değinilecektir. Yine de son yıllarda ilgi odağı olan bu konunun bu bölümde tamamen özetlenmesinin mümkün olmadığını belirtmek gerekir. Şekil 2.1’ de son 10 yıl içerisinde, nanoakışkanlar başlığı altında yazılmış yayın sayısı ve yıllara göre dağılımları verilmiştir. Şekil 2.2’ de ise nanoakışkanlar konu içeriğine sahip son 10 yılda yayınlanan yayın sayısı ve yıllara göre dağılımları görülmektedir.



Şekil 2.1 Nanoakışkan (Tarama: Başlık) çalışmalarının sayıları ve yıllara göre dağılımı



Şekil 2.2. Nanoakışkan (Tarama: Konu) çalışmalarının sayıları ve yıllara göre dağılımı

2.2.1 Isıl iletkenlik

Termal performansı doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biri ısı iletkenliğidir. Bu etken iş akışkanları içinde geçerli olmaktadır. Nanoakışkanların geleneksel akışkanlar yerine tercih edilme nedenlerinden birisi de iyileştirilebilen ısı iletkenliğidir. Baz akışkana eklenen partiküller, ısı iletkenliklerinin baz akışkandan yüksek olması, partiküllerin baz akışkan içerisindeki hareket ve etkileşimleri gibi etkilerle, ısı iletkenliği artırmaktadırlar. Bu nedenle nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerini belirlemek önemli bir konu olmaktadır.

Nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerinin ölçümünde literatürde çoğunlukla aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır (Tawfik 2017).

1. Geçici sıcak tel metodu (transient hot wire method)
2. Kararlı hal paralel plaka tekniği (steady-state paralel plate technique)
3. Sıcak salınım tekniği (temperature oscillation technique)
4. Optik ölçüm metodları (Optical measurement methods)
5. 3- ω metodu (3- ω method, ω : electric current frequency, Hz)

Yukarıdaki yöntemler içerisinde geçici sıcak tel yöntemi, uygulanması kolay ve düşük maliyetli bir yöntem olduğundan, akışkanların termal iletkenliğini ölçmek için kullanılan en yaygın deneysel tekniktir. Yöntemde kullanılan tel ani elektrik sinyallerine

2. KAYNAK ÖZETLERİ

maruz kalır. Bu etkiler sonucu telin zaman ve sıcaklık tepkileri değerlendirilir. Yöntemin ideal matematiksel modeli Fourier yasasına dayanır. Tel hem ısıtıcı hem de termometre olarak kullanılır. Fourier yasası ve sıcaklık verileri, ısı iletkenliği hesaplamak için kullanılır. Geçici sıcak tel metodu bu tez çalışması için de ısı iletkenlik ölçüm metodu olarak tercih edilmiş ve yöntemle ısı iletkenlik ölçümü yapılmıştır.

Nanoakışkanların ısı iletkenliklerini etkileyen parametreler; nanopartikül boyutu, pH değeri, en-boy oranı, kümelenme etkisi, hacimsel fraksiyon, baz akışkan termal değerleri, nanopartikül termal değerleri gibi etkenlerdir. Bu parametrelerden en önemli olanları ise nanoakışkanı oluşturan iki ana bileşen olan baz akışkanın ve nanopartiküllerin ısı iletkenlik değerleridir. Çizelge 2.1’ de daha önceki çalışmalara bağlı olarak Taha-Tijerina et al. (2016) tarafından yapılan çalışmada, nanoakışkan sentezinde kullanılan akışkan ve partiküllere ilişkin ısı iletkenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Klasik ısı transferi akışkanları ve bazı katı malzemeler için ısı iletkenlikler (Taha-Tijerina et al. 2016).

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)
	Gümüş	424	(Perry and Green 2008)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.1.(devam)

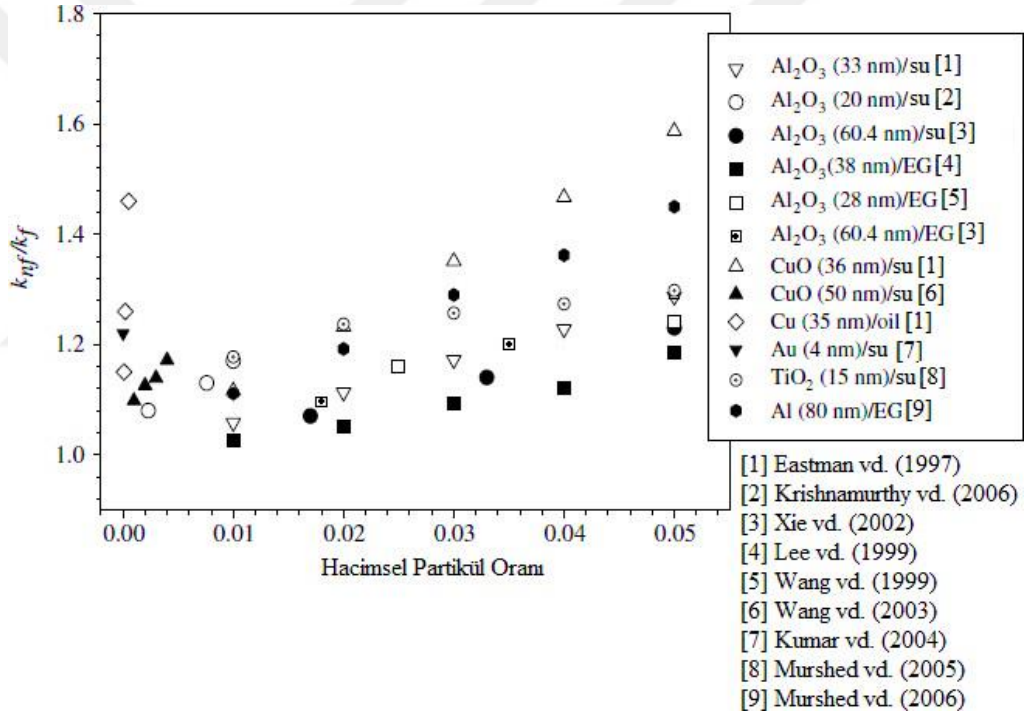
Karbon Yapılar	Tek cidarlı nanotüpler (SWCNTs)	3000-6000	(Marquis and Chibante 2005), (Berber et al. 2000), (Che et al. 2000), (Osman and Srivastava 2001)
	Çok cidarlı nanotüpler (MWCNTs)	~3000	(Kim et al. 2001), (Hong et al. 2007)
	Karbon (elmas)	900-2320	(Speight 2005), (Kang et al. 2006)
	Karbon (grafit)	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 ₂ O ₃)	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 ₂)	34,5±4	(Yan et al. 2014)
	Silisyum Karbür (SiC)	148	(Perry and Green 2008)
	Silisyum Oksit (SiO ₂)	1,4	(Wang et al. 2007b), (Hwang et al. 2006)
	Titanyum Oksit (TiO ₂)	8,4	(Kim et al. 2007)
	Tungsten Disülfür (WS ₂)	32-53	(Peimyoo et al. 2015)
	Çinko Oksit (ZnO)	29	(Kim et al. 2007)

Literatürdeki nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ile ilgili çalışmalarda nanoakışkanların ısı iletkenlik değerleri genellikle partiküllerin süspanse edildiği baz akışkanlarla karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmaya ilişkin bulgular iki farklı şekilde verilmiştir. Bunlardan ilki nanopartikül ilavesi ile baz akışkanın ısı iletkenliğindeki artışın yüzde kesri ile verilmesidir. İkincisiyse nanoakışkanın ısı iletkenlik değerinin baz akışkanın ısı iletkenlik değerine oranı olarak tanımlanan efektif termal iletkenliğin belirtilmesidir.

Efektif termal iletkenlik Eşitlik 2.1' de gösterildiği gibi hesaplanır.

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

Şekil 2.1’ de Mushred et al. (2008) tarafından hazırlanmış olan partikül hacimsel oranına karşılık efektif ısıl iletkenlik katsayılarının değişimi grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde artan partikül yüzdelere karşılık olarak efektif ısıl iletkenliğinde artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra grafikte verilen tüm efektif ısıl iletkenliklerin 1’ den büyük olduğu görülmektedir. Bu durum nanopartiküllerin ısıl iletkenlik değerlerinin her zaman baz akışkanların ısıl iletkenlik değerlerinden büyük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.3. Efektif ısıl iletkenliklerin hacimsel partikül oranı ile değişimi (Murshed et al. 2008)

Giriş bölümünde, partikül boyutlarının nanoakışkanların ısıl iletkenlik değerleri üzerinde önemli bir parametre olduğuna değinilmişti. Bu özelliğin ortaya çıkarılmasında öncü çalışmalardan birisi de Chopkar et al. (2006) tarafından yapılmıştır. Deneysel çalışmada partikül boyutları 10-80 nm aralığında değiştirilmiştir. Deney sonucunda nanoakışkan ısıl iletkenlik değeri ile nanopartikül boyutu arasında lineer olmayan bir ilişki olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca partikül boyutu ile ısıl iletkenlik arasındaki ilişkinin daha küçük partikül boyutları için daha belirgin olduğu sonucuna varılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Daha önce değinildiği üzere sıcaklık, hacimsel partikül fraksiyonu, partikül boyutu nanoakışkanların ısı iletkenliğinde önemli ölçüde etkiye sahiptir. Teng et al. (2010) tarafından yapılan araştırmada Su-Al₂O₃ nanoakışkanının ısı iletkenliği üzerinde sıcaklığın, hacimsel partikül oranının ve partikül boyutunun etkileri araştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada 20 nm, 50 nm, ve 100 nm partikül çapları kullanarak %0,5, %1, %1,5 ve %2 olmak üzere farklı hacimsel partikül oranlarına sahip olan nanoakışkanlar hazırlayarak her bir nanoakışkan için 10°C, 30°C ve 50°C olmak üzere üç farklı sıcaklık değeri için ısı iletkenliğinin değişimini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda ısı iletkenliğinin iyileştirilmesinde sıcaklık artışının daha küçük partikül boyutuna sahip nanopartiküller ile hazırlanan nanoakışkanlarda daha belirgin olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

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

Çizelge 2.2. Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri için birkaç örnek (Li et al. 2009)

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 ₂ O	Tek Adım	0,1	75-100	23,8	(Liu et al. 2006)
Cu/H ₂ 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)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.2.(devam)

Au/Etanol	İki Adım	0,6	4	1,3±0,8	(Putnam et al. 2006)
Fe ₃ O ₄ /H ₂ O	İki Adım	4	10	38	(Zhu et al. 2006)
TiO ₂ /H ₂ O	Tek Adım	5	15	30-33	(Murshed et al. 2005)
Al ₂ O ₃ /H ₂ O	İki Adım	5	20	20	(Xie et al. 2002)
Al ₂ O ₃ /EG	İki Adım	0,05	60	29	(Xie et al. 2002)
CuO/H ₂ O	İki Adım	5	33	11,5	(Zhang et al. 2006)
SiC/H ₂ 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 ₂ 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 ₂ O /FC-72	İki Adım	12	9,8 nm	52	(Yang and Han 2006)

Patel et al. (2010) tarafından nanoakışkanın ısı iletkenliğine partikül boyutu ve sıcaklık etkisini araştıran deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül ilavesi sonucu ısı iletkenliğinin çok fazla arttığı, gerçekleşen bu artışın da mevcut Maxwell modeliyle tahmin edilemeyeceği bildirilmiştir. Ayrıca çalışmada ısı iletkenliğinin sıcaklıkla doğru fakat partikül boyutuyla ters orantılı olduğu da bildirilmiştir.

Nanoakışkanların kimyasal özelliklerine bağlı ısı iletkenlik katsayısı değişimi dikkate alınarak Xie et al. (2002) tarafından farklı pH değerleri için nanoakışkanların ısı iletkenlikleri araştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Hwang et al. (2006) tarafından yapılan çalışmada CuO nanopartikülünden hazırlanan nanoakışkanın ısı iletkenlik değeri nin pH değeri ne önemli ölçüde bağı olduğunu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak literatürde nanoakışkanların ısı iletkenliğine etkiyen; baz akışkanın ısı iletkenlik değeri, nanopartikül ısı iletkenlik değeri, hacimsel fraksiyon, nanopartikül boyutu, sıcaklık, kimyasal etkiler gibi parametreler incelenmiştir. Çok sayıda araştırmacı tarafından pek çok çalışma yapılırsa da birbiri ile tam anlamıyla örtüşen çalışma sayısı ise nispeten azdır. Bu sebeple nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesine yönelik çalışmalar cezbedici olmaya devam etmektedir. Çizelge 2.3 Angayarkanni and Philip (2015) tarafından yapılan, diğer çalışmaların faydası sonucu oluşturulmuş, nanoakışkanların ısı iletkenlikleri ile ilgili özet tablosu niteliğindedir.

Çizelge 2.3. Nanoakışkanların ısı iletkenliklerine ait özet çizelgesi (Angayarkanni and Philip 2015)

Nanopartikül/boyut (nm)	Temel Akışkan	Konsantrasyon ϕ (%)	knf/kf	Kaynak
Al ₂ O ₃	Su	4.3	1.32	Masuda et al. (1993)
CuO/18.6	EG	4	1.2	Lee et al. (1999)
Polietilen		10	1.13	Shin ve Lee (2000)
Bakır/100	Yağı	1.5	1.12	Xuan ve Li (2000)
		8	1.45	
Bakır/100	Su	2.5	1.23	Xuan ve Li (2000)
		7.5	1.78	
Gümüş/100	EG	10000 ppm	1.18	Cho et al. (2005)
CNT/ID: 5-10	EG	1	1.12	
OD: 20-50	Motor Yağı	1	1.3	
Bakır	Su	2	1.74	Jana et al. (2007)
Fe ₃ O ₄	EG	0.3	1.165	Yoo et al. (2007)
CNT/Çap (10) Uzunluk (5-10 μ m)	Su	0.3	1.02	Chen et al. (2008)
		1	1.10	

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.3.(devam)

SiC/170	Su	1	1.04	Singh et al. (2009)
		4	1.22	
Al ₂ O ₃ /10	PAO	0.4	1.05	Buongiorno et al. (2009)
		2.8	1.15	
Fe ₃ O ₄ /8.7	Gaz Yağı	1.71	1.06	Shima et al. (2010)
		5.03	1.125	
CuO/10	EG	0.18	1.07	Shima et al. (2010)
		0.92	1.12	
		1.14	1.14	
γ-Al ₂ O ₃	Su+EG	0	1	Serebryakova et al. (2015)
		0.3	1.005	
		0.6	1.02	
		1.1	1.03	
		1.4	1.04	
Nanodiamond	EG	0.5	1.025	Branson et al. (2013)
		1.9	1.12	
Fe ₃ O ₄ /15	Gaz Yağı	0.2	1.01	Yu et al. (2010)
		0.85	1.11	
Fe ₃ O ₄	Gaz Yağı	0.25	1.04	Parekh et al.. (2010)
		1	1.32	
ND-Ni/25	Su	0.012	1.07	Sundar et al. (2014)
		0.05	1.21	
ND-Ni/25	EG	0.62	1.03	Sundar et al. (2014)
		3.03	1.2	
TiO ₂ /13	Su	0.62	1.001	Angayarkanni et al. (2014)
		3.03	1.08	
CuO/<50 nm	Su	1	1.08	Ponmani et al. (2014)
		2	1.12	
		4	1.15	
ZnO/<50 nm		0.01	1.27	Ponmani et al. (2014)
		0.05	1.53	
		0.02	1.09	
		0.08	1.12	

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.3.(devam)

Grafen	Su	0.01 0.06	1.24 1.33	Mehrali et al. (2014)
Grafen	EG	0.05 0.2	1.041 1.119	Ma et al. (2014)
Fe/98 nm	Su	0.003 0.0025 0.01	1 1.01 1.05	Esfe et al. (2015)
Cu	Tetradekan	0.001 0.01 0.015 0.020	1.02 1.06 1.09 1.14	Jiang et al., (2015)
Co3O4	EG	0 0.01 0.02 0.03 0.045 0.06	1 1.04 1.09 1.13 1.17 1.23	Mariano et al. (2015)
SiC	Su	0.1 1 2 3	1.033 1.039 1.05 1.07	Lee et al. (2011)
Al2O3	Metanol	0.01 0.37	1.06 1.07	Pang et al. (2012)
SiO2		0.5 0.85 0.01 0.37 0.5	1.11 1.14 1.011 1.012 1.051	Pang et al. (2012)

2.2.2 Viskozite

Nanoakışkanların önemli termofiziksel özelliklerinden birisi de viskozitedir. Akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanan viskozite değeri özellikle zorlanmış akışlar için basınç düşümüne sebebiyet verebilmesi nedeni ile pompa gücüne de etkimektedir. Tasarımda önemli rol oynayan basınç düşümü ile viskozitenin doğrudan ilişkili olması araştırmacıların bu alanda çalışma yapmalarını teşvik etmiştir. Literatürde genel olarak baz akışkana nanopartikül ilavesi ile beklenildiği üzere viskozite değerinde belirgin bir artış olduğu bildirilmiştir. Bunun yanı sıra viskozite değerinin partikül oranı, şekli, büyüklüğü ve kümelenme durumlarına da bağlı olduğu rapor edilmiştir. Viskozite değerindeki artış genel olarak iki şekilde belirtilebilmektedir. Bunlardan birincisi nanoakışkanın baz akışkan ile kıyaslanarak artışın yüzdeler olarak verilmesidir. İkincisi ise mevcut artışın efektif viskozite kavramı ile tanımlanmasıdır.

Efektif viskozitenin tanımı aşağıdaki gibidir.

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

Masuda et al. (1993) tarafından yapılan çalışmada Al₂O₃, SiO₂ ve TiO₂ nanopartiküllerinin saf su içerisine katılarak süspansiyon edilmesinin viskozite üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel yapılan bu çalışmada sıcaklık değeri oda sıcaklığı ve 67°C arasında tutulmuştur. TiO₂-Su nanoakışkanı için %4.3'lük hacimsel partikül oranında viskozitede %60 oranında artış değeri rapor edilmiştir. Buna ilave olarak, %2'den yüksek konsantrasyonlarda Al₂O₃ ve SiO₂ nanoakışkanlarının efektif viskozite değerlerinin, iki ve üzerinde olduğu sonucuna varılmıştır. Wang et al. (1999) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada ortalama partikül boyutları 28 nm ve 23 nm olan Al₂O₃ ve CuO nanopartikülleriyle hazırlanmış nanoakışkanların viskozite değerleri araştırılmıştır. Baz akışkan olarak saf su, etilen glikol ve motor yağı seçilmiştir. Çalışmada nanoakışkanların hazırlık safhasında farklı yöntemler tercih edilmiş ve bu yöntemlerin nanoakışkan viskozitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda mekanik karıştırma yöntemiyle hazırlanan nanoakışkanların, filtrasyon ve yüzey kaplama yöntemleri ile hazırlanmış olan nanoakışkanlara göre daha yüksek

2. KAYNAK ÖZETLERİ

viskozite değerine sahip oldukları bildirilmiştir. Bu sonuç mekanik karıştırma yöntemlerinin, nanopartiküllerin temel akışkan içerisine dağıtılmasında yetersiz kalmasıyla izah açıklanmıştır. Ayrıca çalışmada %3 hacimsel partikül oranına sahip Al₂O₃ nanoakışkanı için viskozite değerindeki artış %30 olarak rapor edilmiştir.

He et al. (2007) tarafından yapılan çalışmada, partikül oranının ve partikül boyutunun etkisini su bazlı TiO₂ nanoakışkanları için deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırmada hacimsel nanopartikül oranı üst sınır değeri olarak %1.18 belirlenmiş ve viskozite ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar, artan hacimsel partikül oranı sebebiyle nanoakışkan viskozitesinin arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca hacimsel konsantrasyon ile viskozite değeri arasındaki ilişkinin lineer olmadığı da bildirilmiştir.

Azmi et al. (2016b) tarafından yapılan çalışmada, farklı çalışmalardan yararlanılarak çizelge 2.4' deki özet tablo oluşturulmuştur.

Çizelge 2.4. Nanoakışkan viskozitesi için özet tablo (Azmi et al. 2016b)

Kaynak	Partikül Tipi	Temel Akışkan	Hacimsel Oran (%)	Parçacık Boyutu (nm)	Maksimum Artış (%)	Sıcaklık
(Masuda et al. 1993)	Al ₂ O ₃	Su	1,30–4,30	13	300	31,85–86,85 °C
	SiO ₂	Su	1,10–2,40	12	200	
		Su	3,10–4,30	27	60	
(Pak and Cho 1998)	Al ₂ O ₃	Su	0,99–10	13	19900	25 °C
	TiO ₂	Su	0,99–10	27	200	
(Wang et al. 1999)	Al ₂ O ₃	Su	0–6,0	28	85	Oda sıcaklığı
		EG	0–3,5		40	
(Das et al. 2003), (Putra et al. 2003)	Al ₂ O ₃	Su	1–4	38	46	20–60 °C
(Tseng and Lin 2003)	TiO ₂	Su	5–12	44013	120000	Mevcut değil
(Heris et al. 2006)	Al ₂ O ₃	Su	0,2–3,0	20	40	24 °C
	CuO			50-60	60	

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.4.(devam)

(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 ₂	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 ₂	Su	0,24–1,18	20	11	22 °C
(Nguyen et al. 2007a), (Nguyen et al. 2008)	Al ₂ O ₃	Su	0–13	36/47	450	75 °C ortam
	CuO			29	1800	
(Lee et al. 2008)	Al ₂ O ₃	Su	0,01–0,3	30	3	21–39 °C
(Turgut et al. 2009)	TiO ₂	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 ₂ O ₃	Motor soğutma sıvısı	0,1–3,5	<50	300	10–80 °C
(Tavman et al. 2010)	SiO ₂	Su	0,4–1,85	12	90	20–50 °C
	TiO ₂		0,2–2,0	21	20	
	Al ₂ O ₃		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 ₂	Su	0–4,0	50	49	30 °C

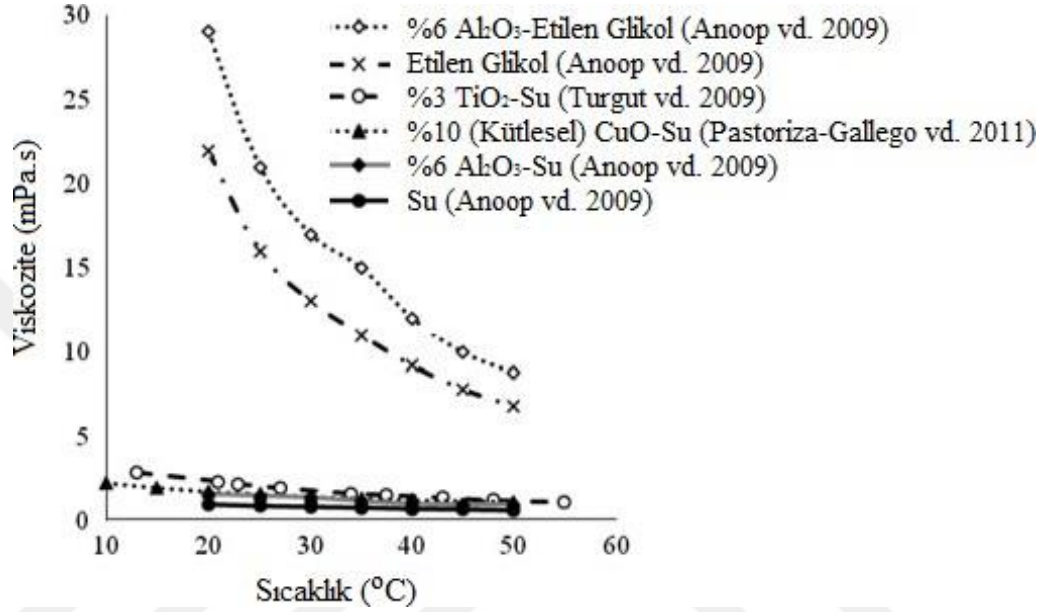
Tavman et al. (2010) tarafından yapılan çalışmada %2' ye kadar hacimsel partikül oranlarına sahip ve sırası ile 12, 21 ve 30 nm partikül boyutlarında SiO₂, TiO₂ ve Al₂O₃ nanopartikülleri ile hazırlanan su bazlı nanoakışkanların viskozite değerlerinin belirlenmesi için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucu, artan partikül oranlarının nanoakışkanların viskozite değerlerinde büyük oranda artışa sebebiyet verdiği bildirilmiştir.

Pastoriza-Gallego et al. (2011) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada Su-CuO nanoakışkanının sıcaklığa bağlı viskozite değeri değişimi 283,15 K ile 323,15 K

2. KAYNAK ÖZETLERİ

arasında incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda viskozite değerinin sıcaklık değeri artışıyla düşüş gösterdiği görülmüştür.

Şekil 2.2’de Mahbubul et al. (2012) tarafından yapılan çalışmada, çeşitli çalışmalar için viskozite değerinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklık ile değişimi (Mahbubul et al. 2012)

2.2.3 Isıl iletkenlik ve viskozite modelleri

Nanoakışkanların ısıl iletkenlik değerlerini belirleyebilmek amacıyla yapılan araştırmalar sonucunda literatüre çok sayıda teorik model eklenmiştir. Maxwell (1881) tarafından yapılan öncü çalışmada, karışıma küresel partiküllerin eklenmesi şartı için geçerli olan bir model ortaya konmuştur. Modelde katı partiküllerden oluşan karışımın incelenmesi hedeflenmiştir. Yalnızca küresel partikül eklenmesi şartı için geçerli olduğu bu modelin nanoakışkanlar için uygulanmasına engel olmuştur.

Hamilton and Crosser (1962) tarafından yapılan çalışmada, küresel ve küresel olmayan parçacıklar içinde geçerli olan bir model sunulmuştur. Modelde Çizelge 2.5’de verilmiş olan denklemde bulunan n şekil faktörü olup, $n=3/\psi$ şeklinde yazılır. Bu gösterimdeki ψ değeri, partikül küreselliğini ifade eder ve partikül ile eşit hacimde olan kürenin yüzey alanının, partikülün yüzey alanına oranı olarak tanımlanır. Xuan and Li

(2000) çalışmalarında Hamilton-Crosser modelini kullanmış ve ψ değerinin 0,5-1 aralığında olduğu durumlar için nanoakışkanların ısı iletkenliklerini tanımlayan bir model sunmuşlardır.

Yu ve Choi (2003) tarafından yapılan çalışmada, iki fazlı karışım durumu için ısı iletkenliğin belirlenebilmesine yönelik bir model sunulmuştur. Literatürde Bruggeman (1935) modeli de homojen küresel partikül içeren karışımlar için yaygın kullanılan, güçlü bir modeldir. Wang et al. (2003) tarafından yapılan çalışmada, modelin modifiyesi yapılmış ve nanopartiküllerin kümelenme etkisini düşürmek amaçlanmıştır. Çizelge 2.5 nanoakışkanların ısı iletkenliklerine ilişkin modelleri içeren özet tablo niteliğindedir.

Çizelge 2.5. Isıl iletkenlik modelleri özet çizelgesi (Angayarkanni and Philip 2015)

<p>1. (Maxwell 1881)</p>	$\frac{k}{k_b} = \frac{1+2\beta\phi}{1-2\beta\phi}, \beta = \frac{(k_p - k_b)}{(k_p + 2k_b)}$
<p>2. (Bruggeman 1935)</p>	$\frac{k}{k_b} = k_b \frac{\left[(3\phi - 1) \frac{k}{k_b} + (2 - 3\phi) + \sqrt{\Delta} \right]}{4}$ $\Delta = (3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_p}{k_b} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi^2) \left(\frac{k_p}{k_b} \right)$
<p>3. (Hamilton and Crosser 1962)</p>	$\frac{k}{k_b} = k_b \left[\frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_b + (k_b - k_p)\phi} \right]$
<p>4. (Yu and Choi 2004)</p>	$\frac{k}{k_b} = \left(1 + \frac{n\phi A}{1 - \phi A} \right) k_l, A = \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} \frac{k_{pj} - k_b}{k_{pj} + (n-1)k_b}$
<p>5. (Hashin and Shtrikman 1962)</p>	$k_b \left[1 + \frac{3\phi k}{3k_b + (1-\phi)k} \right] \leq k \leq \left[1 - \frac{3(1-\phi)k}{3k_p - \phi k} \right] k_p$
<p>6. (Avsec and Oblak 2007)</p>	$\frac{k}{k_b} = \left[\frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)\alpha_e (k_b - k_p)}{k_p + (n-1)k_b + \alpha_e (k_b - k_p)} \right]$

Çizelge 2.5. (devam)

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)	$\frac{k}{k_b} = \frac{(k_p - k_r)\varphi k_r [2\gamma_1^3 - \gamma^3 + 1] + (k_p + 2k_r)\gamma_1^3 [\varphi\gamma^3 (k_r - k_b) + k_b]}{\gamma_1^3 (k_p + k_r) - (k_p - k_r)\varphi [\gamma_1^3 + \gamma^3 - 1]}$
13. (Yamada and Ota 1980)	$\frac{k}{k_b} = \frac{\frac{k_p}{k_b} + K - K\varphi \left(1 - \frac{k_p}{k_b}\right)}{\frac{k_p}{k_b} + K + K\varphi \left(1 - \frac{k_p}{k_b}\right)} k_b, K = 2\varphi^{0,2} (l_p/d_p)$
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)	$\frac{k}{k_b} = k_b + (1-\varphi) + k_p\varphi + \varphi h\delta_T$

Çizelge 2.5. (devam)

18. (Timofeeva et al. 2007)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\varphi$
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)	$\frac{k}{k_b} = \frac{\alpha' \left(1 + \frac{\Delta}{d}\right)}{1 + \frac{a' \Delta}{d}}$
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)	$\frac{k}{k_b} = \left[1 + C \frac{f^a k_b \rho_p c_p T^{1,5}}{k_b h \mu^{0,5} d^{0,5} p} \exp(-3,8T_b/T) \left(\frac{c_b}{c_p}\right)^b \right]$
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)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\varphi \frac{\alpha - 1}{\alpha + 2}; \alpha = \frac{r_p}{R_b k_b}$

Çizelge 2.5. (devam)

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)	$\frac{k}{k_b} = \frac{2 + \left(\frac{k_p}{k_b}\right) + 2\varphi \left[\left(\frac{k_p}{k_b}\right) - 1\right]}{2 + \left(\frac{k_p}{k_b}\right) - \varphi \left[\left(\frac{k_p}{k_b}\right) - 1\right]}$

Isıl iletkenliğe kıyasla nanoakışkanların viskozite değerlerinin belirlenmesi daha az çalışılmış bir konudur. Einstein'ın nanoakışkanların reolojik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapmış olduğu klasik analiz çalışması konuya temel oluşturmuştur. Sıvılarda süspansiyon edilen küre parçacıkların viskozite değerini belirlemeye yönelik öncü çalışma Einstein (1906) tarafından yürütülmüştür. Brujin (1942) yalnızca düşük hacimsel oranlar için doğru sonuçlar verebilmekte olan yöntemi geliştirmiş, yüksek hacimsel oranlara uygun olacak halde düzenlemiştir. Bir başka genişletilmiş Einstein modeli ise Mooney (1951) tarafından sunulmuştur. Ayrıca Brinkman (1952) tarafından yapılan sayısal çalışmada Einstein modelini geliştirilerek, %4 hacimsel oranlara uygun sonuçlar veren bir model sunulmuştur.

Masoumi et al. (2009) tarafından nanoakışkanlarda Brownian hareketi etkileri göz önünde bulundurularak yeni bir model sunulmuştur. Model güvenilir bir model olma özelliği taşıması sebebiyle bir çok bilim insanınca kabul görmüş ve araştırmacılar tarafından yaygın kullanılan bir model olmuştur. Sayısal çalışmalar sonucu ortaya çıkan viskozite modellerinden bazıları Azmi et al. (2016) tarafından yapılan çalışmada, önceki çalışmalar dikkate alınarak özet tablo şeklinde sunulmuştur. Bu özet tablo Çizelge 2.6' da gösterilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.6. Nanoakışkanların viskozite modellerine ilişkin sayısal çalışmalar (Azmi et al. 2016)

Yazar	Model	Tanım
(Einstein 1906)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2,5\varphi$	%1 den düşük hacim oranında süspansiyonlar için
(De Bruijn 1942)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{1}{1 - 2,5\varphi + 1,522\varphi^2}$	Daha yüksek hacimsel oranlar için elıştırılmış Einstein modeli
(Vand 1948a), (Vand 1948b)	$\log \mu_{eff} = \log \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{2,5\varphi + 2,7\varphi^2}{1 - 0,609\varphi}$	Brownian etkisinin ihmal edildiği küresel geometrideki parçalar için
(Mooney 1951)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \exp\left(\frac{2,5\varphi}{1 - \varphi/\varphi_m}\right)$	Sonsuz seyreltilmiş küresel partiküllü süspansiyonlar için
(Brinkman 1952)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{1}{(1 - \varphi)^{2,5}}$	%4'e kadar hacimsel orandaki süspansiyonlarda kullanılabilir
(Krieger and Dougherty 1959)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-[\eta]\varphi_m}$	%4'e kadar hacimsel orandaki süspansiyonlarda kullanılabilir
(Frankel and Acrivos 1967)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{9}{8} \left[\frac{(\varphi/\varphi_m)^{1/3}}{1 - (\varphi/\varphi_m)^{1/3}} \right]$	%4'e kadar hacimsel orandaki süspansiyonlarda kullanılabilir
(Nielsen 1970)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = (1 + 1,5\varphi) \exp\left(\frac{\varphi}{1 - \varphi_m}\right)$	Düşük hacimsel oranlar için kabul edilebilir
(Lundgren 1972)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2,5\varphi + \frac{25}{4}\varphi^2$	%4'e kadar hacimsel orandaki süspansiyonlarda kullanılabilir
(Batchelor 1977)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2,5\varphi + 6,2\varphi^2$	%10 a kadar hacimsel oranlar için kabul edilebilir

Çizelge 2.6. (devam)

(Graham 1981)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2,5\varphi + \frac{25}{4} \times$ $\left[\frac{1}{\left(\frac{H}{d_p}\right)\left(2 + \frac{H}{d_p}\right)\left(1 + \frac{H}{d_p}\right)^2} \right]$	Frankeland ve Acrivos (1967) modelinin geliştirilmiş halidir
(Masoumi et al. 2009)	$\mu_{nf} = \mu_b + \frac{\rho_p V_b d_p^2}{72C\delta}$ $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\varphi} d_p}$ $C = \mu_b^{-1} (\alpha\varphi + b)$	Brownian hareketi etkileri dikkate alınarak hazırlanmıştır

Çizelgede bulunan sayısal modellerin hepsi geniş bir hacimsel oran ölçeğinde veya partikül boyutunda hazırlanan nanoakışkanların viskozite değerlerini belirlemede tam anlamıyla yeterli olmamaktadır. Modellerde beklentinin altında sonuç alınmasına; partikül şekli, partikül boyutu, hacimsel orandaki değişim gibi herhangi bir parametre değişimi sebep olabilmektedir. Bu sebeple araştırmacılar daha doğru bir model ihtiyacı sebebiyle, daha güçlü bir model ortaya çıkarabilme amacıyla yarı deneysel yöntemlere başvurmuşlardır. Bu yöntemlerde genellikle bazı parametreler (yaygın olarak partikül şekil ve boyutu) sabit tutulmuştur.

2.3. Nanoakışkanların Isıl İletkenlik Değerini Artıran Mekanizmalar

Bu kısımda nanoakışkanların ısı iletkenlik değerinde artışa neden olan mekanizmalar açıklanacaktır.

2.3.1. Nanopartiküllerin Brownian Hareketi

Brownian hareketi, süspansiyon karışımındaki partiküllerin baz akışkan içerisinde rastgele hareketi sonucu oluşmaktadır. Nanoakışkanlar düşünüldüğünde, baz akışkan içindeki nano boyuttaki partiküller bu rastgele hareketleri ile enerji taşımaktadırlar. Ayrıca nanoakışkanlarda, nanopartiküllerin etrafında baz sıvının da hareket edişi sebebi ile olan mikro taşınım etkisi de dikkate alınmalıdır. Literatürde Brownian hareketi ile ilgili birçok araştırma bulunmaktadır.

Bhattacharya et al. (2004) tarafından yapılan çalışmada Brownian hareketi göz önünde bulundurularak, nanoakışkanlardaki ısı iletkenlik artışını belirlemeye yönelik Brownian dinamiklerinin simülasyonu kullanılmıştır. Çalışmada nanoakışkana ait gerçek efektif ısı iletkenlik değeri eşitlik 2.3' teki gibi açıklanmıştır.

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

Eşitlikte bulunan k_p değeri yalnızca nanopartiküllerin ısı iletkenliğini değil, ilaveten nanopartiküllerin ısı iletkenliğine etkileyen, Brownian hareketi etkisini de kapsamaktadır.

Araştırma sonucu Brownian dinamikleri simülasyonu metodu ile Cu-etilen glikol ve Al₂O₃-etilen glikol nanoakışkanlarının farklı yüzde oranlarına ilişkin belirlenen ısı iletkenlik değerlerinin, literatürdeki çalışmalarla iyi bir uyum sergilediği bildirilmiştir.

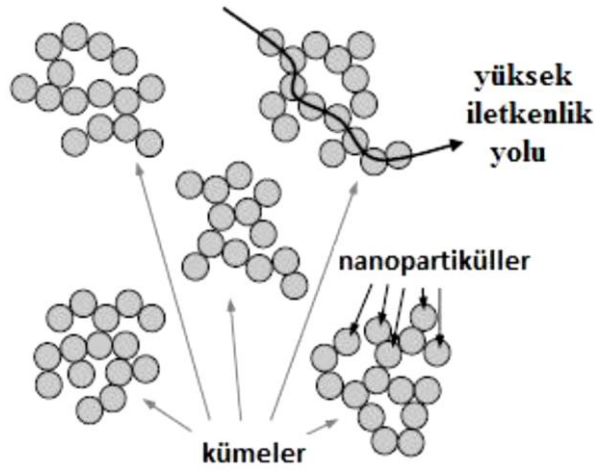
Prasher et al. (2005) tarafından çalışmada Brownian hareketinin ve Brownian hareketi tarafından meydana gelen mikro taşınımın etkisinin de değerlendirildiği bir araştırma yapılmıştır. Kümelenme etkisinin incelenmediği bu çalışmada, Brownian hareketi vesilesiyle ısı iletkenlikte anormal bir artış olduğu rapor edilmiştir.

Ayrıca literatürde Brownian hareketinin efektif ısı iletkenliği artırmada çok etkili olmadığını bildiren araştırmalarda mevcuttur. Evans et al. (2006) tarafından yapılan araştırma sonucu, teorik olarak ısı iletkenlik artışının çok az kısmının Brownian hareketine bağlı olarak gerçekleştiği ileri sürülmüştür. Bu bilgi ayrıca moleküler dinamik

simülasyonlar tarafından da teyit edilmiştir. Sonuç olarak, nanoakışkanlarda görülen ısı iletkenlik değerinin artışının ana etkeni olarak Brownian hareketinin kabul edilemeyeceği belirlenmiştir.

2.3.2. Nanopartiküllerin Kümelenmesi

Literatürde yapılan pek çok çalışma sonucu, nanopartiküllerin bir araya gelerek kümelenmeler meydana getirebildiği bildirilmiştir. (Prasher et al. (2006); He et al. (2007)). Evans et al. (2008) tarafından yapılan çalışmada, nanoakışkanlarda meydana gelen nanopartikül kümelenmelerinin ısı transferini hızlandırdığı bildirilmiştir. Buna sebep olan etkense ısının katı partiküllerde sıvı matrise göre daha hızlı iletilmesidir. Şekil 2.3 'te bu durumun şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 2.5. Yüksek ısı iletkenlik yolu (Özerinç et al. 2010)

Evans et al. (2008) tarafından yapılan çalışma sonucu nanoakışkan ısı iletkenliği ve ara yüzey ısı direnci arasındaki etkileşime dayanarak aşağıdaki ısı iletkenlik modeli rapor edilmiştir.

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

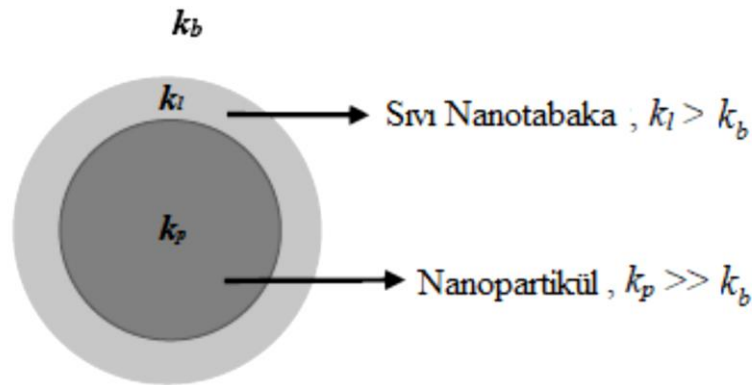
Eşitlik 2.4' te görülen φ_{cl} değeri, kümelerin hacimsel partikül oranını, k_{cl} değeri ise kümelerin ısı iletkenlik değerini ifade etmektedirler. Teorik çalışmaya ek olarak

Monte Carlo simülasyonu vasıtasıyla da efektif ısı iletkenlik değeri belirlenmiş ve sonuçlar birbiriyle çoğunlukla örtüşmüştür. Bu bilgiye dayanarak kümelenme miktarının artışının efektif ısı iletkenliği artırıcı bir etkisi olduğu söylenebilir. Fakat artan partikül oranları için durum değışiklik göstermekte olup ısı iletkenlikte azalma meydana gelmektedir. Bunun nedeni olarak, kümelenmenin optimum düzeyi aşması durumunda istenmeyen çökme durumunu meydana getirmesi söylenebilir.

Feng vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, nanopartikül boyutlarının etkilerini de dikkate alınarak, kümelenmenin ısı iletkenlik artışına etkilerini araştırılmış ve bir model sunulmuştur. Çalışma sonucunda küçülen partikül boyutlarında van der Waals kuvveti etkilerinin güçlenmesi sebebiyle birbirlerine daha yakın kümelenme formasyonlarının görüldüğü rapor edilmiştir. Çalışmada, kümelenmenin ve partikül çaplarındaki bu küçülmenin ısı iletkenlik katsayısının artışına neden olduğu bilgisi de verilmiştir.

2.3.3. Nanopartiküller Etrafında Sıvı Katmanlaşması

Nanopartiküllerin yüzeyinde ve etrafında baz sıvı moleküllerinin katman oluşturması beklenen bir durumdur. Nanoakışkanlar için partikül etrafında meydana gelen bu nano katmanların ısı iletkenliği artırıcı bir etkisi olup olmadığı irdelenmiştir. Bu durum şekil 2.4' te temsilen gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Nanopartikül etrafında oluşan katmanlı yapı (Özerinç 2010)

Bu nanokatmanların ısı iletkenliğiyle kalınlığı araştırılırken tatmin edici deneysel verilerin elde edilememesi mekanizmanın dezavantajıdır. Yu and Choi (2003) tarafından

yapılan çalışmada nanokatmanların kalınlığı ve ısı iletkenliği için bazı değerler kabul ederek, nanopartiküllerin etrafındaki baz sıvı katmanının etkisine ait bir model sunulmuştur.

Lee (2007) araştırmasında nanokatmanın termal iletkenliğinin ve kalınlığının belirlenmesi amacıyla parçacıkların etrafında elektriksel çift tabaka formasyonu yaklaşımını önermiştir. Yapılan araştırmaya göre nanokatman kalınlığı, dielektrik sabiti, iyonik güç ve nanoakışkanın sıcaklığına bağlıdır. Nanokatmanın termal iletkenliğinin parametre değerleri olarak; toplam yüklenmiş yüzey yoğunluğu, elektriksel çift tabakadaki iyon yoğunluğu, nanoakışkan pH değerı, nanopartikül ve baz akışkanın ısı iletkenlik değerleri gösterilmiştir.

Tillman and Hill (2007) tarafından yapılan çalışmada ise nanokatman kalınlık ve ısı iletkenlik değerı için teorik farklı bir yol önerilmiştir. Çalışmalarında öneri olarak, nanokatmanın termal iletkenliğinin radyal dağılımı ile nanokatmanın kalınlığı arasındaki ilişki için, uygun şartlar hazırlayarak klasik ısı iletim denklemi kullanılmasını sunmuşlardır.

Xue et al. (2004) tarafınan yapılan çalışma ise, nanoakışkanların ısı iletkenlik değerini etkileyen mekanizmalar arasında, nanopartikül etrafında oluşan nanokatmanların etkisinin olmadığını bildiren çalışmalardan birisidir.

2.3.4. Nanopartiküllerde Balistik Fonon İetimi

Katı fazlarda parçacıkların karakteristik büyüklüğu göz önüne alındığında, fononların ortalama serbest yolunun, bu uzunluktan daha küçük olduğu durumlar için difüzyon ısı transferinin geçerli olması, bilinen bir durumdur.

Geiger ve Poirier'in (1973) tarafından geliştirilen yöntemler kullanılarak oluşturulan bu tahmin sonucu, 35 nm altındaki partikül çapları için meydana gelen ısı transferinin difüzyon değil balistik olduğu sonucuna ulaşılabilir. Fakat yine de balistik ısı transferi olgusunun ısı iletkenlik artışındaki etkisinin henüz tam anlamıyla

açıklanamayacağı bildirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada teorinin nanopartiküllerin birbirlerine çok yakın bulunduğu ve parçacık boyutlarının oldukça küçük olduğu durumlar için geçerli olabileceği savunulmuş ve Brownian hareketinin partiküller arası mesafeyi azaltıcı etkisi ile destekleyici olacağı bildirilmiştir.

Nie et al. (2008) tarafından konuyla alakalı farklı bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada nanopartiküllerin baz akışkan içerisine ilavesiyle, ortalama serbest yolun değişimi teorik olarak irdelenmiştir. Araştırmacılar, fononların ortalama serbest yolunda belirgin bir değişimin mevcut olduğu tabaka yapısının, yaklaşık 1 nm'lik bir mesafede sınırlı olduğu bilgisini sunmuşlardır. Sonuç olarak, bu şekilde yüksek derecede yerel bir etkinin ısı iletkenlikteki artıştan sorumlu olamayacağı sonucuna varmışlardır. Ayrıca nanopartiküllerin varlığına bağlı olarak, sıvı fazda fonon taşıma hızının değişimi de irdelenmiş ve etkisinin dikkate değer olmadığı gözlemlenmiştir.

2.3.5 Yakın Alan Radyasyonu

Domingues et al. (2005) tarafından iki partikül arasındaki ısı transferine yönelik öncü çalışma gerçekleştirilmiştir. Araştırmada moleküler dinamik simülasyonu ile irdeme yapılmış ve nanopartiküller arasındaki mesafenin, partikül boyutlarından küçük olduğu bulunmuştur. Bu durumda nanopartiküller arasındaki yakın alan radyasyonu etkisinin, ısı iletkenliği artırıcı kayda değer etki gösterebileceği bildirilmiştir. Bu etkinin 10 nm'den küçük boyutlardaki partiküllerde önemli olup Brownian hareketi tarafından destekleneceği söylenmiştir.

Ben-Abdallah (2006) tarafından alakalı bir çalışma yapılmış ve Bakır-Etilen Glikol nanoakışkanı seçilerek sayısal incelenmiştir. Çalışma sonucu yakın alan etkileşiminin ısı iletkenlik katsayısı üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı bildirilmiştir.

2.4. Nanoakışkanların ısı transferi

Nanoakışkanlar, baz akışkana katılan partiküllerin katıldıkları baz akışkandan daha yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip olması nedeni ile geleneksel ısı transfer akışkanlarına oranla daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olmaktadır. Pasif yolla artırılan ısı iletkenlik, tasarımlarda daha iyi performans elde edilmesine de imkan sunmaktadır. Bu sebeple nanoakışkanların ısı transferi özellikleri, araştırmacılar tarafından çalışılması ilgi çekici bir konu olmuştur. Literatürde konu ile alakalı birçok çalışma mevcuttur. Araştırmalarda genel olarak ısı transferini etkileyen basınç düşümü, partikül yoğunluğu, baz akışkan, partikül tipi ve şekli gibi parametreler incelenmiştir.

Pak and Cho (1998) tarafından bu alanda öncü çalışmalardan birisi yapılmıştır. Araştırmacılar çalışmasında Al_2O_3 -Su ve TiO_2 -Su nanoakışkanlarını kullanarak partikül hacimsel oranı ve Reynolds sayısının ısı transfer katsayısına etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarını türbülanslı akım rejiminde deneysel olarak gerçekleştirmişler ve belirli bir orana kadar artan partikül yoğunluğunun ısı transfer katsayısını artırdığını bildirmişlerdir.

Wen ve Ding (2004) tarafından gerçekleştirilen araştırmadaysa Al_2O_3 -Su nanoakışkanının laminar akım rejiminde ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonucu, hacimsel partikül yoğunluğu artışının ısı transferi katsayısını artırdığı ve bu artışın yüksek Reynolds sayıları için daha belirgin olduğu bilgisi sunulmuştur.

Ding et al. (2006) baz akışkanın su olduğu karbon nanotüplü (CNT) partiküller içeren nanoakışkanlarda ısı transfer katsayısını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma neticesinde ısı transfer katsayısında %350 değeri gibi oldukça yüksek bir artış elde etmişlerdir.

Heris et al. (2007) laminer akış ve sabit yüzey sıcaklığı şartları altında, dairesel kesitli boru içerisinde akan Al_2O_3 -Su nanoakışkanının taşınımla ısı transferini incelemişlerdir. Çalışma neticesinde ısı transferinin artama nedeni olarak sadece ısı iletkenlik artışının değil, nanopartiküllerin hareketi, partiküllerin dalgalanması, Brownian hareketi gibi etkileşimlerin etkili olabileceği rapor edilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Corcione et al. (2012) tarafından yapılan sayısal incelemede, su ve etilen glikol baz akışkanları içerisine farklı oranlarda katılan CuO, Al₂O₃ ve TiO₂ nanopartiküllerinden oluşan nanoakışkanların boru içerisindeki akışı için ısı transferi ve akış karakteristikleri araştırılmıştır. Araştırma neticesinde, optimum bir değere kadar artan partikül oranının ısı transferi katsayısını artırdığı, optimum değer üzerinde partikül oranında ısı transferi katsayısının düştüğü rapor edilmiştir.

Kalteh (2013) tarafından yapılan çalışmada farklı çeşitlerde nanopartikül ve temel akışkanların kullanıldığı kapsamlı bir çalışma ortaya konmuş, farklı bileşenler için inceleme yapılmıştır. Araştırmada tercih edilen nanopartikül çeşitleri; Elmas, Al₂O₃, TiO₂, Ag, Au, Fe, SiO₂ ve CuO olarak belirlenmiştir. Kullanılan temel akışkan çeşitleri ise saf su, etilen glikol, motor yağı olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucu gözlenen basınç düşümü ve Nusselt sayılarına ilişkin bilgiler Çizelge 2.7 'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Re=100 değeri için ve su içerisinde %1 hacimsel oranı olan nanopartiküllerin basınç düşümü ve ortalama Nusselt sayıları (Kaleh 2013)

Nanopartikül	Saf Su	Al ₂ O ₃	CuO	Cu	Fe	Au	Ag	TiO ₂	SiO ₂	Elmas
ΔP	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

Azmi et al. (2016a) tarafından yapılan çalışmada diğer çalışmalardan faydalanılarak özet bir tablo oluşturulmuştur. Çizelge 2.8' de bu tablo verilmiştir.

Çizelge 2.8. Su bazlı nanoakışkanların ısı transferi özet çizelgesi (Azmi et al. 2016a)

Kaynak	DeneySEL Aralıklar ve Partiküllerin Türü	Sonuçlar / Açıklamalar
(Hwang et al. 2009)	Al ₂ O ₃ (30 nm) $\phi \leq \%0,3$ $200 \leq Re \leq 1400$	Tam gelişmiş laminar aralıkta %0.3 hacim konsantrasyonunda ısı transfer katsayısında %8 artış sağlanmıştır.
(Heris et al. 2006)	Al ₂ O 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 ₂ O ₃ nanoakışkanlar CuO nanoakışkanlarına göre daha büyük ısı transfer katsayısı elde edilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.8. (devam)

(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 katsayısının %25 ve basınç düşümünü ise %20 arttırdığı belirlenmiştir.
(Kim et al. 2009)	CNT (20 nm) $\phi \leq \%3,5$ Al ₂ O ₃ (20-50 nm) $\phi \leq \%3,0$ $800 \leq Re \leq 6500$	%3.0 hacimsel partikül yoğunluğunda Al ₂ O ₃ nanoakışkanın ısı transfer katsayısında %20'lik bir artış oluşturduğu bildirilmiştir.
(Nguyen et al. 2007b)	Al ₂ O 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 ₂ O ₃ (46 nm) $\phi \leq \%3,6$ ZrO ₂ (60 nm) $\phi \leq \%0,9$ $9000 \leq Re \leq 63000$ $21 \leq T_{nf} \leq 76^\circ\text{C}$	Mevcut tek fazlı akış kolerasyonlarının nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümünü tahmin etmede kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.
(Pak and Cho 1998)	Al ₂ O 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 ₂ O ₃ nanoakışkanı için ısı transfer katsayısında %12 azalma gözlemlendi.
(He et al. 2007)	TiO ₂ (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 ₂ (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 ₂ O ₃ 'e oranla daha iyi bir ısı transfer akışkanı olduğu sonucuna varıldı.

Çizelge 2.8. (devam)

(Azmi et al. 2014b), (Azmi et al. 2013), (Azmi et al. 2014a)	TiO ₂ (50 nm) $\phi \leq \%3,0$ SiO ₂ (22 nm) $\phi \leq \%4,0$ 5000 < Re < 25000	Isı transfer katsayısında TiO ₂ için %1 hacimsel oranda yaklaşık %26 artış gözlenirken %3 hacimsel oranda SiO ₂ de bu oran %33 olarak belirlendi.
--	---	---

2.5 Mini ve Mikrokanallarda Taşınım İle Isı Transferi

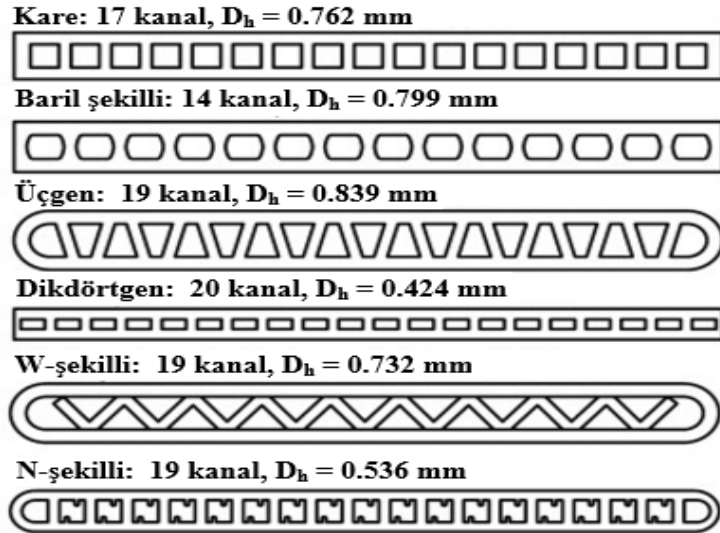
Mini ve mikro boyutlu kanallar, tasarımların minyatürleştirilmesi mümkün olduktan sonra önem kazanmıştır. Sistem tasarımında rahatlık sunması, kompakt yapıda oluşu, hafifliği, boyutlarına kıyasla üstün ısı performansına sahip oluşu gibi avantajlarından dolayı ilgi çekici bir araştırma konusu olmuştur. Literatürde konu ile alakalı oldukça çok çalışma bulunmaktadır. Araştırmacılar ayrıca mini ve mikrokanallarda oluşan basınç düşümü, ısı transferi, kavitasyon ve akış analizi konularındaki teorik hesaplamalardaki belirsizlikler gibi dezavantajları da gidermek için çalışmaktadırlar. Literatürde konu ile yapılan çalışmalarda birbiri ile örtüşen çalışma sayısı az olmakla beraber, mini ve mikrokanal yapıları hakkında, üzerinde anlaşılmış bir ayrım henüz söz konusu değildir. Bazı kaynaklarda minikanal yapısı kabul gören kanal yapılarının bazı kaynaklarda ise mikrokanal yapısı kabul gördüğünü hatırlatmak gerekir.

Mini ve mikrokanal yapılarında, ısı transferi performans değerini belirlemek, ek olarak iyileştirmek için sıvı akışları, gaz akışları, iki fazlı akışlar ve nanoakışkanların kullanımı mevcuttur. Literatür incelendiğinde, geometrik parametrelerin ısı transferini artırıcı etkiler içerisinde en etkili olduğu söylenebilir. Bu parametreler kanal genişliği, kanal yüksekliği, kanal kesiti, kanal içerisine yerleştirilen elemanlar, kanal yüzeyinin pürüzlülüğü gibi etkenlerdir. Bu bölümde mini/mikro kanal yapılarındaki akış yapıları, nanoakışkanları ve geometrik parametreleri ele alan çalışmaları inceleyeceğiz.

Jang and Choi (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada iki farklı nanoakışkanın (6nm Bakır-Su, 2nm Elmas-Su) farklı hacimsel partikül oranları ile kullanılmasıyla, mikrokanallı soğutucuların performansı üzerine sayısal inceleme yapılmıştır. Su-2nm Elmas nanoakışkanının kullanıldığı durumda, 2.25 W sabit pompa gücü koşulunda mikrokanal soğutucu performansının saf suya kıyasla %10 artış gösterdiği rapor edilmiştir.

Jung et al. (2009) tarafından yapılan çalışmada, 170 nm boyutunda Al_2O_3 partikülü kullanılan kare kesitli bir mikrokanal araştırılmıştır. %0,6, %1,2, %1,8 hacimsel partikül oranları içeren Al_2O_3 -Su nanoakışkanı sabit ısı akısı şartı için incelenmiş ve mikrokanal performansına etkisi irdelenmiştir. Çalışma sonucunda %1,8 hacimsel partikül oranı içeren nanoakışkanın mikrokanal performansını saf suya göre %32 daha çok artırdığı bildirilmiştir.

Agarwal et al. (2010) tarafından yapılan çalışmada farklı geometri özelliklerine sahip olan ve altı adet dairesel kesitli olmayan mikrokanalda, ısı transfer katsayılarını belirlemek için deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Araştırmada iş akışkanı olarak R134a kullanılmış ve mikrokanal hidrolik çapları 0,424 mm ile 0,939 mm arasında tutulmuştur. Yapılan deneylerde kütleli debi aralığıysa $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ile $750 \text{ kg/m}^2\text{s}$ arasında tutulmuştur. Kanallar baril, N, W, dikdörtgen, kare ve üçgen olmak üzere beş farklı geometride seçilmiştir (Şekil 2.5). Araştırma sonucunda deney sonuçlarının büyük kanallar için geliştirilmiş olan teorik modellerin oldukça uzağında olduğu bildirilmiştir. Bunun sebebi olarak teorik modellerin mikrokanallara özgü olan akış olgularını ve arayüz kesme davranışını dikkate almıyor olması rapor edilmiştir. Bu çalışmada deney sonuçlarıyla kare, dikdörtgen kesitli ve baril şekilli kanallar için modeller türetilmiştir.



Şekil 2.7. Deneysel bir çalışmada kullanılan mikrokanal geometrileri

Ijam et al. (2012) tarafından yapılan çalışmada Al_2O_3 -Su ve TiO_2 -Su nanoakışkanları minikanal ısı emicisi için soğutucu akışkan olarak kullanılmıştır. Laminer akış koşullarında %4 hacimsel oranda partikül içeren Al_2O_3 -Su nanoakışkanın

minikanallı ısı emicide kullanılması sonucu %2,95 ila %17,32 arasında soğutma performansında iyileşme, TiO₂-Su nanoakışkanı kullanıldığı durumdaysa % 1.88 ila % 16.53 oranı arasında performans iyileşmesi olduğu rapor edilmiştir.

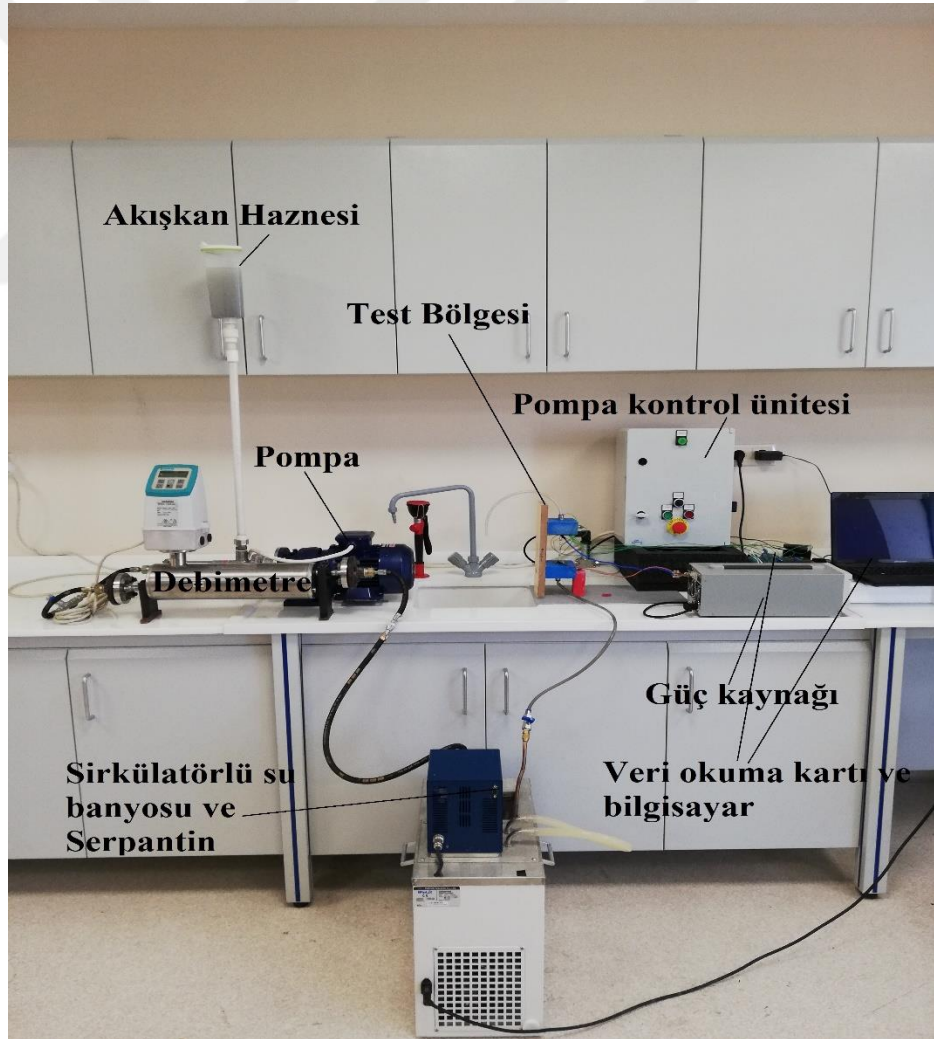
Ho and Chen (2013) tarafından yapılan çalışmada, bakır minikanallı bir ısı alıcıda soğutucu olarak saf su yerine Al₂O₃-Su nanoakışkanı kullanılmıştır. Çalışma, zorlanmış taşınım ısı transferini araştırmak üzere deneysel olarak yapılmıştır. Deney düzeneğinde kesit ölçüleri 1 mm genişlik, 1,5 mm yükseklik ve 50 mm boy uzunluğu olan 10 adet dikdörtgen kesitli ve paralel dizili minikanal kullanılmıştır. Çalışmada Reynolds sayısı 133-1515 değerleri arasında tutulmuş ve çalışma sonucu Al₂O₃-Su nanoakışkanı kullanılması durumunda minikanallı ısı emicinin performansının saf suya kıyasla dikkate değer bir artış gösterdiği raporlanmıştır.

Ray et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada, Al₂O₃, Cu₂O, SiO₂, partikülleri ile etilen glikol ve su karışımından elde edilen üç nanoakışkanın performansları minikanal plakalı bir ısı değiştiricide incelenmiştir. Çalışmada tüm nanoakışkanların %1' lik hacimsel oranı için, baz akışkana kıyasla performansı arttırdığı gözlemlenmiştir. Eşit kütleli debi, eşit ısı transferi, eşit pompa gücü gibi durumlar için değerlendirilen çalışma neticesinde şartların her biri için üç nanoakışkanın, taşınım ısı transferi katsayısında artış, hacimsel akış hızında düşüş ve aynı miktarda ısı transferi için pompalama gücü gereksinimindeki azalma, özelliklerini sergilediği gözlemlenmiştir.

Bahiraei and Majd (2016) tarafından yapılan çalışmada, sabit duvar ısı akısı şartı için üçgen bir minikanal içerisinde akan H₂O-Al₂O₃ nanoakışkanı ısı transfer karakteristikleri ve termodinamiğin ikinci kanununa göre incelenmiştir. Reynolds sayısı, partikül boyutu, duvar ısı akısı ve parçacık konsantrasyonu gibi parametrelerin entropi üretim hızları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Reynolds sayısı ve yoğunluktaki artış, partikül büyüklüğündeki azalmanın taşınım ısı transfer katsayısını artırdığı bildirilmiştir. Çalışmada ısı akısı, partikül boyutu, Reynolds sayısı, yoğunluk artışının termal entropi üretimini düşürdüğü raporlanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, dairesel kesitli bir minikanal içerisinde akan su-SiO₂ nanoakışkanı incelenmiş, destekleyen ve karşıt akış durumları için karma taşınım ile ısı transferi özellikleri araştırılmıştır. Nanoakışkan sentezi için gerekli olan partiküller kuru toz şeklinde temin edilmiştir. İstenilen hacimsel orana uygun nanoakışkan sentezi için partiküller hassas terazide tartılmış ve saf suyla süspansiyon edilmiştir. Nanoakışkan sentezi için çalışmada iki adım metodu kullanılmıştır. Ultrasonik homojenizatörde karışım belli süreler boyunca bekletilerek nispeten kararlı olması sağlanmıştır. Elde edilen nanoakışkanın ısı iletkenlik, viskozite değerleri ölçülmüştür. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği elemanları bütünüyle şekil 3.1’ de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Minikanal deney düzeneği bileşenleri

Deneysel çalışmanın aşama ve işleyişi kısaca şöyledir. Düzenekte kullanılan iş akışkanı besleme haznesine doldurulur. Akışkan, bu haznedeki kendinden inventörlü pompa aracılığıyla debimetreye yönlendirilmektedir. Debimetrede debi ölçümü yapılan akışkan buradan su banyosu içerisindeki serpantin olduğu bölüme geçer. Akışkan burada istenilen sıcaklık değerine ulaşarak test bölgesine yönelir. Akışkan test bölgesine girdikten sonra gerekli ölçümler yapılır ve akışkan bu ölçümler gerçekleştirilirken test bölgesinden tahliye olmaktadır. Test bölgesindeki minikanala şerit ısıtıcı tel ile doğrudan gerilim uygulanarak sabit ısı akışı şartı sağlanır. Test bölgesindeki yüzey sıcaklıkları, giriş ve çıkış sıcaklıkları veri okuma kartına bağlı ısı çiftleri vasıtasıyla ölçülür ve bilgisayara kaydedilir.

Deneysel nanoakışkanların hacimsel partikül oranı değişiminin, karma taşınım ile ısı transferine etkisini araştırabilmek için saf su ve farklı hacimsel partikül oranlarında (0, 0,0025 ve 0,0075) saf su-SiO₂ nanoakışkanı hazırlanarak gerçekleştirilmiştir. Deneyde test bölgesi 90° ve -90° açılarında konumlandırılarak destekleyen ve karşıt akış durumları ve etkileri irdelenmiştir. Karma taşınım ile ısı transferi şartının sağlanabilmesi amacıyla deneylerde Reynolds sayısı 20-60 aralığında tutulmuştur.

Deneysel ilk önce saf su ile yapılmış sonrasında aynı şartlar için, farklı hacimsel partikül oranında hazırlanan su-SiO₂ nanoakışkanı ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirdiğimiz deneyin aşamaları kısaca şöyledir. Test bölgesi istenen açı konumuna getirilir ve akışkan besleme haznesine takviye edilir. Pompa kontrol ünitesi vasıtasıyla pompa çalıştırılır. Debimetrede debi kontrol edilir. Debi istenilen değere ulaşıncaya kadar bekler ve istenilen debi değerinde güç kaynağını çalıştırarak test bölgesine ısı veririz. Güç kaynağında dalgalanma olması ölçüm hatalarına sebebiyet verebilir. Bu sebeple bunu önlemek için güç analizöründen faydalanılmıştır. Veri kartı kontrol edilerek sistemin kararlı yapıya ulaşması beklenir. Sistem kararlı yapıya ulaşıncaya ölçümler yapılır ve veriler kaydedilir. Mukayese etmek ve hatayı azaltmak için tekrar ölçümü ile kontrolde sağlanmaktadır. Ölçümlerde bir uyumsuzluk olması durumunda kararlı durum tekrar hazırlanır ve ölçümler incelenir. Bu işlemler akışkanın diğer debileri için tekrar edilir.

Bu bölümde nanoakışkan hazırlanması için kullanılan ve deney sisteminde bulunan bileşenler tanıtılacaktır. Nanoakışkanın hazırlanışı ve karakteristik özelliklerine de bölüm içerisinde yer verilmiştir.

3.1. Deneysel Materyaller

3.1.1.Hassas terazi

Nanoakışkan hazırlarken hacimsel partikül oranının belirlenmesinde partikül miktarı ana etkenlerden biridir. Partikül kütlelerinin ölçümü hassasiyet gerektirmektedir. Bu işlemi gerçekleştirmek için AXIS marka 400gr kapasitesi olan 0,0001g hassasiyete sahip terazi kullanılmıştır. Kullandığımız terazi dış etkenlere karşı koruma sağlayacak şekilde muhafazalıdır. Kullandığımız teraziye ait görsel şekil 3.2’ de gösterilmiştir. Terazi kullanılmadan önce, ayakları vasıtası ile yatay konumu su terazisinden kontrol edilerek denge konumuna gelmesi sağlanır. Terazi denge konumunda sabitlenerek kalibre edilir. Bu işlemlerden sonra partikül miktarları tartılarak ayarlanabilir.



Şekil 3.2. AXIS Hassas Terazi (www.axis.pl, 14.11.2018)

3.1.2.Ultrasonik homojenizatör

Nanoakışkan hazırlamak için tercih ettiğimiz iki adım yönteminde, baz akışkana eklenen nanopartiküller için karıştırma/dağıtma işlemi yapılır. Hazırlanan süspansiyonun mümkün olan en homojen yapıda olması hedeflenir. Hielscher marka UP400S model ultrasonik homojenizatör vasıtası ile karıştırma ve dağıtma işlemi yapılarak nanoakışkanın kararlı ve çökme eğilimi göstermeyen yapıda olması hedeflenmiştir. Cihaz

3. MATERYAL ve YÖNTEM

400W güç ve 24 kHz frekans değerlerinde çalışmaktadır. Cihaz çalışırken ısınma sorunlarının önüne geçebilmek adına soğutma sıvısı olarak şebeke suyu kullanılan, entegre bir soğutma sistemi ile kullanılmıştır. Ayrıca cihaz, çalışması esnasında titreşimlerden ötürü oluşan sesi ve denge bozukluğunu giderecek bir kabine de sahiptir. Şekil 3.3' te deneyde kullanmış olduğumuz Hielscher marka UP400S model ultrasonik homojenizatör, soğutma sistemi ve hazırlanan nanoakışkan gözükmektedir.



Şekil 3.3. Ultrasonik homojenizatör, soğutma sistemi ve hazırlanan nanoakışkan

3.1.3.Viskozimetre

Hazırlanan nanoakışkanın dinamik viskozite değerinin belirlenmesi çalışmamız için önemlidir. Şekil 3.4' te gösterilen A&D Marka SV-10 model vibro tip viskozimetre, dinamik viskozitenin belirlenmesi için kullanılmıştır. Cihazın çalışma prensibi, numune içerisine daldırılan iki adet ince sensör plakanın, sabit frekansta hareket ettirilmesi ve gerekli olan enerjiye göre viskozite değerinin belirlenmesi şeklindedir. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklığa bağlı değişimini belirleyebilmek için farklı sıcaklıklarda ölçüm yapılması gereklidir. Bu amaçla WiseCirsu marka bir su banyosu sisteme eklenmiş ve bu sayede numune kabı sıcaklığı, istenilen değerlere ayarlanabilmiştir.



Şekil 3.4. Viskozimetre (www.andweighing.com.au, 14.11.2018)

3.1.4 Isıl iletkenlik ölçer

Hazırlanan nanoakışkan ve saf su için ısıl iletkenlik değeri ölçümleri şekil 3.5'te verilen Linseis marka THB-100 model cihaz ile yapılmıştır. Ölçüm değerleri cihazın yazılımı yardımıyla bilgisayar ortamına alınmıştır. Cihazın ölçüm metodu geçici ısıl köprüler (tansient got bridge) yöntemine dayanmaktadır ve bu yöntemin detayları Hammerschmidt ve Meier (2006)' da sunulmuştur. Cihaz efektif ve hızlı ölçüm sağlamaktadır. Ölçümler yaklaşık olarak 100 ml numunelerde su banyosunda istenilen sıcaklık değerleri için yapılmıştır.



Şekil 3.5. Isıl iletkenlik ölçer (www.linseis.com, 14.11.2018)

3.1.5. Akışkan besleme haznesi

Sistemde kullandığımız iş akışkanını burada depolanır ve buradan sisteme pompa vasıtası ile aktarılmaktadır. Haznenin hacmi 0.75 litredir. Hazneye ait görsel şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Akışkan besleme haznesi

3.1.6. Pompa

Deney sisteminde, iş akışkanının sistem içerisindeki sirkülasyonu şekil 3.7’de gösterilen pozitif yer değiştirmeli ve frekans kontrollü pompa ile sağlanmıştır. Sistemde bu pompa vasıtasıyla atımsız ve sürekli akış sağlanmıştır. Literatürde kullanılan dişli pompalara kıyasla bu pompanın, nanoakışkanın stabilitesine zarar vermeyeceği için daha faydalı olacağı düşünülmektedir. Pompa, pompa kontrol ünitesi yardımı ile kontrol edilmektedir. Hızı değişkendir istenilen değere ayar edilebilir. Maksimum 120°C sıcaklıkta akışkan kullanımına ve maksimum 50°C ortam sıcaklığında kullanıma olanak sağlar. Pompanın motor koruması vardır ve harici korumaya ihtiyaç yoktur. Maksimum çalışma basınç değeri 12 bar değeridir.



Şekil 3.7. Pompa

3.1.7. Debimetre

Akışkanın debi değeri ölçülerek, ilgili eşitliklerin yardımıyla hız değeri bulunabilir. Bu hız değeri vasıtasıyla da akışın hangi Reynolds değeri aralığında olduğu tayin edilir. Deney parametrelerinden birisi olan Reynolds sayısının istenilen değer ve aralıklarda olması önemlidir. Bu değerlerin sağlanması, iş akışkanının hız değerine müdahale ederek mümkün olmaktadır. Bu sebeple debimetre ve debi ölçümü deneyimiz için önemlidir. Deney sisteminde debi ölçümü için şekil 3.8’de gösterilen Siemens marka Sitrans FC-MASS6000 model kütleli debimetre kullanılmıştır. Debimetrenin dönel eleman içermemesi, istenmeyen bir olay olan partikül çökmesine karşı olumlu bir etki oluşturmaktadır.



Şekil 3.8. Debit metre (w3.siemens.com, 14.11.2018)

3.1.8. Serpantin ve sirkülatörlü su banyosu

Test bölgesine ulaşan akışkanın, çevre sıcaklığı ve diğer faktörlerden etkilenmeden istenilen sıcaklık değerinde olması istenir. Bu yüzden iş akışkanını test bölgesine girmeden önce, su banyosu içerisinde bulunan bir serpantinde dolaştırılarak istenilen şartlara gelmesi sağlanmıştır. Akışkan serpantin içerisinden geçirilerek test bölgesine istenen sıcaklık değerinde ulaşır. Bu işlem için şekil 3.9’da gösterilen WiseCircu marka, ısıtma ve soğutma işlemi yapabilen zaman ayarlı, sirkülatörlü su banyosu ve bu banyonun içerisinde bulunan 2 m uzunlukta, 10 mm dış çap ölçüsünde bakır borudan üretilmiş serpantin kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Serpantin ve WiseCircu su banyosu (www.indohitech.com, 14.11.2018)

3.1.9. Güç kaynağı

Test bölgesinde kullanılan minikanallarda sabit ısı akısı şartı sağlanması amacıyla güç kaynağı kullanılmıştır. Güç kaynağı olarak şekil 3.10' da gösterilen 0-0,72 A akım ve 0-30V gerilim değer aralıklarında çalışabilen GW INSTEK marka PSW 30-72 cihaz tercih edilmiştir. Cihaz istenen güç değerini ayarlamayı sağlamaktadır ve manuel kontrol edilebilmektedir.



Şekil 3.10. Güç kaynağı (www.gwinstek.com, 14.11.2018)

3.1.10. Veri okuma kartı

Test bölgesi üzerinde farklı noktalara yerleştirilen K tipi ısıl çiftler LR8402-20 model Hioki marka veri okuma kartına bağlanmış ve sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Veri okuma kartı bilgisayara bağlanmış ve sonuçlar bilgisayar yazılımı ile anlık olarak kaydedilmiştir. Şekil 3.11'de verilen veri okuma kartının iki telli girişe sahip olması, ısıl çiftlerin herhangi bir jack olmadan bağlanabilmesine olanak sağlamaktadır. 30 analog kanala sahip olan cihaz K, J, E, T, N, R, S, B, W tipi ısıl çiftleri otomatik tanıyabilmektedir. Veri okuma kartı ± 100 V DC gerilim değerleri arasında çalışabilmektedir. Veri okuma kartının diğer özelliklerinden bazıları da şu şekildedir; istenilen tarihte ve zamanda ölçümü başlatma ve bitirme, ani güç kesinti koruması, alarm özelliği, bilgisayar ve taşınabilir belleğe kayıt yapabilme, cihazın kendi ekranı ve bilgisayara uyumlu yazılımı üzerinden verileri grafik şeklinde inceleyebilme.



Şekil 3.11. Veri okuma kartı (www.hioki.com, 14.11.2018)

3.1.11. Isıl çiftler

Test bölgesinin akışkan giriş ve çıkış kısmı ve kanal dış yüzey sıcaklığı ölçümünde şekil 3.12’de gösterilen K tipi ısıl çiftler kullanılmıştır. Isıl çiftlerin iç çapı 0,20 mm, metal cinsleri nikel, krom ve alaşımlı nikeldir. Isıl çiftlerin kanal üzerinde oluşabilecek manyetik alandan etkilenmesi istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple uç kısımları oksijen kaynağı vasıtasıyla noktasal hale gelecek şekilde birleştirilir ve metalik boya ile kaplanır.



Şekil 3.12. K tipi ısıl çift (www.indiamart.com, 14.11.2018)

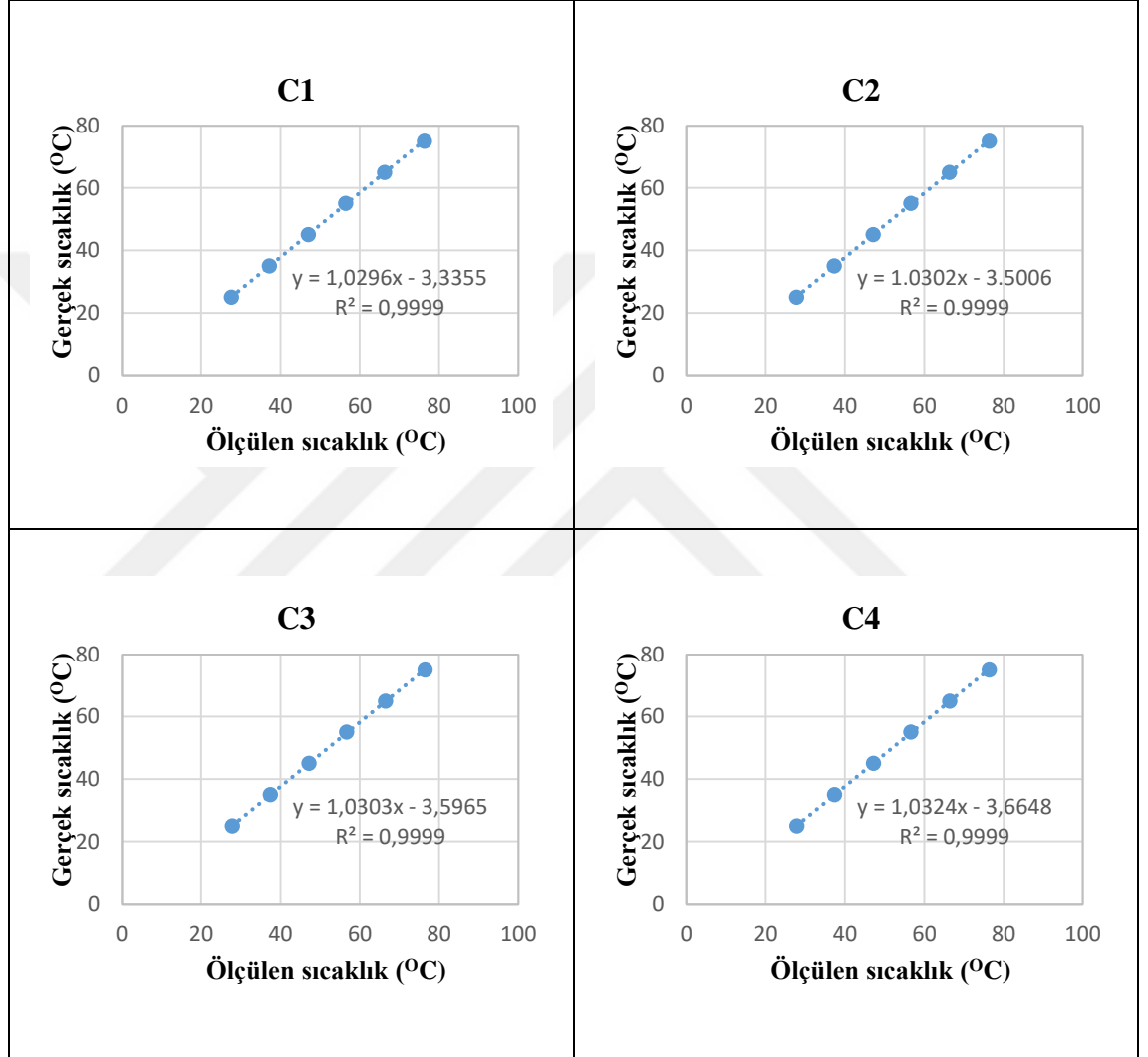
Isıl çiftlerin test bölgesine bağlanmasından önce kalibre edilmesi gereklidir. Daha önce tanıttığımız WiseCurcu marka sirkülatörlü su banyosunda 25-75°C sıcaklıkları aralığında 10°C artımlarla sıcaklık ölçüm değerleri alınarak, her bir ısıl çiftin kalibrasyon eğrisi ve denklemi oluşturulmuş bu sayede ısıl çiftler kalibre edilmiştir.

Sistem kararlı hale geldikten sonra, sıcaklık okuma işlemi 60 saniye boyunca test bölgesinden veri alınarak yapılmıştır. Verilerin alınması ile sıcaklık verileri ortalamaları

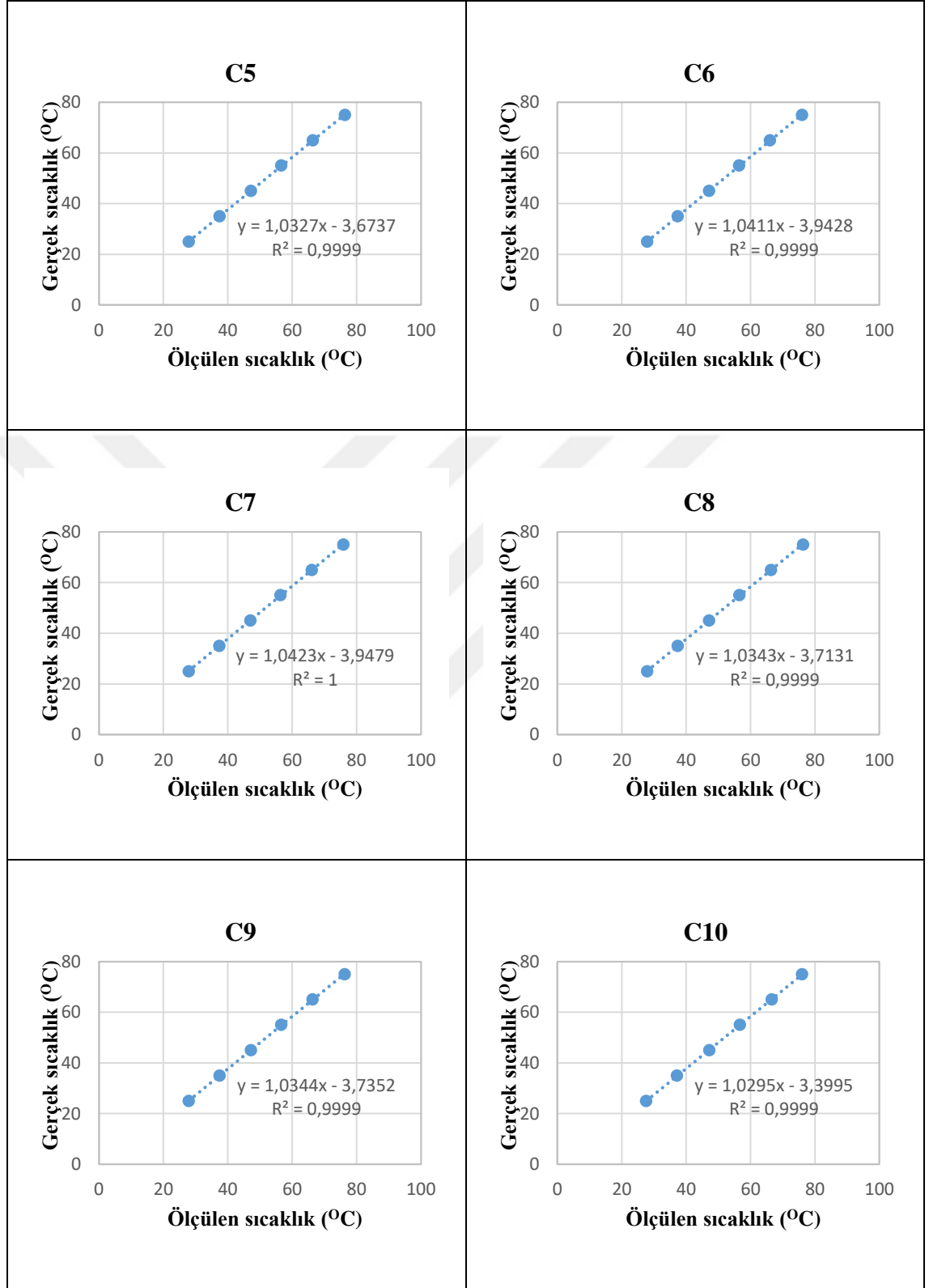
3. MATERYAL ve YÖNTEM

hesaplanarak bilgisayara kayıt edilmiştir. Sonrasında bu sıcaklık değerleri ortalamaları kalibrasyon denklemlerinde yerine yazılarak giriş, çıkış, yüzey sıcaklık değerleri bulunmuştur. Çizelge 3.1’de ısı çiftlerine ait elde edilen kalibrasyon eğrileri ve denklemleri sunulmuştur.

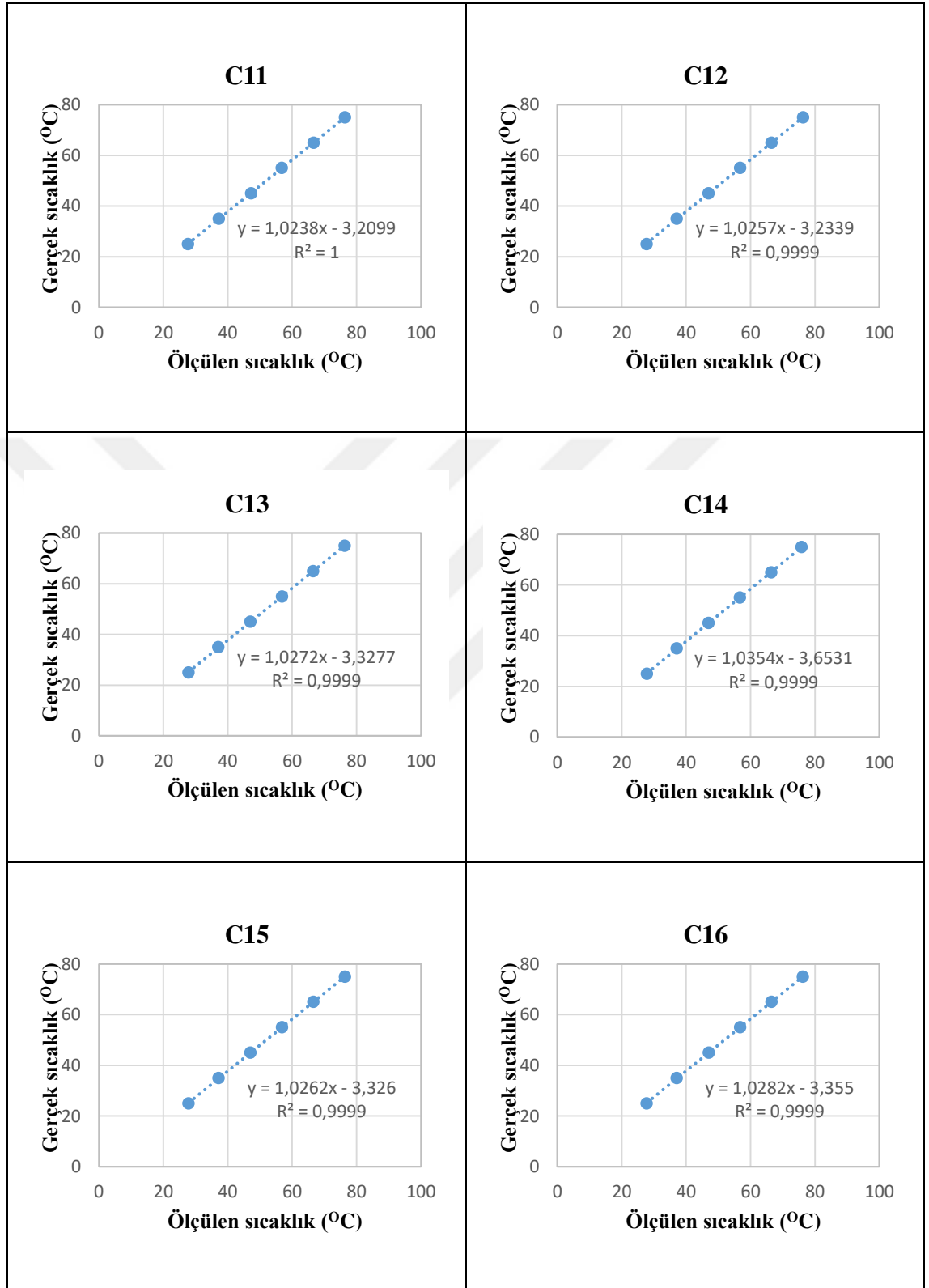
Çizelge 3.1. Isıl çiftlere ait kalibrasyon eğrileri ve denklemleri



Çizelge 3.1. (devam)

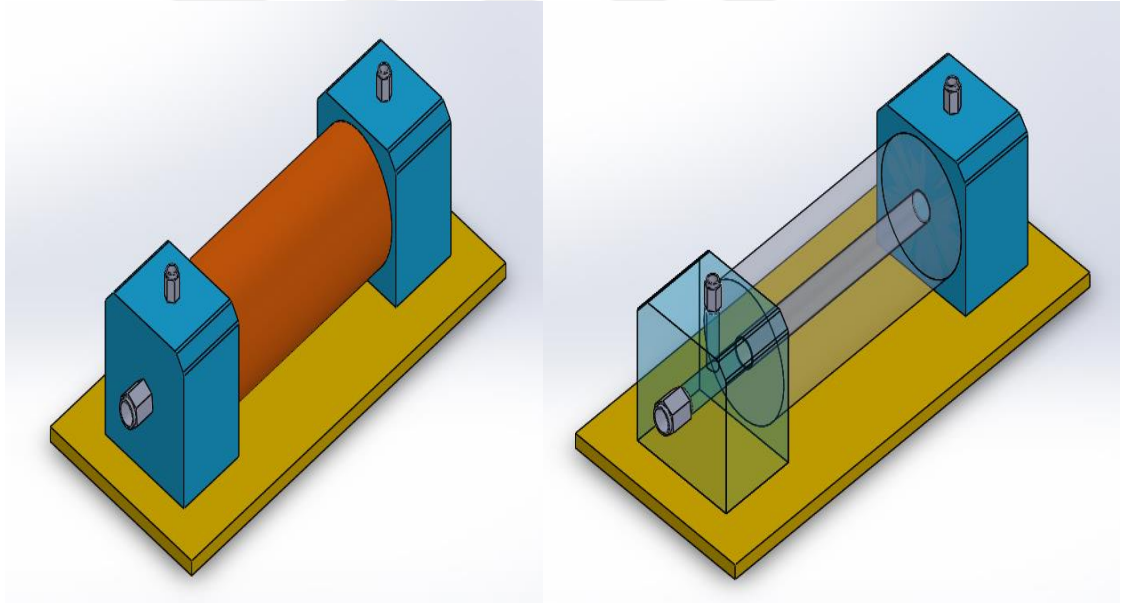


Çizelge 3.1. (devam)

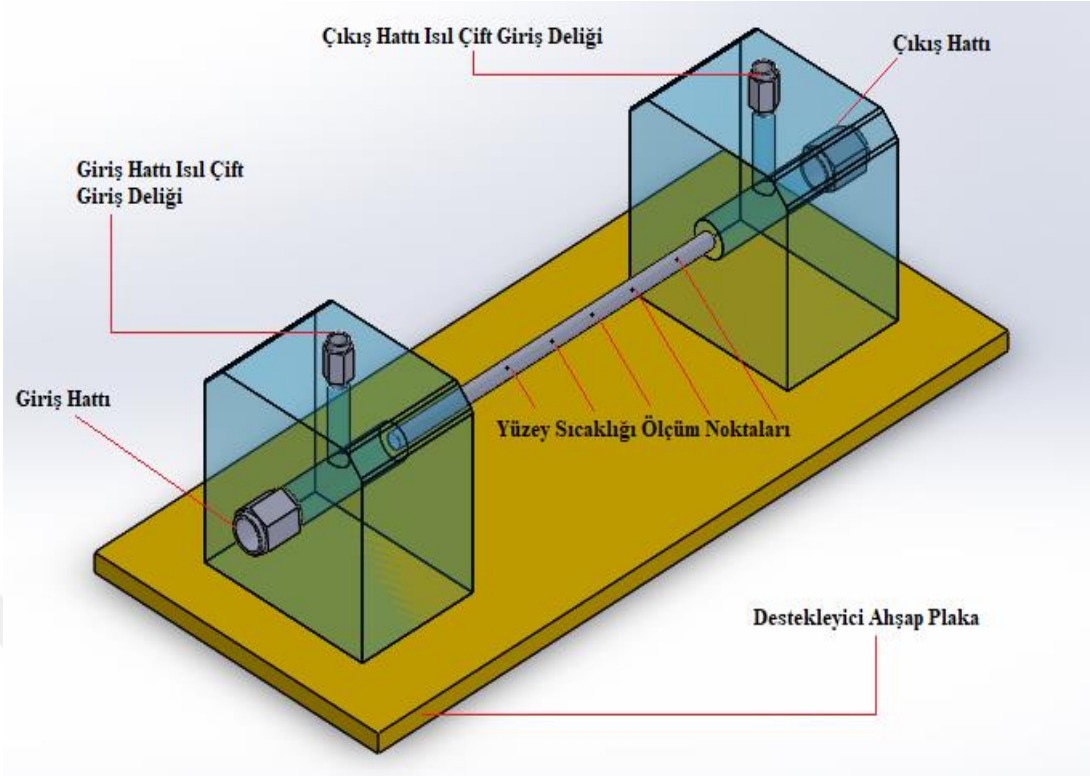


3.2 Test Bölgesi

Test bölgesi için üç farklı düzenek hazırlanmıştır. Her bir düzenekte, polietilen iki blok arasında minikanal yerleştirilmiştir. Yerleştirilen minikanal çapları sırasıyla; 1,21 mm, 1,5 mm ve 1,91 mm'dir. Minikanalların uzunluğu ise 10 cm'dir. Polietilen bloklar üzerinde 8 mm çapında, hidrolik bağlantıya sahip giriş-çıkış hattı mevcuttur. Minikanal giriş ve çıkış sıcaklık değerlerinin ölçümü için polietilen blokların üst kısımlarından delik açılmıştır. Bu deliklerden minikanalların giriş ve çıkış haznelarının orta noktalarına indirilen iki adet K tipi ısıl çift vasıtasıyla da giriş ve çıkış sıcaklık değerleri ölçülebilmektedir. Minikanal üzerine uygulanan sabit ısı akısı, güç kaynağı vasıtası ile sağlanmıştır. Minikanal üzerinde 5 farklı noktaya yerleştirilen, 5 adet ısıl çift ile yüzey sıcaklık ölçümü yapılmaktadır. Test bölgesinin dış ortam etkileşimini azaltmak için polietilen bloklar arasında kalan kısım termal yalıtım köpüğü ile muhafaza edilmiştir. Test bölgesi ile ilgili görseller şekil 3.13 ve şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Test bölgesi görseli



Şekil 3.14. Test bölgesi elemanları

3.3. Hesaplamalar ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

3.3.1. Nanoakışkan hazırlanması ile ilgili hesaplamalar

Deneylerde iki farklı hacimsel partikül oranına sahip SiO₂ nanoakışkanı kullanılmıştır. Hacimsel partikül oranı %0,25 ve %0,75 oranı olan nanoakışkanlar için partikül kütlesine ait eşitlikler aşağıda verilmiştir. Partikül yüzdeleri oranlarının %0,25 ve %0,75 deneysel parametre olarak belirlenmesi, nanopartikül ve temel akışkan yoğunluğunun bilinmesinden dolayı, nanoakışkan yoğunluğu Eşitlik 3.1’de verilen eşitlik vasıtasıyla bulunur. Eşitlikte verilen φ ifadesi hacimsel partikül yoğunluğunu ifade etmektedir.

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

Eşitlik 3.1'den faydalanılarak elde edilen nanoakışkan yoğunluk değeri (ρ_{nf}) ve hacimsel nanoakışkan miktarı Eşitlik 3.2' de yerine yazılırsa, nanoakışkan kütlesi (m_{nf}) hesaplanabilir.

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

Nanoakışkan için kütle oran (C_m) Eşitlik 3.3'te verildiği gibi yazılır. Burada partikülün ve nanoakışkan yoğunluğunun bilinmesinden dolayı partikül kütlesi (m_p) hesaplanabilir.

$$C_m = \frac{m_p}{m_{nf}} = \varphi \frac{\rho_p}{\rho_{nf}} \quad (3.3)$$

Aşağıda verilen Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5'ten faydalanılarak temel akışkana ait kütle ve hacim değeri belirlenir.

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

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

Nanoakışkanın ısı kapasitesini belirlemek için Eşitlik 3.6'da verilen ifade kullanılır.

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

3.3.2. Isı transferi hesaplamaları

Deney düzeneğinde bulunan test bölgesine güç kaynağı kullanılarak verilen ısı enerjisinin tamamının test bölgesinden taşınım mekanizması vasıtası ile transfer edildiği kabulü yapılır. Bu kabul ile kayıplar ihmal edilerek Eşitlik 3.7 yazılabilir.

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

Test bölgesine güç kaynağından aktarılan güç kaynağı ekranından okunan akım ve gerilim değerleri çarpımına eşittir. Bu bilgi bilinerek ısı transfer miktarı Eşitlik 3.8’deki gibi daha açık bir şekilde ifade edilebilir.

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

Eşitlik 3.8’deki ifadeden ısı taşınım katsayısı çekilerek, aşağıdaki Eşitlik 3.9’daki gibi yazılabilir.

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

Nusselt sayısı elde edilen ortalama taşınım katsayısı kullanılarak Eşitlik 3.10’daki gibi hesaplanır.

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

Akışkanın ortalama hızı ‘ U ’ kullanılarak Reynolds sayısı Eşitlik 3.11’deki gibi hesaplanır.

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

Doğal taşınım da dolayısıyla da karma taşınım da etkisi olan, kısaca kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı şeklinde tanımlanarak ifade edilen Grashof sayısı Eşitlik 3.12’deki ifade ile hesaplanır.

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

Laminer akış karakteristiklerinin ifadesinde önemli olan Greatz sayısı ise Eşitlik 3.13'te gösterildiği şekilde elde edilir.

$$Gz = \frac{\pi}{4} \text{Re Pr} \frac{D}{L} \quad (3.13)$$

Rayleigh sayısı Grashof sayısı ile Prandtl sayısının çarpımına eşittir. (Eşitlik 3.14)

$$Ra = Gr \text{ Pr} \quad (3.14)$$

Karma taşınım ile ilişkili olan Richordsan sayısının hesaplanması Eşitlik 3.15' te gösterildiği şekildedir.

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

Karma taşınım ile ısı transferi ve destekleyen akış durumu için Nusselt sayısının ifadesi, zorlanmış ve doğal taşınım koşullarının toplamı şekline Eşitlik 3.16'daki gibi ifade edilebilir.

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

Literatürde karma taşınım için sunulan analitik sonuçlar, çoğunlukla cebirsel denklem olarak Eşitlik 3.17'dekine benzer olarak verilmiştir. İfadedeki 'a' değeri sabit değer olup, uniform ısı akısı sınır şartı durumunda 2.11 alınması önerilir. Φ değeri ise doğal etkilerini ihtiva eden bir parametredir (Li and Feng 2013).

$$\left(Nu \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \right)^3 = \left(a \times Gz^{1/3} \right)_{zorlanmış}^3 + \left(a \times \phi^{1/3} \right)_{doğal}^3 \quad (3.17)$$

Φ değeri Eşitlik 3.18'de belirtildiği gibi Prandtl ve Grashof sayılarının fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır.

$$\phi = \left(\frac{Gr Pr L/D}{Gz + L/D} \right)^{3/4} \quad (3.18)$$

Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi olarak tanımlanan Ω ifadesi Eşitlik 3.19'da sunulan eşitlik ile elde edilmektedir.

$$\Omega = 1,95 \times Re^{1/3} \quad (3.19)$$

3.3.3 Belirsizlik Analizi

Hata analizi yapılması deneysel verilerin güvenilirliğinin teyit edilmesi açısından önemlidir. Bu sebeple literatürde sıklıkla kullanılan bir yöntem olan Kline ve McClinton (1953) yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntemde R büyüklük değeri, x_1, x_2, x_3 gibi n tane bağımsız değişene bağlı bir büyüklük değeri yani $R=R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ olsun. Bu bağımsız değişkenler için hata oranıysa ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$) olsun. Bu durumda w_R hata oranı Eşitlik 3.20'deki gibidir.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.20)$$

Eşitlik 3.20'de verilen ifadeden yararlanılarak bazı büyüklüklerin hata oranları aşağıda verilmiştir. Reynolds sayısı Eşitlik 3.21 ile Nusselt sayısı Eşitlik 3.22 ile Grashof sayısı ise Eşitlik 3.23 ile verilmiştir.

$$\frac{w_{Re}}{Re} = \left[\left(\frac{w_{\dot{m}}}{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{w_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{w_{\mu}}{\mu} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \left[\left(\frac{w_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{w_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{w_I}{I} \right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{w_k}{k} \right)^2 + \left(\frac{w_A}{A} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

$$\frac{w_{Gr}}{Gr} = \left[\left(\frac{w_p}{\rho} \right)^2 + 9 \left(\frac{w_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + 4 \left(\frac{w_v}{v} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

Eşitliklerden görülmektedir ki belirsizliği hesaplanacak büyüklüklere farklı parametreler, farklı oranlarda etkimektedir. Örneğin Reynolds sayısı için etkili olan parametreler; kütleli debi, kanal çapı, viskozite aynı oranda etki göstermiştir. Grashof sayısında ise en önemli etkiyi kanal çapı parametresi yapmıştır. Eşitliklerdeki parametrelerin değerleri ilgili kataloglardan yararlanılarak yazıldığında Çizelge 3.2'deki belirsizlik değerleri elde edilir.

Çizelge 3.2. Belirsizlik analizi sonuçları

	Re	Nu	Gr
%	1,69	2,78	2

3.4. Nanoakışkanların Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Deneylemin iki adım yöntemi ile elde edilen saf su bazlı SiO₂ nanoakışkanı için, %0,25 ve %0,75 olarak belirlenen hacimsel oranlarda gerçekleştirileceği daha önce belirtilmişti. Belirtilen oranlarda nanoakışkan hazırlanması için gerekli temel akışkan ve partikül miktar değerleri Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Hazırlanan nanoakışkanlar için (1000 mL) gerekli temel akışkan ve partikül miktarları

Hacimsel Partikül oranı	Nanoakışkan Hacmi	Nanoakışkan Kütleli	Kütleli Oran	SiO ₂ Kütleli(g)	Saf Su Kütleli(g)	Saf Su Hacmi(mL)
0,0025	1000	1001,2856	0,0059	6	995,2856	997,5
0,0075	1000	1008,2967	0,0295	18	990,2967	992,5

Partiküller Sigma-Aldrich firmasından satın alınmış ve temin edilmiştir. Partiküllere ait bilgiler Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

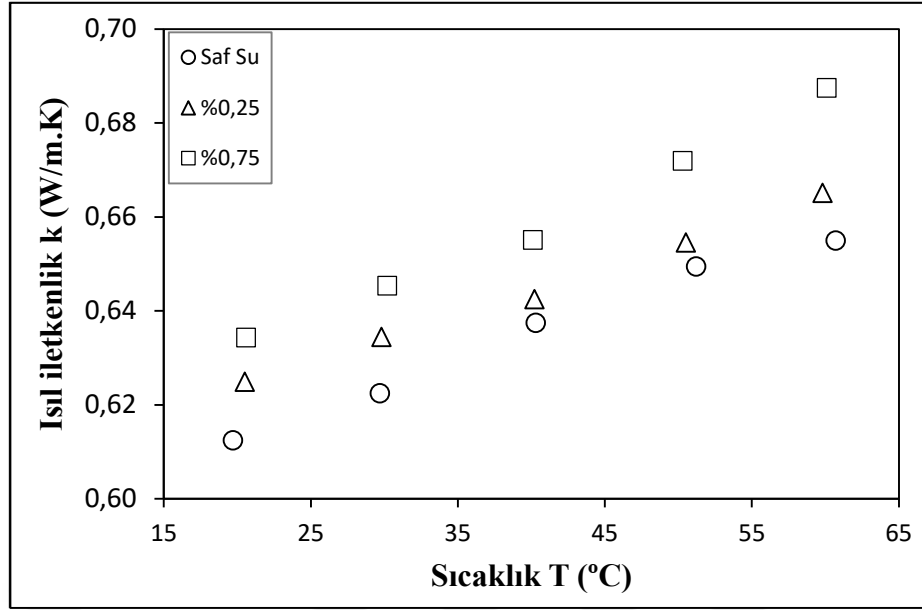
Çizelge 3.4. SiO₂ Nanopartikülünün Özellikleri (www.sigmaaldrich.com)

Adı	Silikon Dioksit
Moleküler Formülü	SiO ₂
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
Safılık	%99,5
Kaynama Noktası	2230°C
Ergime Noktası	> 1600°C

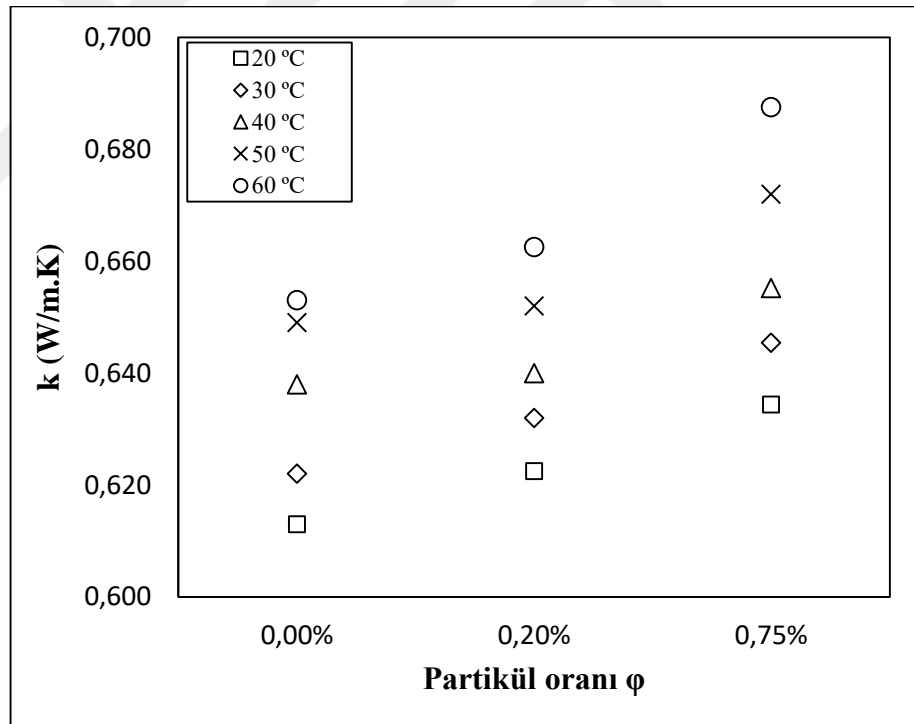
Nanoakışkan için gerekli partikül ve temel akışkan değerleri belirlenerek önce temel akışkan sonra partiküller bir kaba boşaltılmıştır. Elde edilen temel akışkan ve SiO₂ partikül karışımı, ultrasonik homojenizatör yardımı ile 10 saat süre ile homojenleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Farklı hacimsel partikül oranları içinde aynı işlem yapılmıştır. Elde edilen nanoakışkanlarda çökme, topaklanma vb. olumsuz bir etkiye rastlanmamıştır.

Saf su ve saf su-SiO₂ nanoakışkanlarının ısı iletkenlik değerlerinin ölçümü Linseis marka THB-100 model ısı iletkenlik ölçer ile yapılmıştır. Geçici Isıl Köprü (Transient Hot Bridge) tekniği ile ölçüm yapan cihaz vasıtası ile alınan ölçüm değerleri Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da sunulmuştur.

%0, %0,25, %0,75 hacimsel oranlarında hazırlanan nanoakışkanların ısı iletkenlik ölçümleri 20-60°C sıcaklıkları aralığında, 10°C sıcaklık artış değeri ile belirlenen sıcaklıklarda yapılmıştır.



Şekil 3.15. Saf su ve farklı derişimdeki nanoakışkanlar için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3.16. Farklı sıcaklıklarda ısı iletkenliğin hacimsel partikül oranı ile değişimi

Saf su ve farklı hacimsel oranlara sahip nanoakışkanlara ait sıcaklıkla ısı iletkenlik değişimi Şekil 3.15'te sunulmuştur. Şekil incelendiğinde sıcaklığın akışkanlara ait ısı iletkenlikleri önemli derecede etkilediği görülmektedir. Sıcaklıktaki artışa bağlı olarak akışkanların ısı iletkenlik değerleri artmıştır.

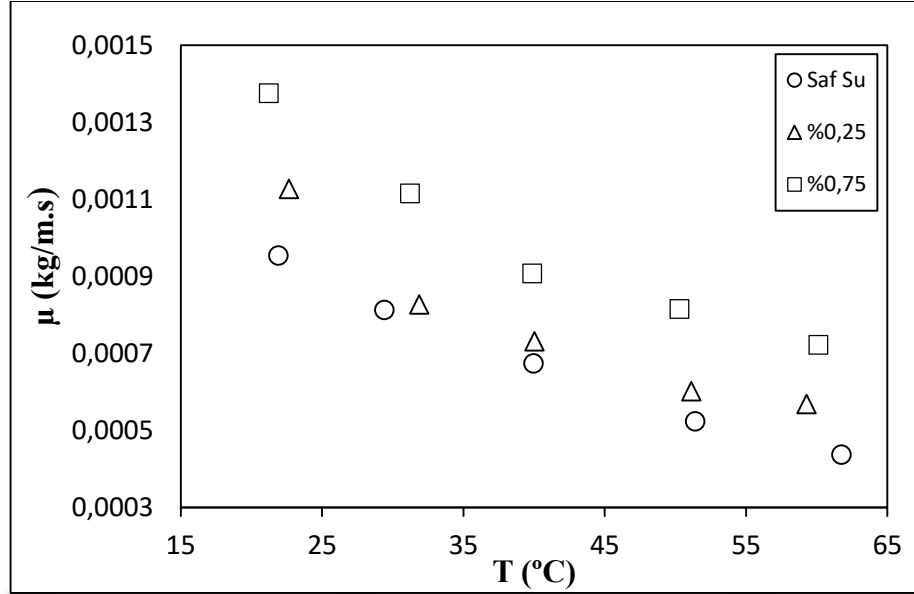
En yüksek ısı iletkenlik artış oranı %1,25 partikül oranı için 60°C sıcaklıkta yaklaşık olarak %10 mertebesinde görülmüştür. Sıcaklık artışı sebebi ile akışkan moleküllerinin çarpışma ve yayılım hareketlerinin artması sebebi ile ısı iletkenlik artışı gerçekleşmektedir.

Şekil 3.16'da görüldüğü üzere nanoakışkanların partikül oranında artış olması tüm sıcaklık değerlerinde ısı iletkenlik değerini arttırmıştır. Temel akışkana ilave edilen daha yüksek ısı iletkenlik değerine sahip partiküllerin ısı iletkenliği arttırması akla gelen ilk faktördür. Bu sebeple akışkana ilave edilen daha yüksek ısı iletkenlik değerine sahip olan partiküllerin ısı iletkenliği arttıracağı söylenebilir. Fakat bu yaklaşım tek başına yetersiz olmaktadır. Başka bir etken olan Brownian hareketi de bu sonuca etkimektedir. Partiküllerin akışkan içerisindeki rastgele hareketleri sonucu oluşan momentum ve ısı transferi etkileri Brownian hareketi ile açıklanabilir. Nanoakışkanlarda partikül oranındaki artışın ısı iletkenliği arttırmasına Brownian hareketi sebep gösterilebilir.

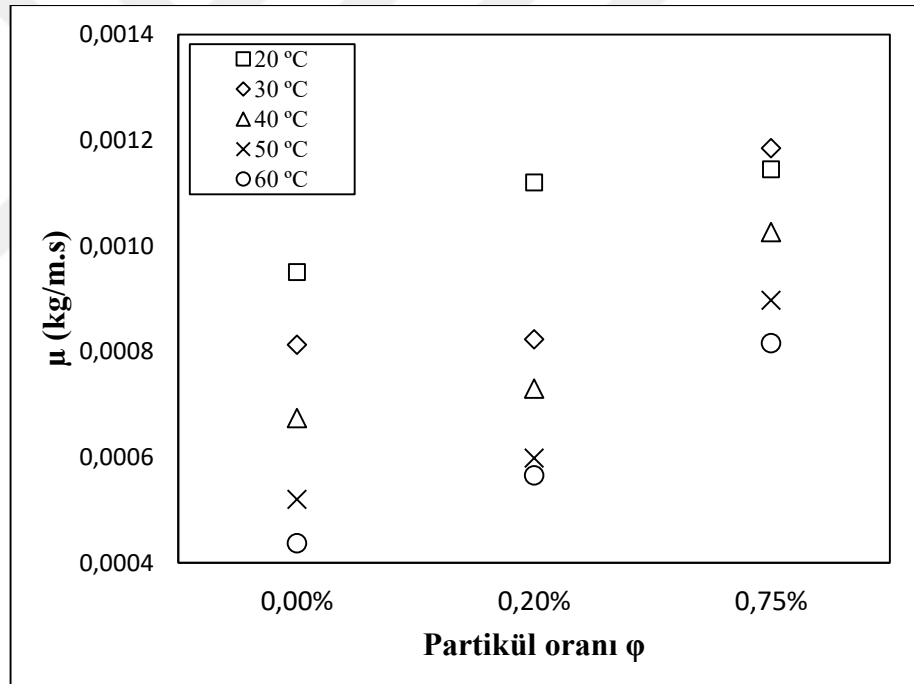
Saf su ve saf su-SiO₂ nanoakışkanlarının viskozite ölçümleri yapılırken A&D marka SV-10 model vibro viskozimetre kullanılmıştır. Saf su ve farklı partikül oranı içeren nanoakışkanlar için viskozite değerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 3.17'de ve farklı sıcaklık değerlerinde viskozitenin hacimsel partikül bağlı değişimi Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

%0, %0,25, %0,75 hacimsel partikül oranlarında hazırlanan nanoakışkanların viskozite değerleri belirlenirken ısı iletkenlik ölçümüne benzer bir yol izlenmiştir. Ölçüm yapılırken sıcaklık 20-60°C sıcaklık değerleri arasında tutulmuştur. 10°C kadar sıcaklık değerleri arttırılmış ve her farklı sıcaklık değeri için viskozite değeri ölçülmüştür.

Ölçümler sonucu beklendiği üzere nanoakışkanların viskozite değerlerinin saf suya kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.17. Farklı akışkanlar için viskozite değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 3.18. Farklı sıcaklıklarda viskozitenin hacimsel partikül oranı ile değişimi

Şekil 3.17 incelendiğinde sıcaklığın viskozite üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir. Sıcaklık değerinde artış gerçekleşmesi durumunda viskozite değerinde azalma olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 3.18 incelendiğinde ise farklı sıcaklık değerleri için hacimsel partikül oranının viskoziteye etkidiği görülmektedir. Hacimsel partikül oranında artış olması durumunda tüm sıcaklık değerleri için viskozitenin arttığı gözlemlenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çıkarımlardan sonra en yüksek sıcaklık ve en düşük hacimsel partikül oranında en düşük viskozite değeri gözlemlenmiştir. SiO₂ nanoakışkanı için 20°C sıcaklık ve %0,75 hacimsel partikül oranında en yüksek viskozite değeri belirlenmiştir.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada saf su ve farklı hacimsel partikül oranları içeren saf su-SiO₂ nanoakışkanının minikanallarda karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçlar doğal taşınım kaynaklı ikincil akışların zorlanmış akışla aynı yönlü olduğu (destekleyen akış) ve zıt yönlü olduğu (karşıt akış) durumları için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Ayrıca minikanal çapı, kütleli debi, nanoakışkanın nanopartikül hacimsel oranı deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Belirtilen parametrelerde yapılan değişikliklerin ısı transferi karakteristiklerine etkileri araştırılmıştır.

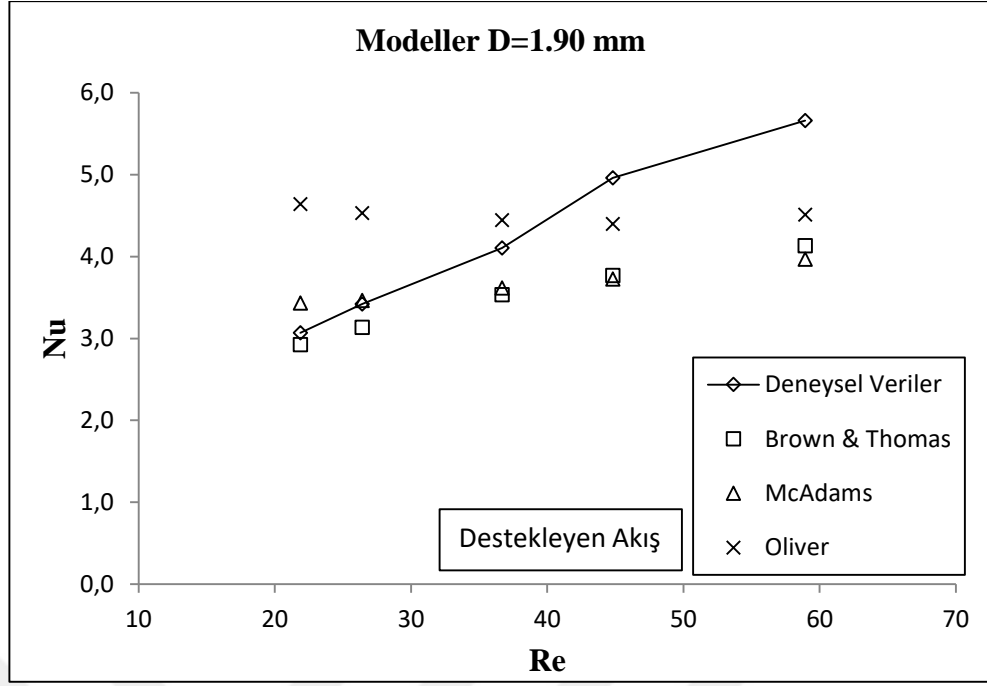
4.1. Isı Transfer verilerinin Literatürle Karşılaştırılması

Deneysel öncelikle tüm kanal çapları için destekleyen ve karşıt akış durumlarında saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilerin güvenilirliğini onaylamak amacıyla deneysel ortalama Nusselt sayısı sonuçları literatürde kabul gören aşağıdaki modeller ile kıyaslanmıştır (Oliver 1962; Feng ve Li 2013).

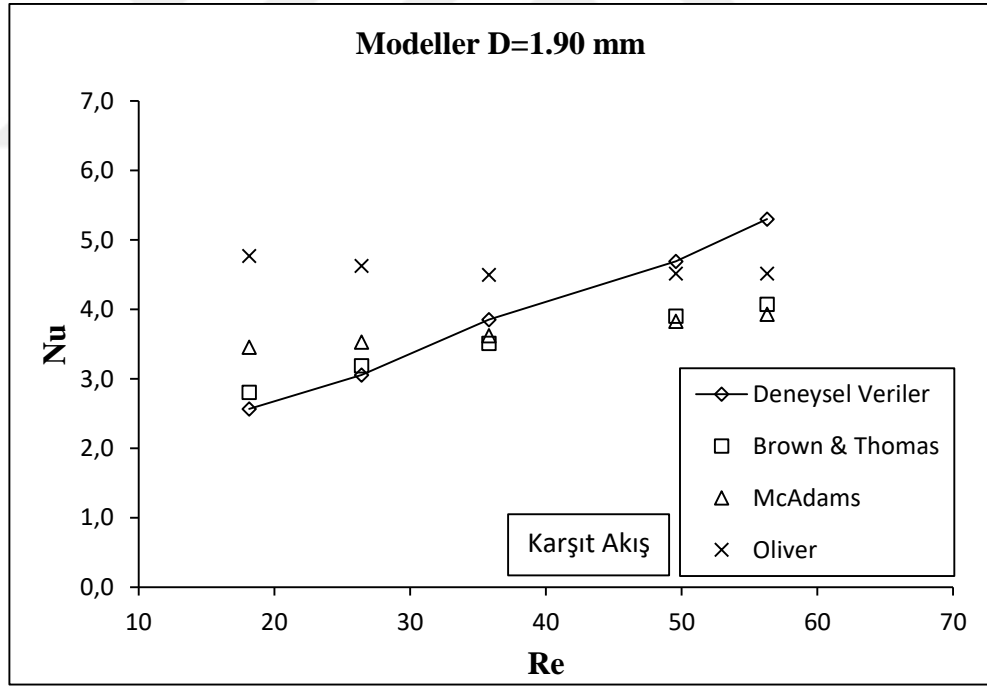
$$Nu \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} = 2,11 \left(Gz + 0,0273 \left(\frac{Gr Pr L/D}{Gz + L/D} \right)^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{Brown ve Thomas Modeli}) \quad (4.1)$$

$$Nu \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} = 2,11 \left(Gz + 0,0182 (Gr Pr)^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{McAdams Modeli}) \quad (4.2)$$

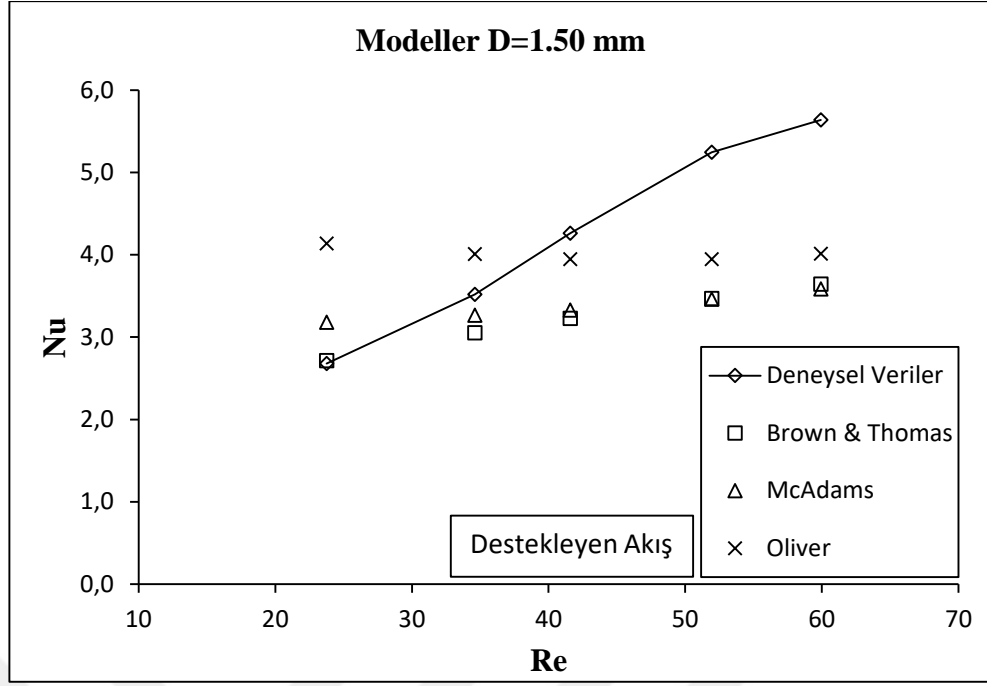
$$Nu \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} = 2,11 \left(Gz + 0,0083 (Gr Pr)^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{Oliver Modeli}) \quad (4.3)$$



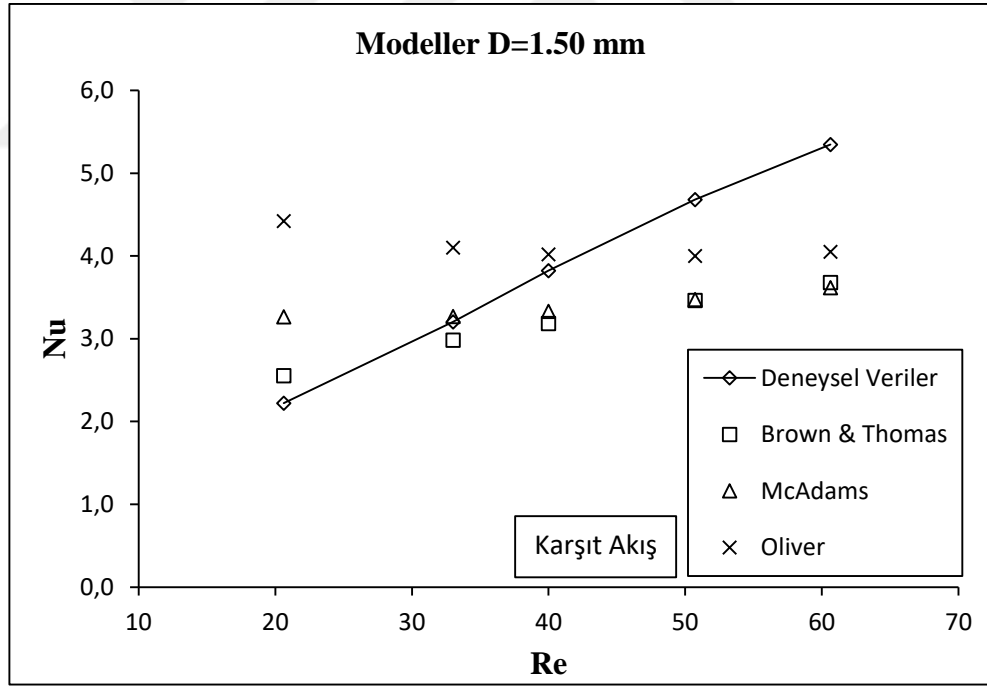
Şekil 4.1. Saf su için destekleyen akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle karşılaştırılması (D=1,90 mm)



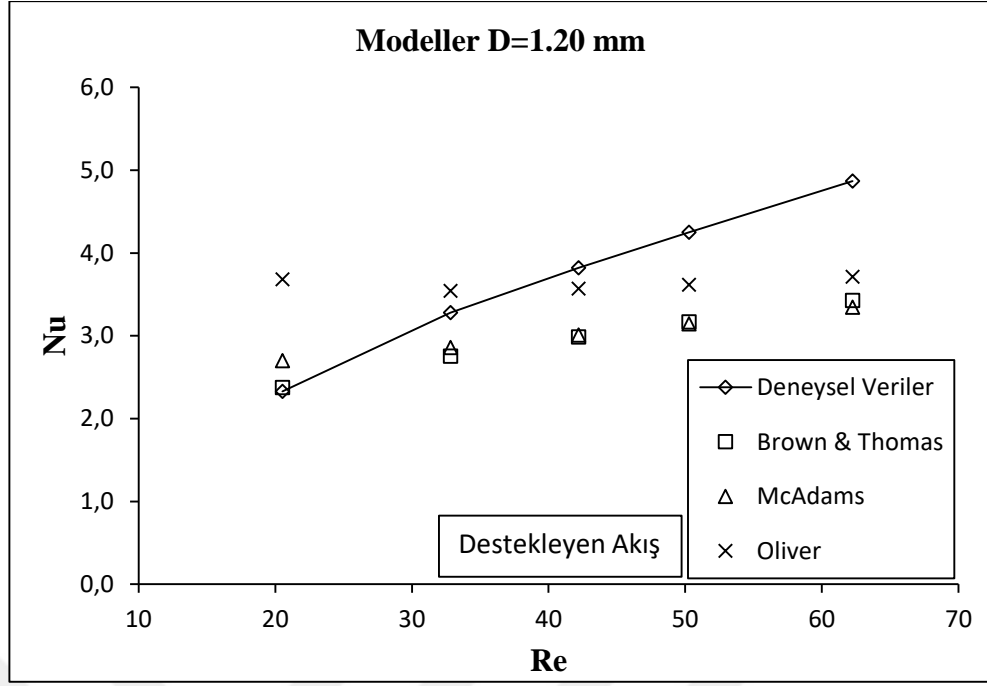
Şekil 4.2. Saf su için karşıt akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle karşılaştırılması (D=1,90 mm)



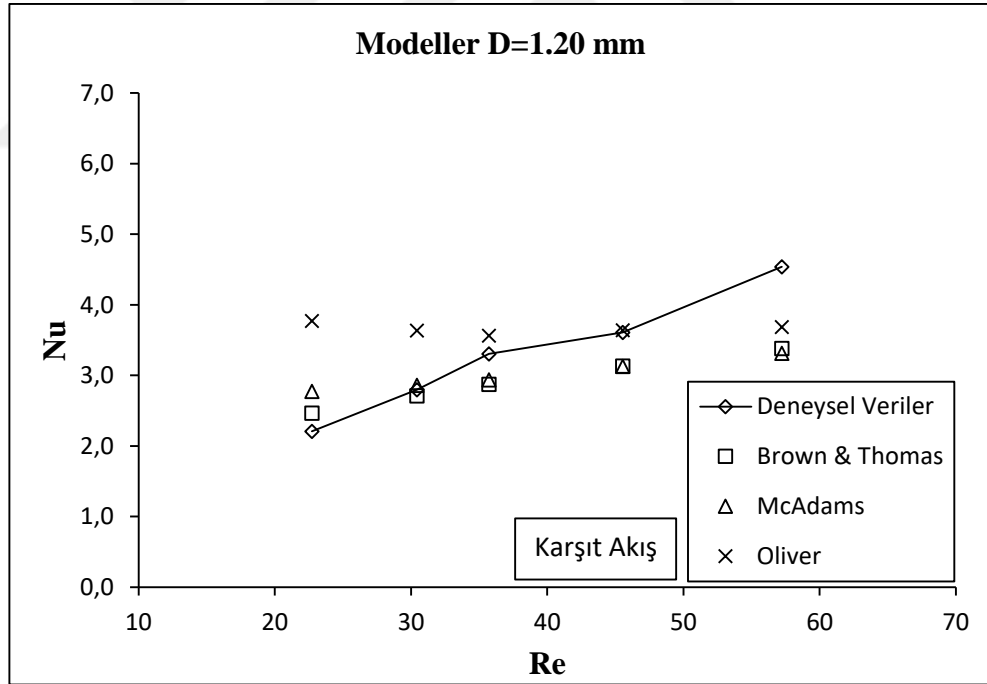
Şekil 4.3. Saf su için destekleyen akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle kıyaslanması (D=1,50 mm)



Şekil 4.4. Saf su için karşıt akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle kıyaslanması (D=1,50 mm)



Şekil 4.5. Saf su için destekleyen akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle kıyaslanması (D=1,20 mm)



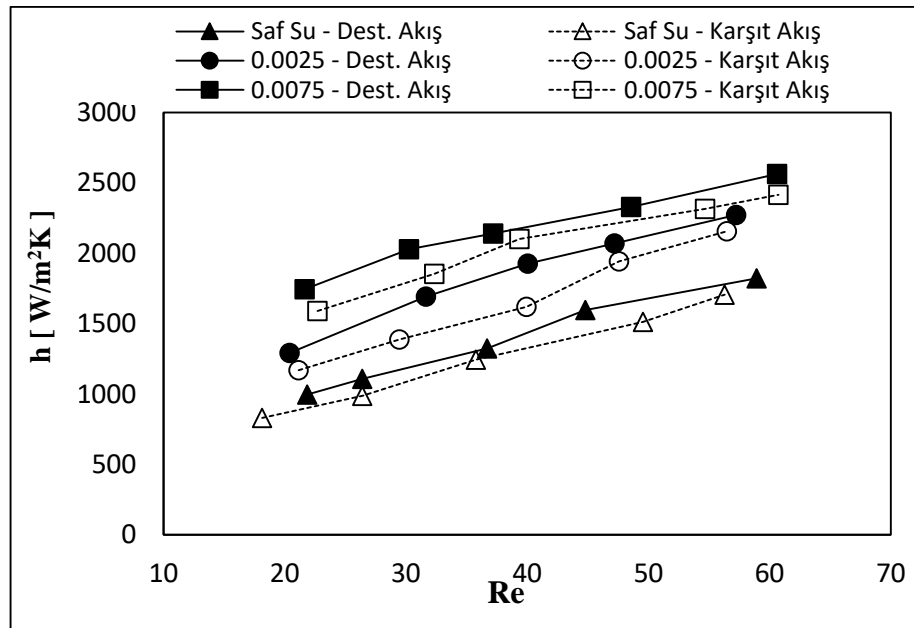
Şekil 4.6. Saf su için karşıt akış durumunda ısı transferi sonuçlarının literatürle kıyaslanması (D=1,20 mm)

Destekleyen ve karşıt akış durumları için 1,21 mm, 1,5 mm ve 1,9 mm kanal çap boyutları parametrelerine ilişkin saf su ısı transferi sonuçları ve literatür karşılaştırmaları Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6' da verilmiştir. Şekillerin

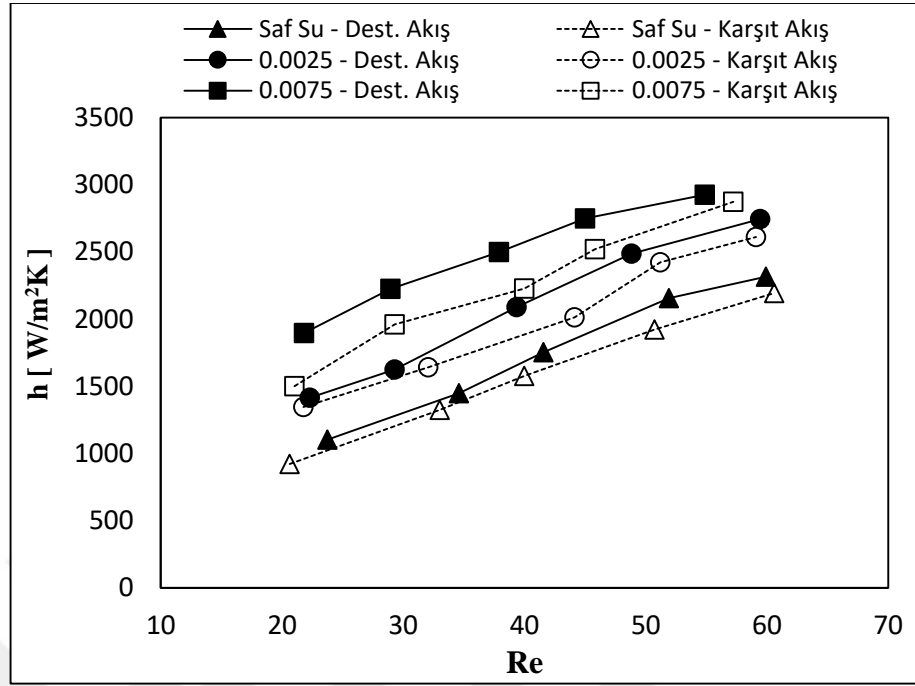
tümü incelendiğinde deneysel ortalama Nusselt sayısı sonuçlarının beklendiği üzere artan Reynolds sayısı ile arttığı görülmektedir. Modellerin tahminleri incelendiğinde ise McAdams ve Brown-Thomas modelleri birbirine yakın önermelerde bulunurken, Oliver modeli ise bu önermelerin bir miktar üzerinde kalmıştır. Genel itibarı ile deneysel sonuçlar modeller ile iyi bir uyumdayken Reynolds sayısının 40'tan büyük değerler alması ile bu uyum bir miktar bozulmuş ve elde edilen Nusselt sayısı modellerin üzerine çıkmıştır. Bu durum artan Reynolds sayısı ile zorlanmış taşınım etkilerinin baskınlığı ile açıklanabilir. Zorlanmış taşınım etkinliğinin artması ile karma taşınım için verilen bu modellerin güvenilirliği de azalmaktadır.

4.2. Karma Taşınım Bulguları

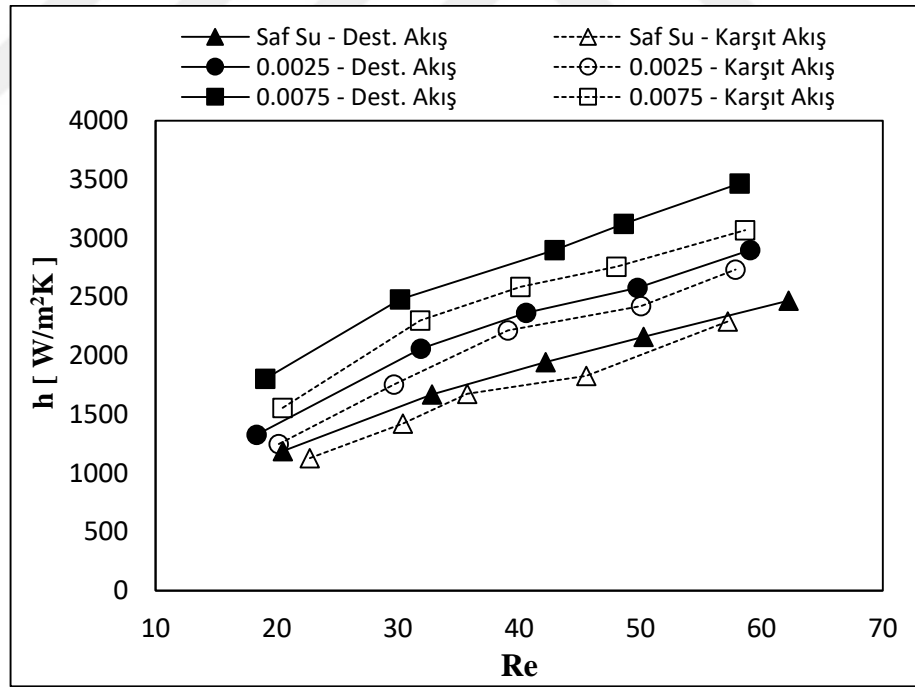
Karma taşınım bulgularına ilişkin elde edilen sonuçlar, grafik şeklinde bu bölümün devamında verilmiştir. Şekillerde destekleyen ve karşıt akış durumları için iki farklı gruplandırma yapılarak veriler sunulmuştur. Şekil 4.7, 4.8, 4.9 sırası ile 1,90, 1,50 ve 1,20 mm'lik minikanallarda, destekleyen ve karşıt akış durumlarında farklı iş akışkanları için "h" taşınım katsayısı ve Reynolds sayısı ilişkisini göstermektedir. Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'de ise aynı ilişki sırası ile saf su, %0,25 ve %0,75 hacimsel oranda partikül içeren SiO₂ nanoakışkanı için sunulmuştur.



Şekil 4.7. Saf su için 1,90 mm çaplı kanalda farklı akış durumlarında taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi



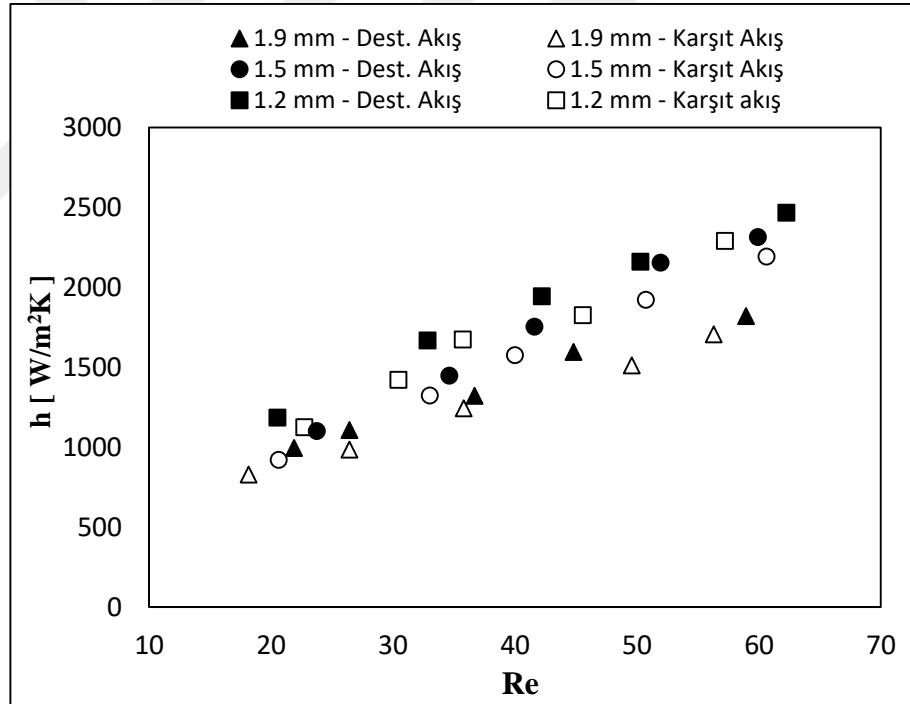
Şekil 4.8. Saf su için 1,50 mm çaplı kanalda farklı akış durumlarında taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi



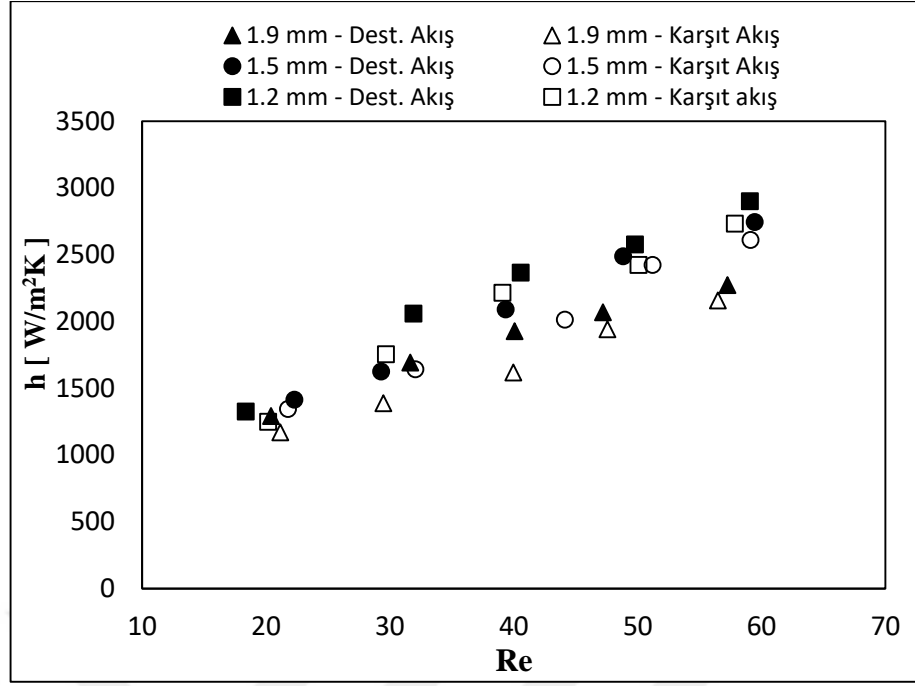
Şekil 4.9. Saf su için 1,20 mm çaplı kanalda farklı akış durumlarında taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi

Şekil 4.7, 4.8 ve 4,9 incelendiğinde en düşük taşınım katsayısı sonuçları saf su için karşıt akış durumunda görülmektedir. Nanoakışkan karışımları beklenildiği üzere

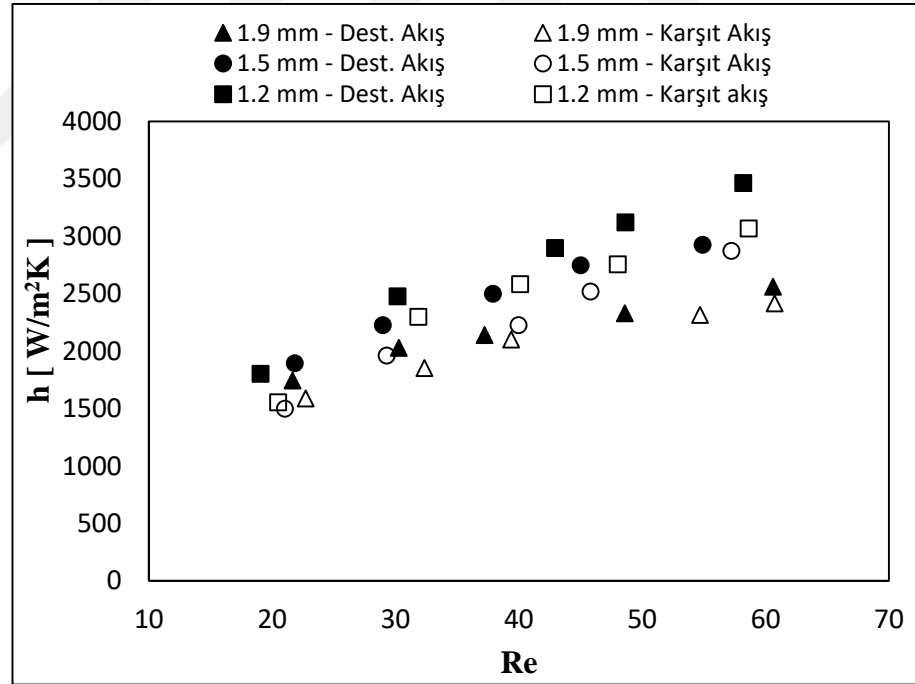
taşıyım katsayısı açısından saf suya kıyasla üstündür. Nanoakışkan kullanımı ile taşıyım katsayısında yani ısı transferinde gözlenen bu artış Brownian etkisi, nanopartiküllerin kümelenmesi, nanopartikül etrafında sıvı katmanlaşması, yakın alan radyasyonu ve balistik foton hareketi teorileri ile izah edilmektedir. Bu görüşlerden en çok kabul göreni ve bizim tarafımızdan da desteklenen Brownian etkisidir. Temel akışkan içerisindeki nanopartiküllerin rastlantısal hareketi Brownian etkisi olarak tanımlanmaktadır. Nanoakışkanlar içerisindeki partiküllerin bu rastsal hareketi, akış alanında mikrotasıyım bölgelerinin oluşmasına neden olmakta ve bu durum da taşıyım katsayısını arttırmaktadır. Nanopartikül hacimsel oranının artması Brownian etkisini arttıracığından artan hacimsel partikül oranı ile ısı taşıyım katsayısı da artmıştır. En yüksek taşıyım katsayısı değerleri ise %0,75 hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanında destekleyen akış koşullarında elde edilmiştir. Ayrıca tüm hacimsel oranlar için destekleyen akış durumunda, karşıt akış durumuna göre daha yüksek taşıyım katsayıları gözlenmiştir.



Şekil 4.10. Saf su için farklı kanal çapları ve akış durumlarında taşıyım katsayısı ve Reynolds sayısı ilişkisi



Şekil 4.11. %0,25 SiO₂ nanoakışkanı için farklı kanal çapları ve akış durumlarında taşınım katsayısı ve Reynolds sayısı ilişkisi

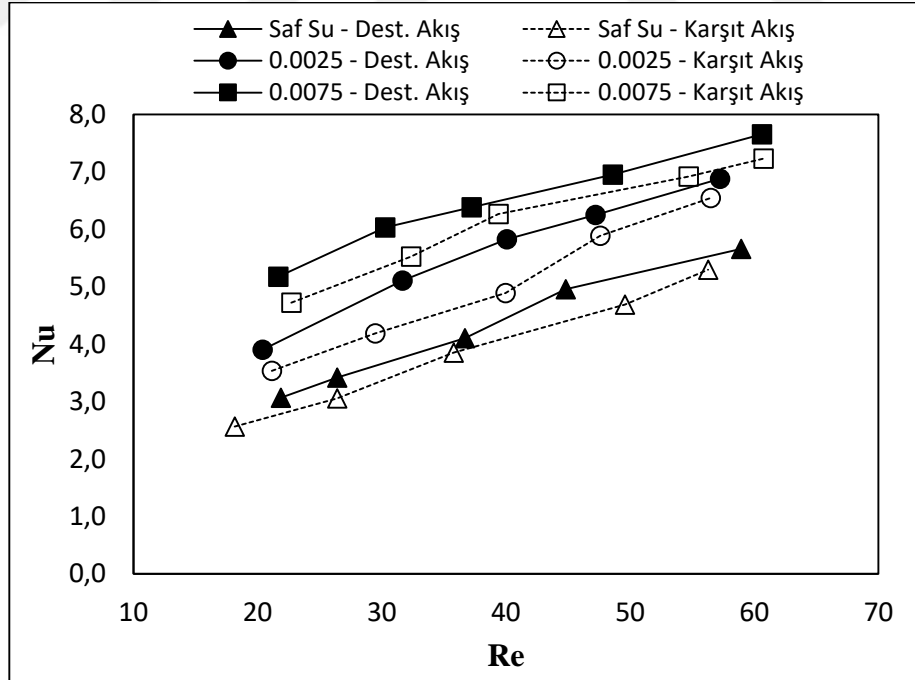


Şekil 4.12. %0,75 SiO₂ nanoakışkanı için farklı kanal çapları ve akış durumlarında taşınım katsayısı ve Reynolds sayısı ilişkisi

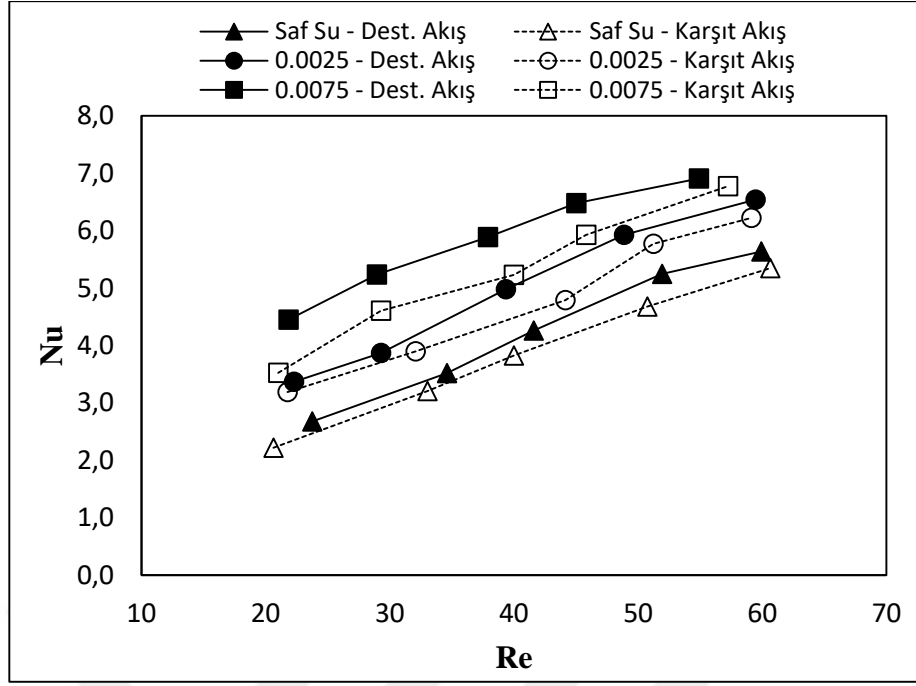
Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12 incelendiğinde ise tüm kanal çaplarında taşınım katsayısının artan Reynolds sayısı ile arttığı görülmektedir. Ayrıca en yüksek taşınım katsayısı değerleri 1,20 mm'lik minikanalda elde edilmiştir ve kanal çapının büyümesi

ile taşınım katsayısında azalma gözlenmiştir. Kanal çapının taşınım katsayısı üzerindeki etkisi Reynolds sayısındaki artışla daha baskın hale gelmiştir. Bunun yanı sıra tüm minikanal çaplarında destekleyen akış durumunda karşıt akışa göre daha yüksek taşınım katsayısı değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum doğal taşınım etkileri ile oluşan ikincil akışların bir sonucudur. Kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile oluşan ikincil akışların yönünün destekleyen akışta tahrik yönü ile aynı olması ısı transferini arttırırken iken, karşıt akışta zıt yönlü olması ısı transferini olumsuz etkiler. Bu durumda tüm şartlarda destekleyen akış koşullarında ısı transferi daha etkindir.

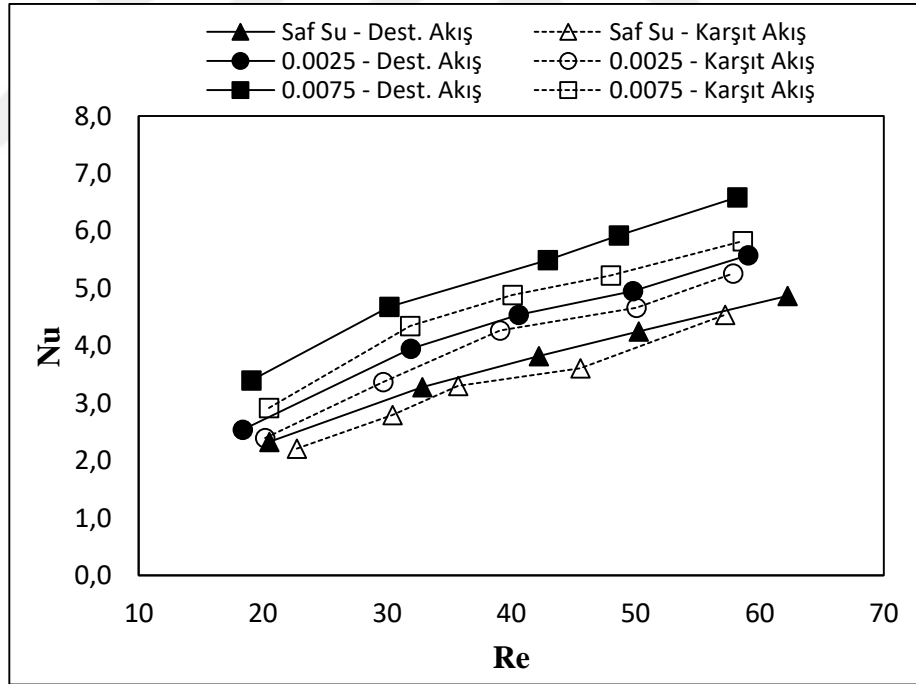
Aşağıda verilen Şekil 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18’de deneysel ortalama Nusselt sayısı sonuçlarının Reynolds sayısı ile değişimleri sunulmuştur. Buradaki Nusselt sayısı, toplam Nusselt sayısını ifade etmekle beraber doğal ve zorlanmış taşınım etkilerini kapsamaktadır. Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15’te sırası ile 1,90, 1,50 ve 1,20 mm’lik minikanalların kullanıldığı durumlar gösterilirken, Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18’ de sırasıyla saf su, %0,25 ve %0,75’lik nanoakışkanların kullanıldığı deney şartları sergilenmiştir. Ayrıca her bir grafikte destekleyen ve karşıt akış şartları ayrı eğriler halinde sunulmuştur.



Şekil 4.13. Saf su ve farklı hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanı için 1,90 mm kanal çapında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi



Şekil 4.14. Saf su ve farklı hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanı için 1,50 mm kanal çapında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi

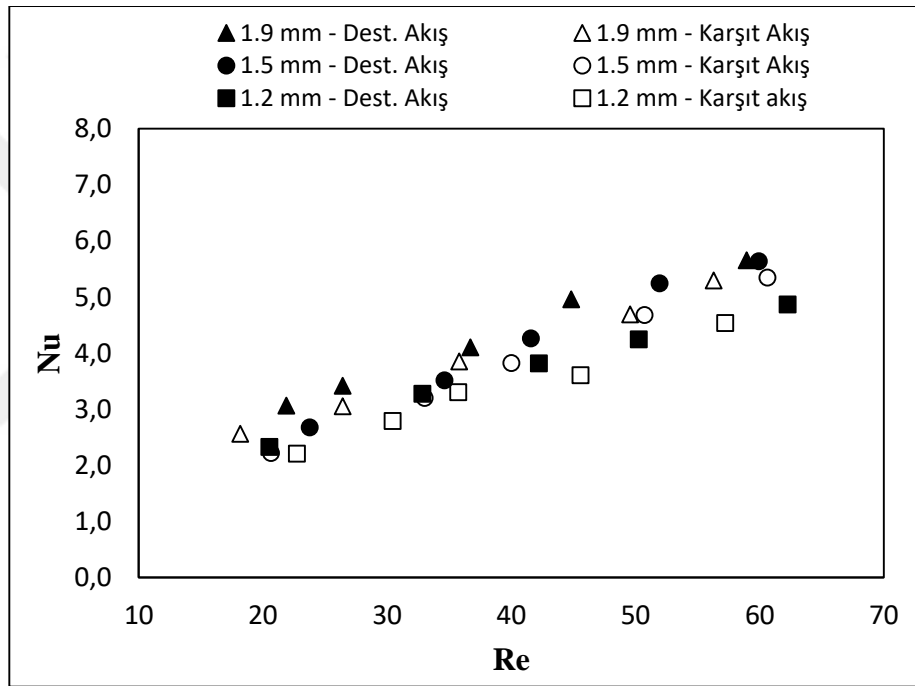


Şekil 4.15. Saf su ve farklı hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanı için 1,20 mm kanal çapında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile ilişkisi

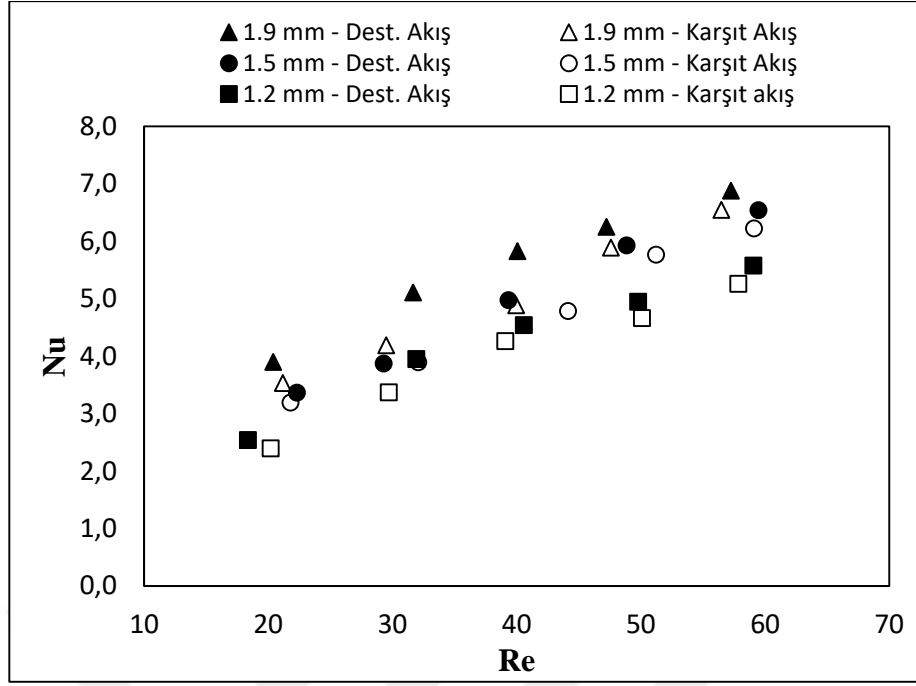
Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15 incelendiğinde artan Reynolds sayısı ile tüm akışkanlar için hem karşıt hem de destekleyen akış durumlarında, Nusselt sayısının arttığı görülmektedir. Tüm minikanal çaplarında en yüksek Nusselt sayısı değerlerine, en yüksek

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

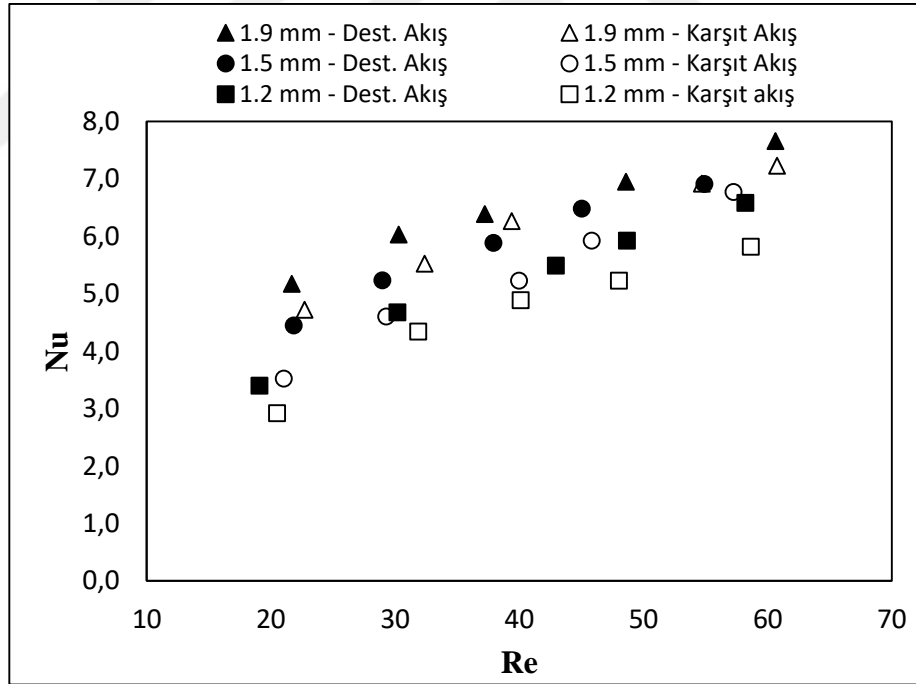
hacimsel oran olan %0,75'lik SiO₂ nanoakışkanında ve destekleyen akış koşulunda rastlanırken, en düşük Nusselt sayısı değerleri ise saf su ve karşıt akış durumunda görülmüştür. Saf su için destekleyen akış durumunda karşıt akış durumuna kıyasla Nusselt sayısında 1,90 mm'lik minikanalda minimum %4 maksimum %14 Nusselt sayısı artışı gözlenirken, bu artış 1,50 ve 1,20 mm'lik minikanallarda sırasıyla minimum %6 ve %4, maksimum %10 ve %13 olarak belirlenmiştir. %0,75'lik SiO₂ nanoakışkanı için ise destekleyen akış durumunda, karşıt akış durumuna göre sırasıyla 1,90, 1,50 ve 1,20 mm'lik minikanallarda Nusselt sayılarında minimum %4, %5 ve %8, maksimum %13, %16 ve %18 artış saptanmıştır.



Şekil 4.16. Saf su için farklı kanal çapı ve akış durumları için Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının ilişkisi



Şekil 4.17. %0,25 hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanı için farklı kanal çapı ve akış durumları için Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının ilişkisi



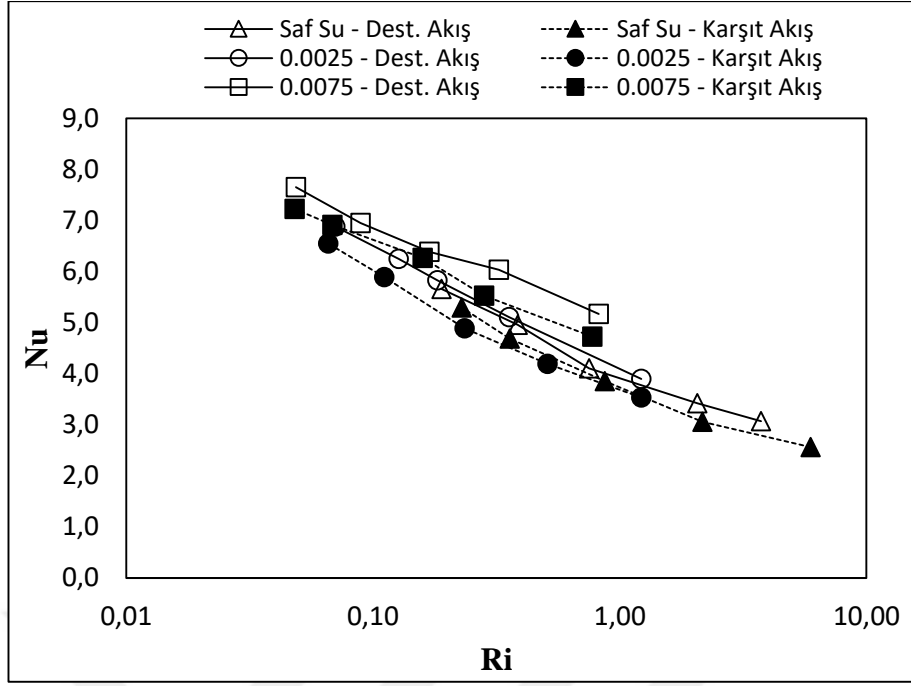
Şekil 4.18. %0,75 hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanı için farklı kanal çapı ve akış durumları için Nusselt sayısı ile Reynolds sayısının ilişkisi

Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18 incelendiğinde tüm akışkanlar için hem destekleyen hem de karşıt akış durumlarında kanal çapının artması Nusselt sayısında artışa neden olmuştur. Saf su için kanal çapındaki artışın Nusselt sayısı üzerindeki etkisini %25 ve %75'lik

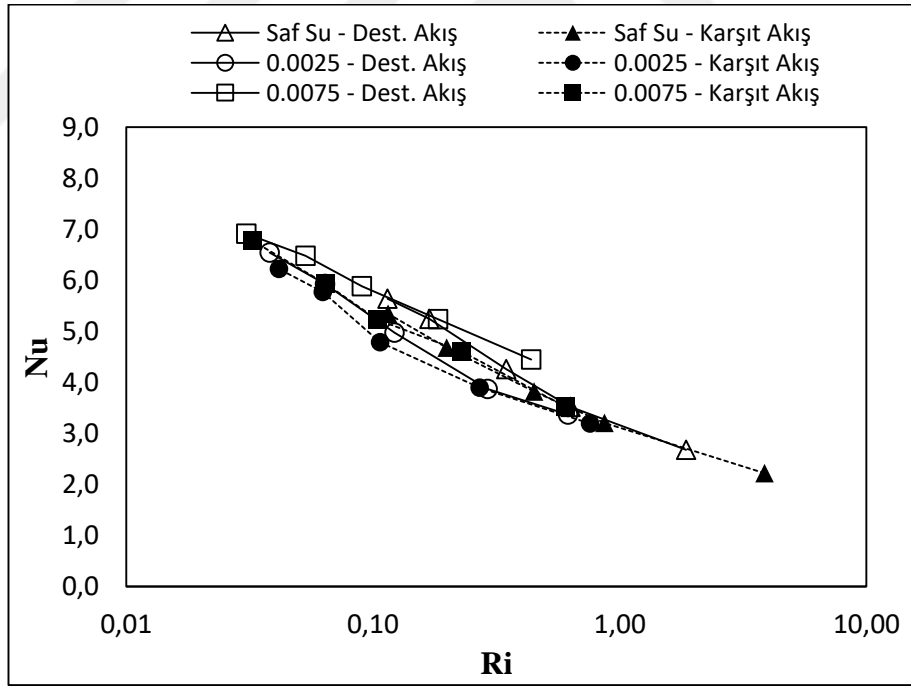
nanoakışkana göre oldukça az olduğu görülmüştür. Hacimsel partikül oranındaki artışla kanal çapının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi de artmıştır. 1,90 mm'lik minikanalda %0,25'lik nanoakışkanda saf suya göre, karşıt akışta %19-30 ve destekleyen akışta %21-34 oranında Nusslet sayısı artışı gözlenmiştir. Bu artış 1,50 mm'lik minikanalda karşıt akışta %18-29 ve destekleyen akışta %15-32 iken, 1,20 mm'lik kanalda ise karşıt akış durumunda %16-24, destekleyen akışta %18-25 olmuştur. %0,75'lik nanoakışkanda saf suya göre 1,90 mm'lik minikanalda, karşıt akışta %32-63 ve destekleyen akışta %33-64 oranında Nusslet sayısı artışı gözlenmiştir. 1,50 mm'lik minikanalda bu artış karşıt akışta %33-59 ve destekleyen akışta %28-61 iken, 1,20 mm'lik kanalda ise karşıt akış durumunda %25-48, destekleyen akışta %38-54 olmuştur.

Deneysel ortalama Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi sırasıyla Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'de 1.90, 1.50 ve 1.20 mm'lik kanallar için verilmiştir. Ayrıca bu değişim Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'de ise sırasıyla saf su, %0.25 ve %0.75'lik nanoakışkanlar için ayrı ayrı gösterilmiştir. Bilindiği üzere Richardson sayısı kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanır. Richardson sayısının 0.01 ila 10 arasında olduğu durumda, zorlanmış taşınım ile birlikte ihmal edilemez boyutta doğal taşınımından bahsetmek mümkündür. Şekil 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24 incelenirse ilgilenilen tüm durumlarda ısı transfer mekanizmasının karma taşınım olduğu açıkça görülecektir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

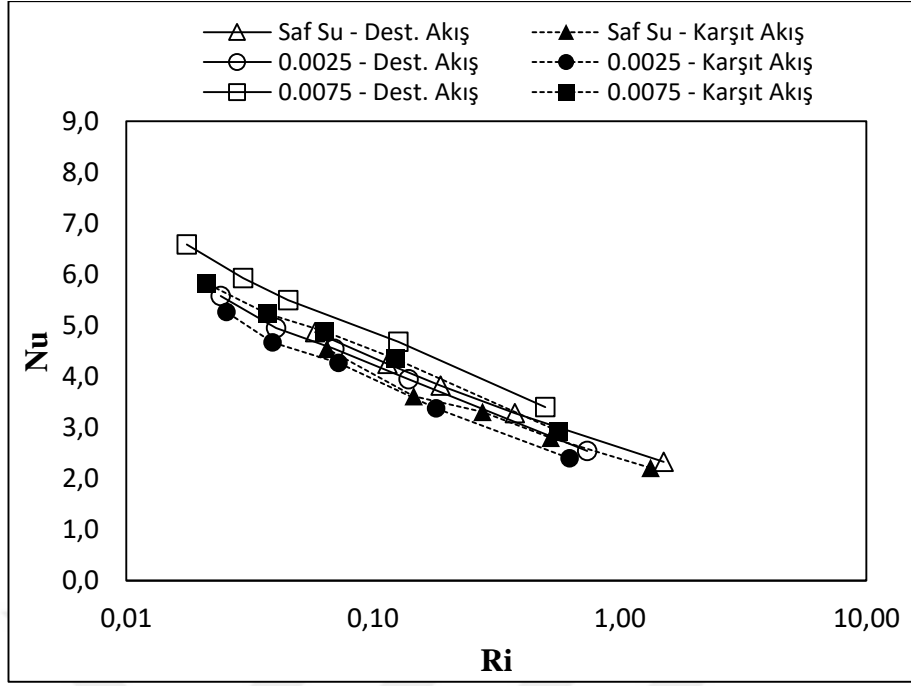


Şekil 4.19. 1,90 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanı ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi

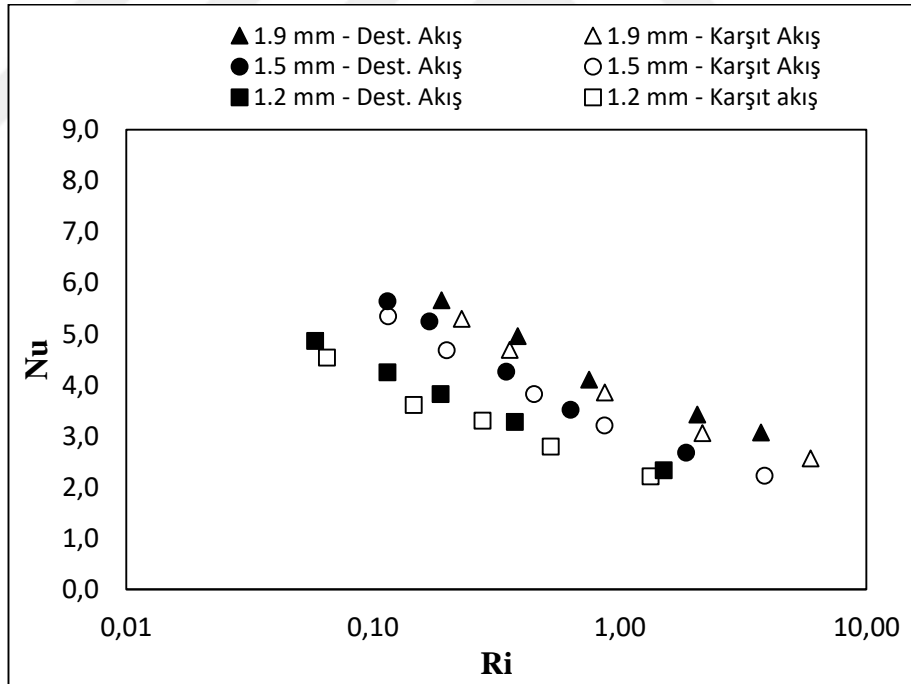


Şekil 4.20. 1,50 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanı ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi

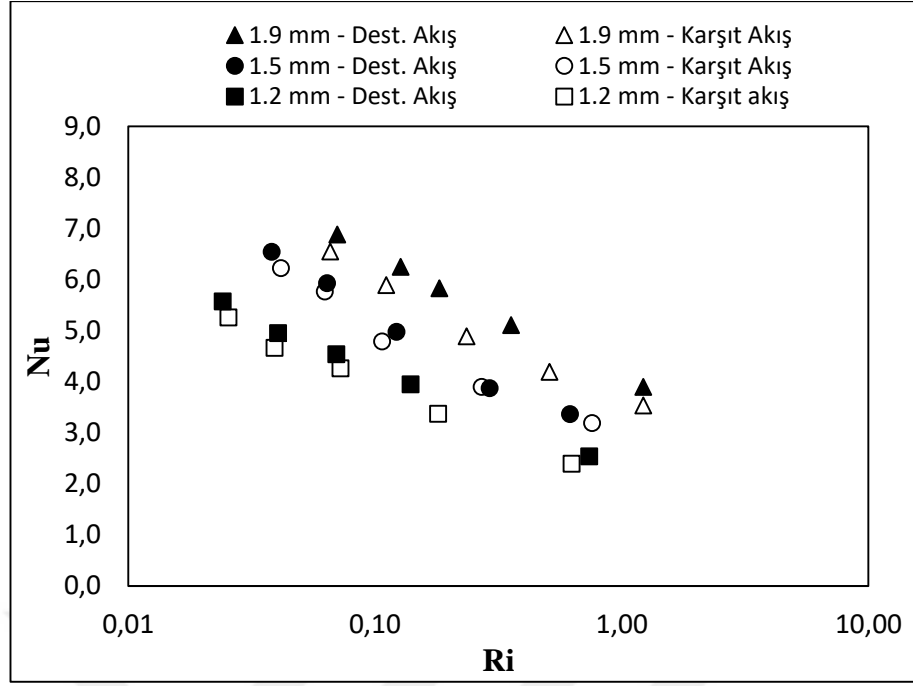
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



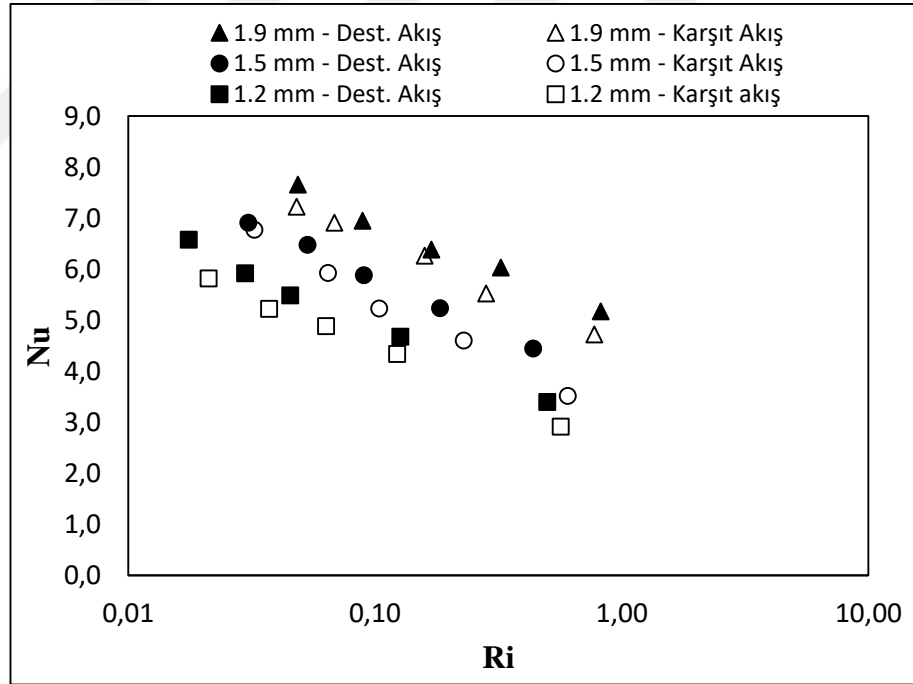
Şekil 4.21.1, 20 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanı ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi



Şekil 4.22. Saf su için farklı kanal çapları ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi



Şekil 4.23. %0,25 SiO₂ için farklı kanal çapları ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi

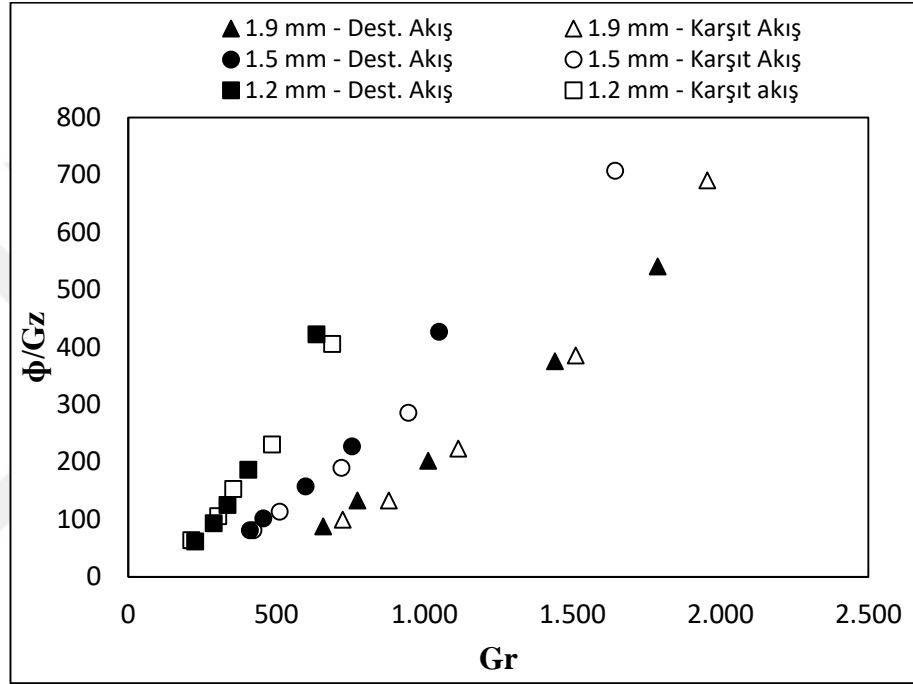


Şekil 4.24. %0,75 SiO₂ için farklı kanal çapları ve akış durumları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile ilişkisi

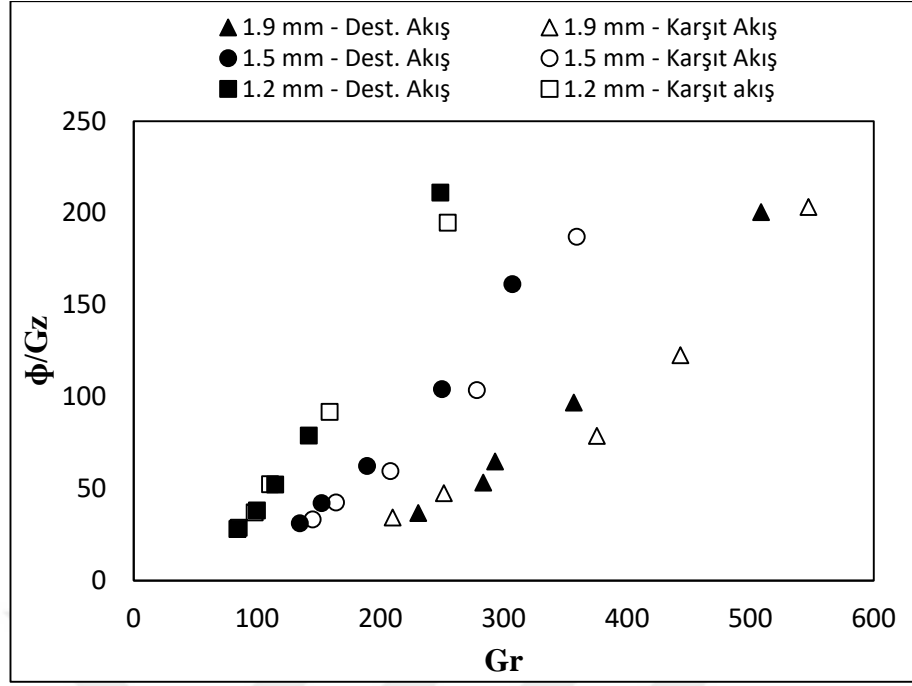
Şekil 4.25, 4.26, 4.27’de sırasıyla saf su, %0,25 ve %0,75’lik SiO₂ nanoakışkanları için ϕ/Gz ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi destekleyen ve karşıt akış durumları için verilmiştir. ϕ/Gz ifadesi doğal taşınımın toplam ısı transferine oranını

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

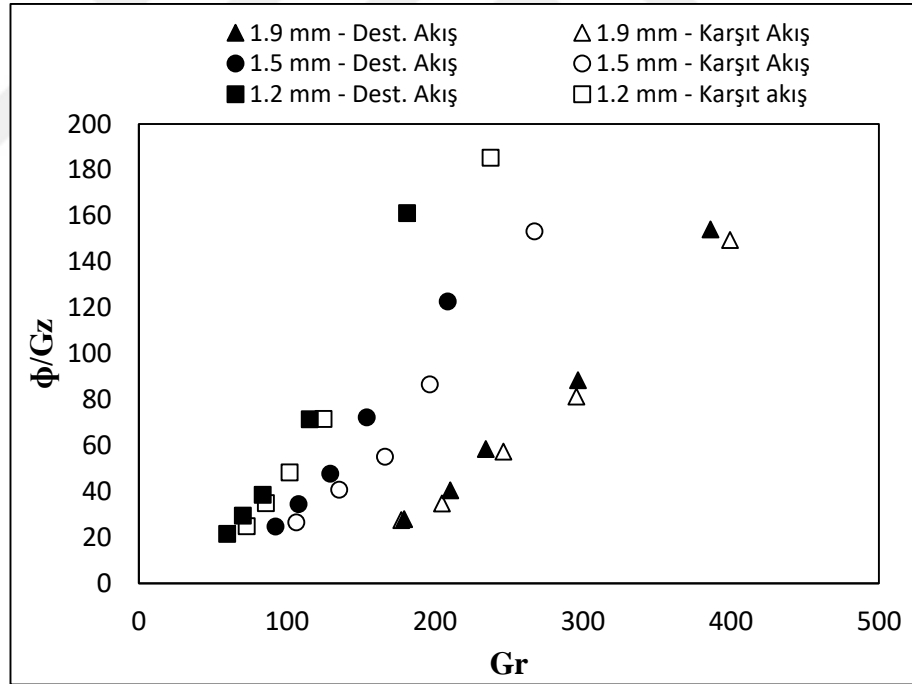
ifade etmektedir. Yani herhangi bir Grashof sayısı için ϕ/Gz değeri ne kadar büyükse doğal taşınımın ısı transferindeki etkisi o kadar fazla olacaktır. Şekiller incelendiğinde Grashof sayısı arttıkça tüm akışkanlarda ϕ/Gz ifadesi yani doğal taşınım etkileri artmıştır. Grashof sayısı azaldıkça ϕ/Gz ifadesinin "0" değerine yaklaştığı görülmektedir. Bu durumdaysa taşınım ile ısı transferi için doğal taşınım mekanizmasının etkileri kaybolmaktadır. Ayrıca herhangi bir Grashof sayısı için minikanal çapının azalması taşınım ile ısı transferinde doğal taşınım etkinliğini arttırmaktadır.



Şekil 4.25. Saf su için ifadesinin Grashof sayısına bağlı değişimi



Şekil 4.26. %0,25 hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanı için ifadesinin Grashof sayısına bağlı değişimi

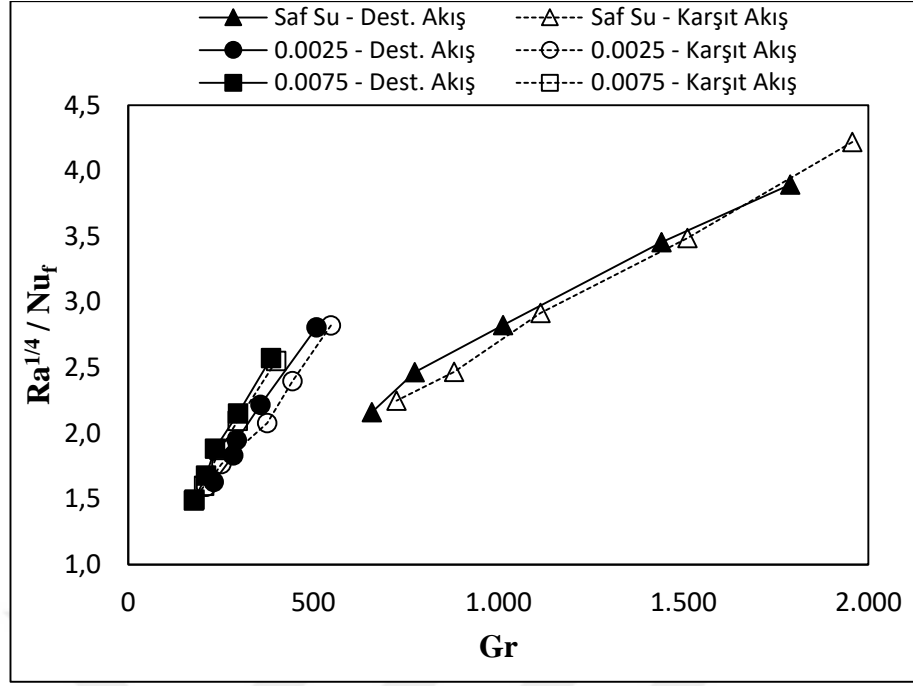


Şekil 4.27. %0,75 hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanı için ifadesinin Grashof sayısına bağlı değişimi

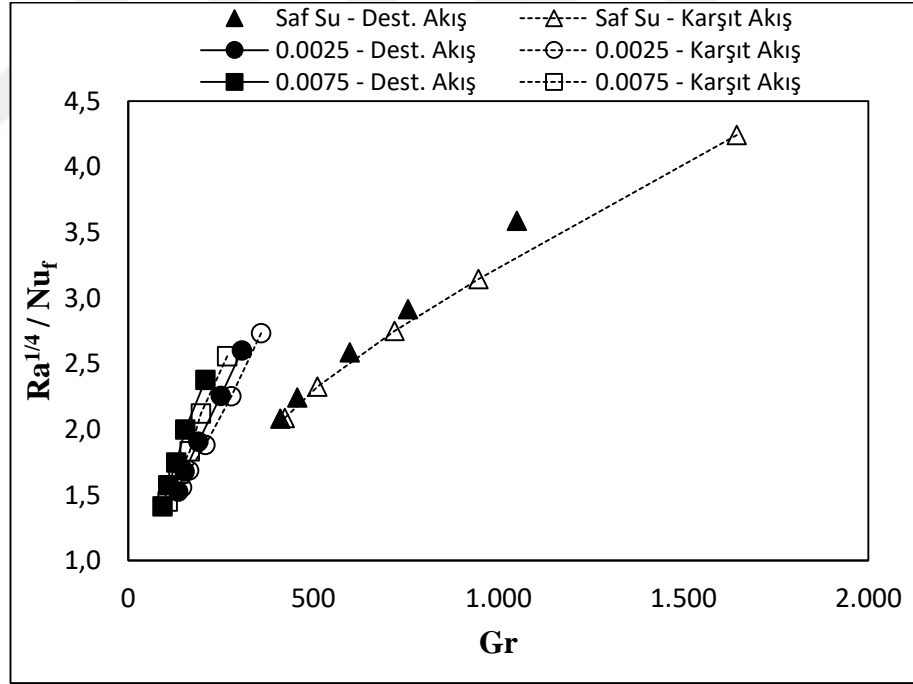
Temel akışkana nanopartikül ilavesinin ve kanal çapındaki değişimlerin, karma taşınım ile ısı transferini ne yönde etkilediğini gösteren grafikler Şekil 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33' de verilmektedir. Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da sırasıyla, 1.9, 1.5 ve 1.2

mm'lik kanal çaplarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ değerinin Grashof sayısı ile değişimi gösterilirken, Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'de bu değişim farklı akışkanlar için sunulmuştur. $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesi Shannon ve Depew (1969) tarafından önerilmiştir ve karma taşınım ile ısı transferinde doğal taşınım etkileriyle zorlanmış taşınım etkilerinin kıyaslanmasında sıklıkla tercih edilmektedir. Buradaki $Ra^{1/4}$ terimi doğal taşınım etkilerini, Nu_f terimi ise zorlanmış taşınım etkilerini kapsamaktadır. Dolayısıyla bu oranın artışı doğal taşınım etkilerinin de artması anlamına gelmektedir. Tüm şekillerde düşük Grashof sayılarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ değerinin de oldukça düşük olduğu görülmektedir. Artan Grashof sayısı ile kaldırma kuvvetlerinin etkileri de artacağından $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesi yükselmiştir. Şekil 4.28, 4.29, 4.30'da sabit bir Grashof sayısında artan hacimsel partikül oranının $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesini yani karma taşınım etkinliğini belirgin şekilde arttırdığı açıkça görülmektedir. Nanoakışkan kullanımıyla yükselen bu karma taşınım etkinliği Brownian etkisine ve Termoferez fenomeniyle gerçekleşmiştir. Termoferez fenomeni sıcaklık gradyanının neden olduğu nanopartikül göçü olarak tanımlanmaktadır ve bu fenomen hacimsel partikül oranının artmasıyla kuvvetlenir. Termoferezin oluşması ve kuvvetlenmesi akış alanında termal sınır tabaka kalınlığında artışa sebep olacaktır. Bu şekilde doğal taşınım etkinliğini de desteklenmiş olacaktır. Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'de ise kanal çaplarının etkisini incelemek üzere $Ra^{1/4}/Nu_f - Gr$ grafikleri verilmiştir. Burada sabit bir Grashof sayısında kanal çapının azalmasının doğal taşınım etkinliğini arttırdığı görülmektedir. Çap azalmasıyla gerçekleşen bu artış saf su için daha kuvvetliyen, hacimsel partikül oranının artmasıyla bir miktar zayıflamıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

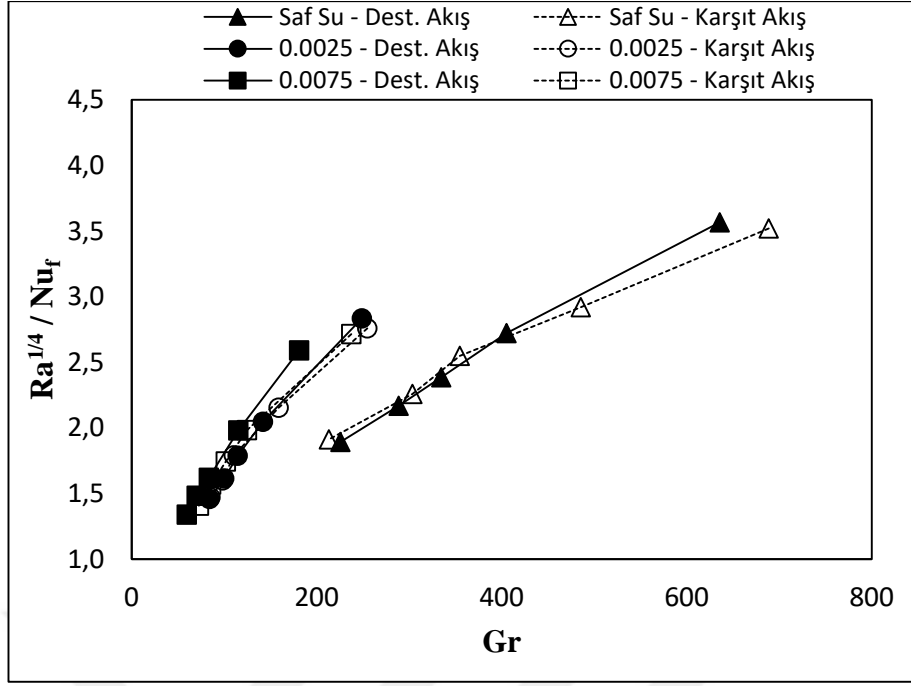


Şekil 4.28. 1,90 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanları ve akış durumları için ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi

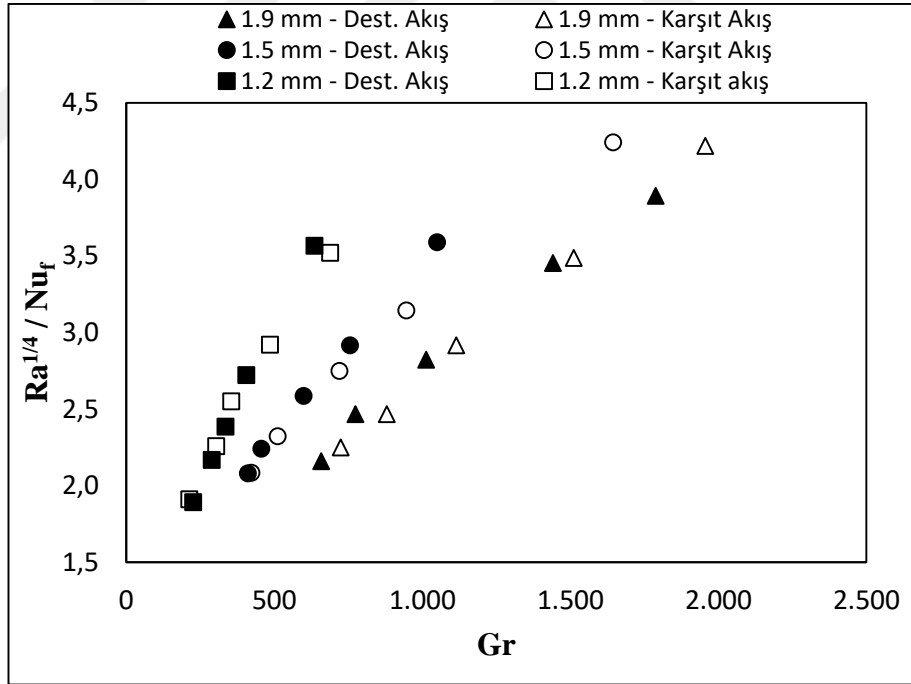


Şekil 4.29. 1,50 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanları ve akış durumları için ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi

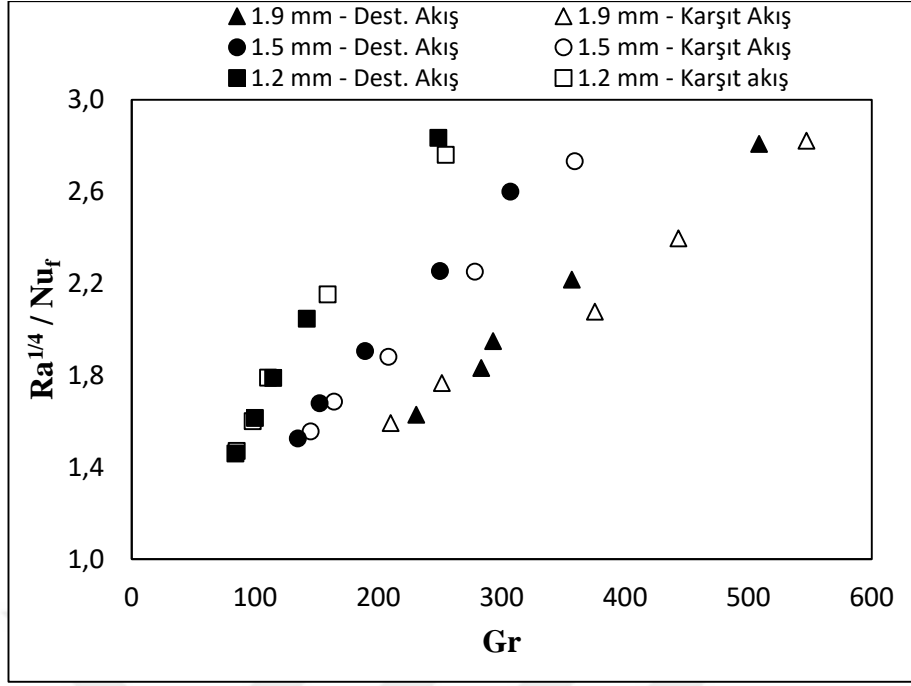
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



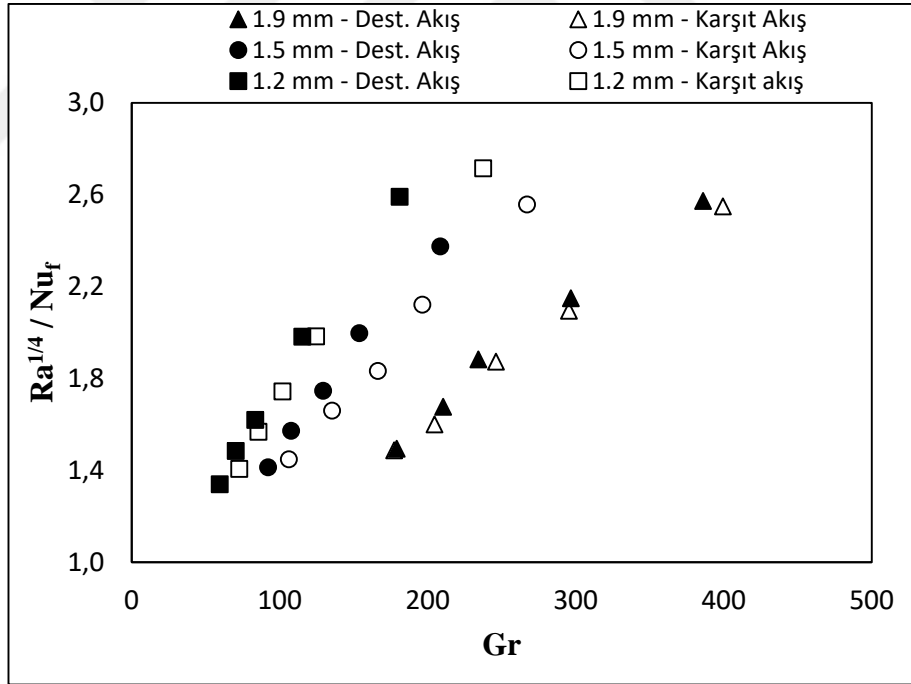
Şekil 4.30. 1,20 mm çaplı minikanalda farklı iş akışkanları ve akış durumları için ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi



Şekil 4.31. Saf su için ifadesinin Grashof sayısı ile ilişkisi

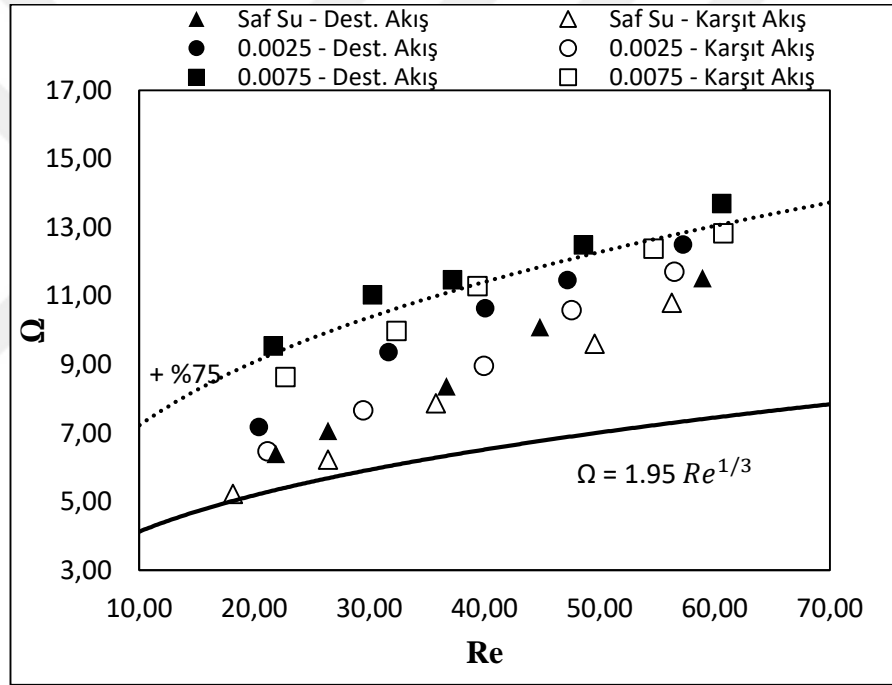


Şekil 4.32. %0,25 hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanı için ifadesinin Grashof sayısı ile ilişkisi

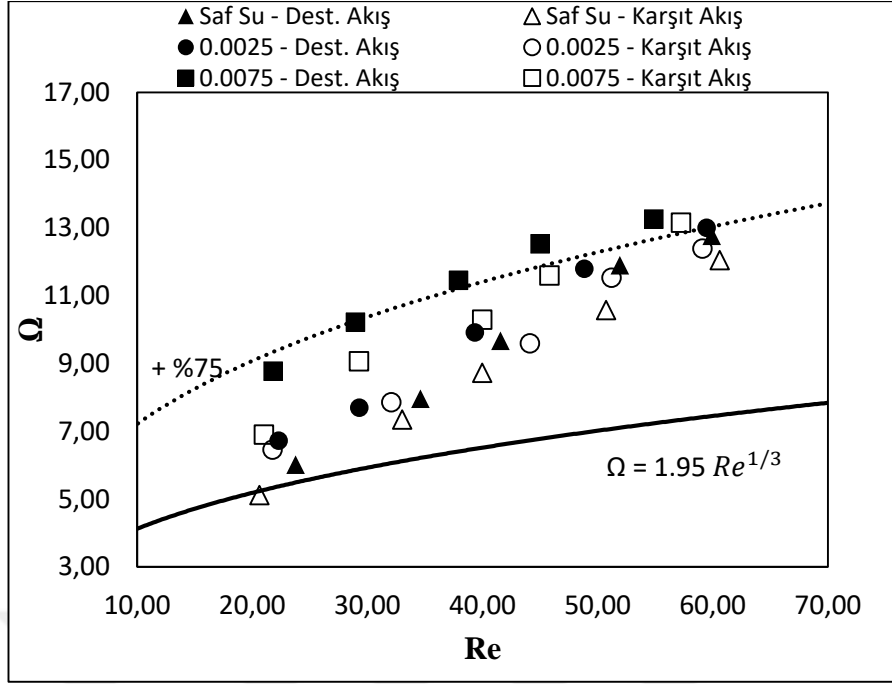


Şekil 4.33. %0,75 hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanı için ifadesinin Grashof sayısı ile ilişkisi

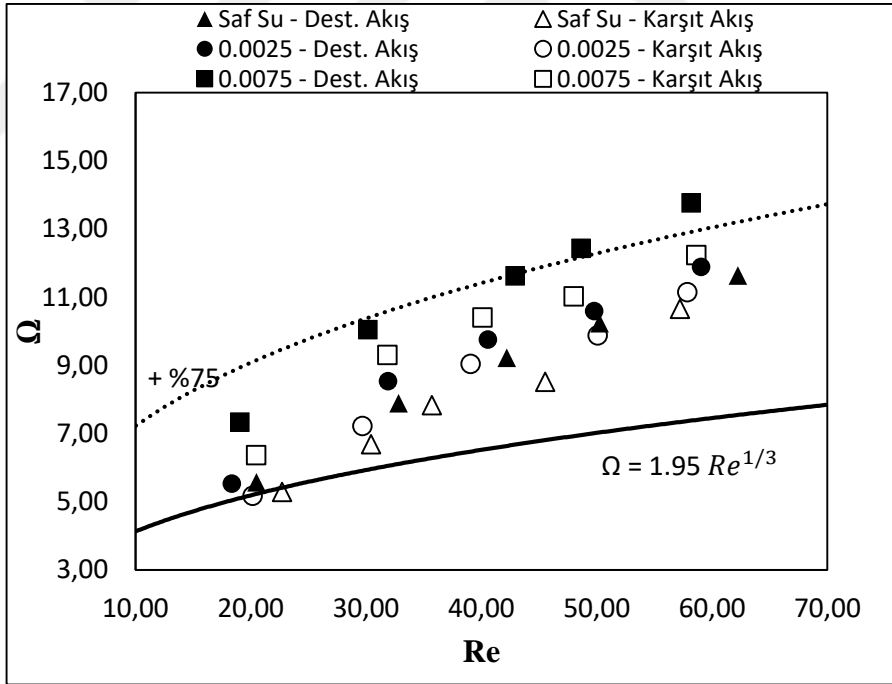
Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi olarak tanımlanan ‘ Ω ’ ile ilgili sonuçlar Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36’ da sunulmuştur. Şekillerdeki $\Omega=1,95Re^{1/3}$ eğrileri saf zorlanmış taşınımı ifade etmektedir. Dolayısıyla bu eğri üzerindeki deneysel sonuçlar için doğal taşınımından söz etmek mümkün olacaktır. Şekillerde bu eğrinin üzerinde kesikli çizgi ile çizili eğri ise bu eğrinin %75 oranında arttırılmış halidir. Şekillerde görüldüğü üzere tüm durumlarda değerler, saf zorlanmış taşınım eğrisinin üzerindedir. Ayrıca grafikler incelendiğinde iki farklı hacimsel oranlı nanoakışkan için sonuçlar saf zorlanmış taşınım eğrisinin %75 artırımlı haline yakındır. Buradan hareketle, toplam ısı transferinde saf zorlanmış taşınım ile ısı transferi etkisinin %75’i oranında doğal taşınım etkilerinin de görüldüğü söylenebilir.



Şekil 4.34. 1,90 mm çaplı kanalda, farklı akışkanlar için destekleyen ve karşıt akış durumlarında Ω ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi



Şekil 4.35. 1,50 mm çaplı kanalda, farklı akışkanlar için destekleyen ve karşıt akış durumlarında Ω ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi



Şekil 4.36. 1,20 mm çaplı kanalda, farklı akışkanlar için destekleyen ve karşıt akış durumlarında Ω ifadesinin Reynolds sayısı ile ilişkisi

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada 1,90 mm, 1,50 mm ve 1,20 mm çapa sahip minikanallar ile hazırlanmış test bölgesinde destekleyen ve karşıt akış durumları için karma taşınım ile ısı transferi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde Reynolds sayısı 20-60 değerleri arasında tutulmuştur. İş akışkanı olarak saf su ve su bazlı SiO₂ nanoakışkanı kullanılmıştır. Su bazlı SiO₂ nanoakışkanı %0,25 ve %0,75 olacak şekilde iki farklı hacimsel partikül oranı ile hazırlanarak incelenmiştir. Çalışma sonucu ulaşılan önemli sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

- 10 saat süre boyunca ultrasonik homojenizatörde homojenleştirme işlemi uygulanan nanoakışkanlarda çökme ve topaklanma gibi kararlılık problemleri görülmemiştir.
- Saf su ve farklı hacimsel partikül oranına sahip su bazlı SiO₂ nanoakışkanları için ısı iletkenlik ve dinamik viskozite ölçümleri yapılmıştır. Saf suya nanopartikül ilavesinin ısı iletkenliği arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca artan sıcaklıkla da ısı iletkenlik artışı görülmüştür. En yüksek ısı iletkenlik değerine (0,688 W/m²K) 60°C sıcaklıkta %0,75 hacimsel partikül oranı için ulaşılmıştır. Nanopartikül ilavesi ile viskozite artışı da belirlenmiştir. Viskozite değeri en yüksek %0,75 hacimsel oranlı SiO₂ nanoakışkanında 20°C’de $13,75 \times 10^{-4}$ kg/m.s olarak belirlenmiştir. Ayrıca artan sıcaklıkla beraber tüm akışkanlar için viskozite değerinde azalma belirlenmiştir.
- Saf su için ısı transferi bulguları literatürdeki modeller ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılan Brown-Thomas, Oliver ve McAdams modelleri ile elde edilen bulguların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Reynolds sayısının 40 değerini aşmasıyla sonuçların model verilerinin bir miktar üzerine çıktığı görülmektedir. Bu durum taşınım mekanizmasının zorlanmış şartlara yaklaşmasıyla açıklanabilir. Reynolds sayısı yükseldikçe bahsi geçen modeller güvenilirliğini yitirmektedir.
- Aynı kanal çapında ve sabit Reynolds sayısında hacimsel partikül oranındaki artış ile taşınım katsayısının arttığı görülmüştür. Nanoakışkan kullanımı ile taşınım katsayısında yani ısı transferinde gözlenen artış Brownian etkisi, nanopartiküllerin kümelenmesi, nanopartikül etrafına sıvı katmanlaşması, yakın alan radyasyonu ve balistik foton hareketi teorileri ile izah edilmektedir. Bu teorilerden en çok kabul göreni ve bizim tarafımızdan da desteklenen Brownian etkisidir. Akışkan içerisindeki partiküllerin rastlantısal hareketi olarak tanımlanan Brownian etkisi akış alanında

mikrotaşınım etkileri oluşturduğundan, taşınım ile ısı transferini artırır. Hacimsel konsantrasyonunun artması Brownian etkisine olumlu katkıda bulunmaktadır. Bu sebeple konsantrasyon arttıkça bu etki kuvvetlenmektedir.

- Herhangi bir Reynolds sayısı için kanal çapındaki artış ile taşınım katsayısında azalma gözlemlenmiştir. Kanal çapının taşınım katsayısı üzerindeki etkisi Reynolds sayısındaki artış ile daha baskın hale gelmiştir. Ayrıca tüm minikanallarda destekleyen akış durumunda, karşıt akışa kıyasla daha yüksek taşınım katsayısı değerleri saptanmıştır. Karşılaşılan bu durum doğal taşınım etkileri ile oluşan ikincil akışların bir sonucudur. Kaldırma kuvvetleri etkisi ile oluşan ikincil akışların yönü, destekleyen akışta tahrik yönü ile aynı olup ısı transferini arttırmaktadır. Karşıt akışta ise ikincil akışların tahrik yönü ile ters yönde olması ısı transferini destekleyen akışa oranla olumsuz etkileyecektir. Bu sebeple tüm durumlarda destekleyen akış koşullarında ısı transferi daha etkindir.
- Reynolds sayısı artışı ile tüm akışkanlarda, karşıt ve destekleyen akış koşulu farkstemeksizin Nusselt sayısının artmıştır. Tüm minikanal çapları göz önüne alındığında en yüksek Nusselt sayısı değerlerine, en yüksek hacimsel oran olan %0,75'lik SiO₂ nanoakışkanında ve destekleyen akış durumunda rastlanmıştır. En düşük Nusselt sayısı değerleri ise saf su ve karşıt akış durumunda elde edilmiştir. Saf su için destekleyen akış koşulunda, karşıt akış koşuluna kıyasla Nusselt sayısında 1,90 mm'lik minikanalda minimum %4 maksimum %14 Nusselt sayısı artışı gözlenmiştir. Bu artış 1,50 mm ve 1,20 mm'lik minikanallardaysa sırasıyla minimum %6 ve %4, maksimum %10 ve %13 olarak belirlenmiştir. %0,75'lik SiO₂ nanoakışkanı için ise destekleyen akış koşulunda, karşıt akış koşuluna kıyasla sırasıyla 1,90, 1,50 ve 1,20 mm'lik minikanallarda Nusselt sayılarında minimum %4, %5 ve %8, maksimum %13, %16 ve %18 artış saptanmıştır.
- Tüm akışkanlar için destekleyen ve karşıt akış durumlarında kanal çapı artışı Nusselt sayısında artışa neden olmuştur. Saf su için kanal çapındaki artışın Nusselt sayısı üzerindeki etkisinin %0,25 ve %0,75'lik nanoakışkanlara göre oldukça az olduğu gözlenmiştir. Hacimsel partikül oranındaki artışla kanal çapının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi de artmıştır. 1,90 mm çaplı minikanalda %0,25'lik nanoakışkanda saf suya göre, karşıt akışta %19-30 ve destekleyen akışta %21-34 oranında Nusselt sayısı artışı gözlenmiştir. Bu artış 1,50 mm çaplı minikanalda karşıt akışta %18-29 ve destekleyen akışta %15-32 iken, 1,20 mm çaplı minikanalda ise karşıt akış durumunda

%16-24, destekleyen akışta %18-25 olmuştur. %0,75'lik nanoakışkanda saf suya göre 1,90 mm çaplı minikanalda, karşıt akışta %32-63 ve destekleyen akışta %33-64 oranında Nusslet sayısı artışı gözlenmiştir. 1,50 mm çaplı minikanalda bu artış karşıt akışta %33-59 ve destekleyen akışta %28-61 iken, 1,20 mm çaplı minikanalda ise karşıt akış durumunda %25-48, destekleyen akışta %38-54 olmuştur

- Richardson sayısının 0,01 ile 10 arasında olduğu durumlarda doğal taşınım etkileri ihmal edilemez. Bu çalışmada Reynolds sayısı 20-60 aralığında tutularak tüm durumlarda ısı transfer mekanizmasının karma taşınım şartlarında kalması sağlanmıştır. $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinde $Ra^{1/4}$ terimi doğal taşınım etkilerini Nu_f terimiye zorlanmış taşınım etkilerini kapsamaktadır. Bu sebeple bu oranın artması doğal taşınım etkilerinin arttığını belirtmektedir. Yükselen Grashof sayısı değerleri ile kaldırma kuvvetlerinin etkileri artmış ve $Ra^{1/4}/Nu_f$ oranı da yükselmiştir. Hacimsel partikül oranı artışı herhangi bir Grashof sayısı değerinde $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesini yani karma taşınım etkinliğini bariz şekilde arttırmıştır. Nanoakışkan kullanımıyla yükselen bu karma taşınım etkinliği Brownian etkisi ve Termoferez fenomeniyle gerçekleşmiştir. Termoferez fenomeni sıcaklık gradyanının neden olduğu nanopartikül göçü olarak tanımlanmaktadır ve bu fenomen hacimsel partikül oranının artmasıyla kuvvetlenir. Termoferezin oluşması ve kuvvetlenmesi akış alanında termal sınır tabaka kalınlığında artışa sebep olup bu şekilde doğal taşınım etkinliğini de desteklemiştir. Herhangi bir Grashof sayısı için minikanal çapının azalmasının doğal taşınım etkinliğini arttığı görülmektedir. Çap azalmasıyla gerçekleşen bu artış saf su için daha kuvvetliyen, hacimsel partikül oranının artmasıyla bir miktar zayıflamıştır.
- Tüm deneysel sonuçlar saf zorlanmış taşınım (Ω) eğrileri ile %75 arttırımlı Ω eğrileri arasında kalmıştır. Sonuç olarak toplam ısı transferinde saf zorlanmış taşınımın %75'ine kadar ulaşabilen, ihmal edilemez doğal taşınım etkileri mevcuttur.

KAYNAKLAR

- Adham, A. M., Mohd-Ghazali, N., & Ahmad, R. (2013). Thermal and hydrodynamic analysis of microchannel heat sinks: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 614-622.
- 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.
- 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 TiO₂ 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., and Najafi, G. 2014b. Heat transfer and friction factor of water based TiO₂ and SiO₂ nanofluids under turbulent flow in a tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 59: 30–38. 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 SiO₂ nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51: 103–111. Elsevier.

- Bahiraie, M., & Majd, S. M. (2016). Prediction of entropy generation for nanofluid flow through a triangular minichannel using neural network. *Advanced Powder Technology*, 27(2), 673-683.
- 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.
- Baytaş, A. Cihat. (2015) *Taşınım ile Isı Geçişi*. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, Türkiye
- 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.
- Bhattacharya, P., Saha, S.K., Yadav, A., Phelan, P.E., Prasher, R.S., 2004. Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 95(11), 6492-6494.
- Boennemann H., Botha S.S., Bladergroen B., Linkov V.M., 2005. Monodisperse copper- and silver-nanocolloids suitable for heat-conductive fluids, *Appl. Organomet. Chem.* 19, 768-773.
- 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.
- 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.
- Buongiorno, J., Venerus, D.C., Prabhat, N., McKrell, T., Townsend, J., Christianson, R., Tolmachev, Y. V, Koblinski, 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.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Heat and mass transfer (a practical approach, SI version)*.
- 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, 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.
- 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.
- Choi US. 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, ASME
- Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E., & Grulke, E. A. (2001). Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Applied physics letters*, 79(14), 2252-2254.
- 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 (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*, 87(15): 153107. AIP.
- Chong, D., Liu, J., Yan, J., 2007. Experimental investigation of mixed convection in a rectangular duct with a heated plate in the middle of cross section. *Heat Mass Transfer*, 43, 1283-1291.
- 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.
- Comaklı, O., Yılmaz, M., Bedir, O., Sahin, B., 2007. Isı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi. *Mühendis ve Makina* 48(565).
- 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.
- Çengel, Y. A., Tanyıldızı, V., & Dağtekin, İ. (2011). Isı ve kütle transferi. *Güven Kitabevi*.
- 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., Wongwises, S., 2007. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 797-817.
- De Bruijn, H. 1942. The viscosity of suspensions of spherical particles.(The fundamental η -c and ϕ relations). *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, 61(12): 863–874. Wiley Online Library.

- Depew, C.A., August, S.E., 1971. Heat transfer due to combined free and forced convection in horizontal and isothermal tube. *Journal of Heat Transfer*, 93, 380-384
- Dilek, E.F., 2008. Nanoakışkanların hazırlanması ve ısı iletkenliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Erzurum.
- Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams, R.A., 2006. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 240-50.
- Dixit, T., & Ghosh, I. (2015). Review of micro-and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1298-1311.
- 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. 2010. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-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.
- Egan, V., Dalton, T., Davies, M. R., & Whelan, M. (2005, January). Experimental Investigations Into Mixed Convection About a Horizontal Cylinder: Part A—Heat Transfer Using Digital Speckle Pattern Interferometry. In *ASME 2005 Summer Heat Transfer Conference collocated with the ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems* (pp. 87-98). American Society of Mechanical Engineers.
- Einstein, A., 1906. Eine neue Bestimmung der Molekül dimensionen. *Ann Physik*, 324, 289- 306.
- 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.

- 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 Koblinski, 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., Koblinski, 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. FED, 231, 99–103.
- Feng, Y., Yu, B., Xu, P., 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), 3164-3171.
- 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*, 65: 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.
- Geiger, G.H., Poirier, D.R., 1973. *Transport phenomena in metallurgy*. Addison - Wesley Company, Reading (Massachusetts).
- 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).
- Graham, A.L. 1981. On the viscosity of suspensions of solid spheres. *Applied Scientific Research*, 37(3–4): 275–286. Springer.
- Gravndyan, Q., Akbari, O. A., Toghraie, D., Marzban, A., Mashayekhi, R., Karimi, R., & Pourfattah, F. (2017). The effect of aspect ratios of rib on the heat transfer and laminar water/TiO₂ nanofluid flow in a two-dimensional rectangular microchannel. *Journal of Molecular Liquids*, 236, 254-265.
- 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.
- Habchi, S., & Acharya, S. (1986). Laminar mixed convection in a symmetrically or asymmetrically heated vertical channel. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 9(5), 605-618.
- Hadadian, M., Samiee, S., Ahmadzadeh, H., & Goharshadi, E. K. (2013). Nanofluids for heat transfer enhancement—a review. *Physical chemistry research*, 1(1), 1-33.

- 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.
- Hamilton, R.L., Crosser, O.K., 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1, 187-91.
- 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 TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International journal of heat and mass transfer*, 50(11–12): 2272–2281. Elsevier.
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., and Lu, H. 2007. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International journal of heat and mass transfer*, 50(11–12): 2272–2281. Elsevier.
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., and Lu, H. 2007. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ 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 Al₂O₃/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., & Chen, W. C. (2013). An experimental study on thermal performance of Al₂O₃/water nanofluid in a minichannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 516-522.
- 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 Al₂O₃/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.
- Hwang Y., Lee J.K., Lee C.H., Jung Y.M., Cheong S.I., Lee C.G., Ku B.C., Jang S.P., 2007. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids, *Thermochim. Acta* 455, 70-74.

- Hwang, K.S., Jang, S.P., and Choi, S.U.S. 2009. Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ 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.
- 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.
- Ijam, A., Saidur, R., & Ganesan, P. (2012). Cooling of minichannel heat sink using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(8), 1188-1194.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 2010. *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri 4. Basım'dan Çeviri*.
- 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.
- 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.
- 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. G. (2002). Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(2-4), 389-407.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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, 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 Al₂O₃ nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(11–12): 2651–2656. 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, 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., & Xi, S. (2009). A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder technology*, 196(2), 89-101.
- 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.
- Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye.
- 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., Barbati, 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. 2013. Influence of particle concentration and temperature on thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/R141b nanorefrigerant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 43: 100–104. Elsevier.
- Manay, E., 2014. Mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Erzurum.
- Mariano, A., Pastoriza-Gallego, M.J., Lugo, L., Mussari, L., and Piñeiro, M.M. 2015. Co₃O₄ 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.
- Mass Transfer, 39, 775-784.
- Masuda, H., Ebata, A., and Teramae, K. 1993. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles. *Netsu Bussei*.
- Maxwell, J.C. 1881. A treatise on electricity and magnetism. Clarendon press.

- Mehendale, S. S., Jacobi, A. M., & Shah, R. K. (2000). Fluid flow and heat transfer at micro-and meso-scales with application to heat exchanger design. *Applied Mechanics Reviews*, 53(7), 175-193.
- 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.
- 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 TiO₂—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.
- 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 Al₂O₃–water nanofluid for an electronic liquid cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 27(8–9): 1501–1506. Elsevier.
- Nie, C., Marlow, W., Hassan, Y., 2008. Discussion of proposed mechanisms of thermal conductivity enhancement in nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(5-6), 1342-1348.
- 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.
- Ozsunar, A., Baskaya, S., & Sivrioglu, M. (2002). Experimental investigation of mixed convection heat transfer in a horizontal and inclined rectangular channel. *Heat and mass transfer*, 38(3), 271-278.
- Özerinç, S., 2010. Heat transfer enhancement with nanofluids. Master Thesis, Middle East Technical University School of Natural and Applied Sciences, Mechanical Engineering Department, Ankara.
- 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., Cho, Y.I., 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11, 151-70.
- Pang, C., Jung, J.-Y., Lee, J.W., and Kang, Y.T. 2012. Thermal conductivity measurement of methanol-based nanofluids with Al₂O₃ and SiO₂ nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21–22): 5597–5602. 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.
- 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., 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.
- Peimyoo, N., Shang, J., Yang, W., Wang, Y., Cong, C., and Yu, T. 2015. Thermal conductivity determination of suspended mono-and bilayer WS₂ 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., Phelan, P.E., 2005. Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluids). *Physical Review Letters*, 94(2), 025901.
- 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., Das S.K. 2003. Natural convection of nano-fluids, *Heat and Mass Transfer*, 39, 1033-1042.
- Ray, D. R., Das, D. K., & Vajjha, R. S. (2014). Experimental and numerical investigations of nanofluids performance in a compact minichannel plate heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 732-746.
- Romano, J.M., Parker, J.C., Ford, Q.B., 1997. Application opportunities for nanoparticles made from the condensation of physical vapors. *International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Chicago, 2, 12-13.
- Sahin, B., Comaklı, K., Comaklı, O., Yılmaz, M., 2006. Nanoakışkanlarla ısı transferinin iyileştirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 47(559), 29-34.
- Serebryakova, M.A., Dimov, S. V, Bardakhanov, S.P., and Novopashin, S.A. 2015. Thermal conductivity, viscosity and rheology of a suspension based on Al₂O₃ nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 118, 044301. AIP.

- nanoparticles and mixture of 90% ethylene glycol and 10% water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83: 187–191. Elsevier.
- Shannon, R.L., Depew, C.A., 1969. Forced laminar flow convection in a horizontal tube with variable viscosity and free-convection effects. *Journal of Heat Transfer*, 91, 251-258.
- Sheikhrobat, A. A., Shirvan, K. M., Mirzakhani, S., & Behzadi, T. (2015). Investigation of adding Cu particles to base fluid on mixed convection heat transfer in a ventilated square cavity. *Procedia Engineering*, 127, 33-39.
- 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.
- Shokouhmand, H., & Jafari, A. (2010). Investigation of mixed convection in a vertical microchannel affected by EDL. In *Proceedings of the World Congress on Engineering (Vol. 2)*.
- 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.
- Speight, J.G. 2005. *Lange's handbook of chemistry*. McGraw-Hill New York.
- 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., & Maldonado-Cortés, D. (2016). 2D-based nanofluids: Materials evaluation and performance. *Two-dimensional Materials—Synthesis, Characterization and Potential Applications*, InTech, 153-198.
- Tavman, I., Turgut, A., Chirtoc, M., Hadjov, K., Fudym, O., Tavman, S., 2010. Experimental study on thermal conductivity and viscosity of water-based nanofluids. *Heat Transfer Research*, 41, 339-51.
- Tawfik, M. M. (2017). Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239-1253.
- 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., Hill, J.M., 2007, Determination of nanolayer thickness for a nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(4), 399-407.

- 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.
- Tseng, W.J., and Lin, K.-C. 2003. Rheology and colloidal structure of aqueous TiO₂ nanoparticle suspensions. *Materials science and engineering: A*, 355(1–2): 186–192. Elsevier.
- 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.
- Wang X., Mujumdar A.S., 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 1–19.
- 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., 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, 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 3ω 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.
- 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.

- Wu, H.W., 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, 1217-1235.
- 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.
- 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., Li, Q., (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of heat and fluid flow*, 21(1), 58-64.
- 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.U.S., 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.
- 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.

- 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, 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., 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), 167- 171.
- 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. 2010. Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe₃O₄ nanofluids prepared via phase-transfer method. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 355(1–3): 109–113. 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 Fe₃O₄ aqueous nanofluids. *Applied Physics Letters*, 89(2): 23123. AIP.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Resul Önder TEMİZ
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 06.07.1991 Ordu
Medeni Hali : Bekar
Telefon : -
e-mail : resulondertemiz@gmail.com

Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2019
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2016
Lise	Ordu Anadolu Lisesi	2009

Yayınlar (SCI, SCI-Expanded)

Manay, E., Mandev, E., & Temiz, R. O. (2019). Analysis of mixed convection heat transfer of nanofluids in a minichannel for aiding and opposing flow conditions. Heat and Mass Transfer, 1-13.