



**ÇOKLU MİKROKANALLARDA  
NANOAKIŞKANLARIN KARMA TAŞINIM  
ISIL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**Rahim Aytuğ ÖZER**

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

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÇOKLU MİROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA  
TAŞINIM ISIL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**Rahim Aytuğ ÖZER**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2018**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**ÇOKLU MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA TAŞINIM  
ISIL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Bayram ŞAHİN'in danışmanlığında Rahim Aytuğ ÖZER tarafından hazırlanan bu çalışma 03/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı – Enerji Bilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Kadir BAKIRCI

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Eyüphan MANAY

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 18/01/2018 tarih ve 3/41 nolu kararı ile onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Cavit KAZAZ**  
Enstitü Müdürü

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

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ÇOKLU MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA TAŞINIM ISIL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Rahim Aytuğ ÖZER

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

Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak cihazlar daha küçük boyutlarda üretilebilmekte, boyutlardaki küçülmeyle birlikte performanslarında artış da sağlanabilmektedir. Bununla beraber, boyutları küçültülmüş cihazlar endüstrinin çeşitli alanlarına entegre edilmeye başlanmıştır. Boyutların küçültülmenin bir sonucu olarak cihazların çalışması sırasında açığa çıkan ısı enerjisi artmakta, bu durum ısı enerjisinin daha etkin bir biçimde uzaklaştırılmasını gerektirmektedir. Son yıllarda araştırmacılar boyutlardaki küçülmeyle birlikte artan ısı yüklerinin efektif bir biçimde sistemden uzaklaştırılması üzerine yoğunlaşmışlardır. Mikrokanallar yüksek yüzey alanı/hacim oranları, düşük akışkan miktarı, az yer kaplamalarından dolayı yüksek ısı akısı şartlarında ısı transfer edilmesinde araştırmacıların en önemli alternatiflerinden biri haline gelmiştir. Isı transfer miktarını artırmanın başka bir yolu ise iş akışkanın termofiziksel özelliklerini iyileştirmektir. Bu tez çalışmasında, farklı kanal genişliğine (400µm ve 500µm) sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallar kullanılarak oluşturulan çoklu mikrokanallı ısı alıcılarda SiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanının laminar akışta karma taşınım karakteristikleri üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İş akışkanı olarak SiO<sub>2</sub>-Su nanoakışkanı farklı hacimsel konsantrasyonlarda (%0,25 ve %0,5) kullanılmıştır.

**2018, 126 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Mikrokanal, Nanoakışkan, Karma taşınım

## ABSTRACT

Master Thesis

### INVESTIGATION OF THERMAL PERFORMANCE OF NANOFLUIDS BY MIXED CONVECTION IN MULTIPLE MICROCHANNELS

Rahim Aytuğ ÖZER

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

Supervisor: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

As a result of the technological improvements, devices could be manufactured in smaller dimensions, also an increase in their thermal performance can be provided by reduced dimensions. In addition to this, devices manufactured in smaller dimensions have begun to be integrated into various areas of the industry. By reducing the dimensions, heat energy existing during the working period increases, this case requires more effective heat energy removal. In recent years, researchers have focused on the effective removal ways of increasing heat energy loads by reducing dimensions. Microchannels have become one of the most important alternative of researchers on heat transfer under high heat flux conditions due to their high surface area/volume ratio, less working fluid demand and taking up little space. Another way to increase heat transfer rate is the improvement of thermophysical properties of working fluid. In this method, generally, nano particles with higher thermal conductivity than that of the base liquid are homogeneously suspended into the base liquid. Thus, thermophysical properties of the base liquid is enhanced. In this thesis study, effect of SiO<sub>2</sub>-water nanofluids on laminar mixed convection heat transfer in heat sinks having multiple microchannels with rectangular cross-sections in different channel widths (400µm - 500µm) have been investigated. SiO<sub>2</sub>-water nanofluids with two different particle volume fractions (0,25% and 0,5%) has been used as working fluid.

**2018, 126 pages**

**Keywords:** Microchannel, Nanofluids, Mixed convection

## TEŞEKKÜR

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

Çalışmalarım esnasında fikir ve düşüncelerini esirgemeyen çok sevgili ekip arkadaşlarım Sayın Öğr. Gör. Kadir GELİŞ'e, Sayın Arş. Gör. Murat CEYLAN'a ve Atatürk Üniversitesi Enerji Laboratuvarı ekibine destek ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında bana maddi ve manevi destek olan çok değerli abim Abdulkerim ÖZER'e, sevgi ve desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve de duaları ile yanımda olan kıymetli büyüklerime şükranlarımı sunarım. Ayrıca, kıymetli dostum Abdullah LALOĞLU kardeşime desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

**Rahim Aytuğ ÖZER**

**Ocak, 2018**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Elektronik Soğutma Mekanizmaları.....	3
1.1.1. İletimle soğutma .....	4
1.1.2. Doğal taşınım ve radyasyon hava soğutma .....	4
1.1.3. Zorlanmış taşınım hava soğutma .....	6
1.1.4. Karma taşınım .....	7
1.1.5. Sıvı soğutma .....	8
1.1.6. İmmersiyon (daldırmalı) soğutma .....	8
1.2. Mikrokanal Nedir? .....	9
1.2.1. Mikrokanalların elektronik soğutmada önemi .....	11
1.3. Nanoakışkanlar .....	11
1.3.1. Nanoakışkan türleri .....	13
1.3.2. Nanoakışkanların hazırlanması .....	13
1.3.2. Yüzey aktif maddeler .....	14
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>15</b>
2.1. Nanoakışkan Literatür Özetleri .....	15
2.1.1. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri .....	15
2.1.1.a. Isıl iletkenlik .....	15
2.1.1.b. Viskozite.....	30
2.1.2. Isıl iletkenlik ve viskozite çalışmaları .....	36
2.2. Mikrokanal Literatür Özetleri .....	40
2.1.3. Nanoakışkan kullanılan mikrokanallarda literatür çalışmaları.....	46
2.1.4. Karma taşınım literatür çalışmaları .....	51

<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>57</b>
3.1. Deney Düzeneginin Tanitilmasi.....	57
3.1.1. Termoelemanlar.....	61
3.1.2. Pompa.....	65
3.1.3. Sirkulatörlü su banyosu.....	65
3.1.4. Debimetre.....	66
3.1.5. Basinç trasndüseri.....	67
3.1.6. İş akışkanı besleme haznesi.....	68
3.1.7. Hassas terazi.....	69
3.1.8. Ultrasonik homojenizatör.....	70
3.1.9. Viskozimetre.....	71
3.1.10. Isıl iletkenlik ölçer.....	72
3.1.11. Güç kaynağı.....	73
3.1.12. Data kartı.....	74
3.2. Hesaplamalar ve Verilerin Değerlendirilmesi.....	75
3.2.1. Nanoakışkan hazırlanmasında kullanılan hesaplamalar.....	75
3.2.1.a. Nanoakışkan termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi.....	76
3.2.2. Isı transferi hesaplamaları.....	81
3.2.3. Belirsizlik analizi.....	84
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI</b> .....	<b>86</b>
4.1. Isı Transferi Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması.....	86
4.2. Karma Taşınım Verilerinin Değerlendirilmesi.....	88
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER</b> .....	<b>109</b>
KAYNAKLAR.....	112
ÖZGEÇMİŞ.....	127



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$\mu$	Dinamik viskozite (kg/m.s)
A	Yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
C <sub>m</sub>	Kütlesel oran
C <sub>v</sub>	Hacimsel oran
D <sub>h</sub>	Hidrolik çap (m)
I	Akım (A)
k	Isıl iletkenlik (W/mK)
m	kütle (kg)
Q	Isı miktarı (W)
R	İletken tel direnci (Ω)
T	Sıcaklık (K)
T <sub>ort</sub>	Ortam sıcaklığı (K)
U	Ortalama hız (m/s)
V	Hacim (m <sup>3</sup> )
$\nu$	Kinematik viskozite (m <sup>2</sup> /s)
x	Bağımsız değişken (m)
$\epsilon$	Yüzey yayıcılığı
$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	Stefan-Boltzmann sabiti
$\varphi$	Hacimsel konsantrasyon
$\Phi$	Doğal taşınım parametresi
$\phi$	Hacimsel partikül oranı
$\Omega$	Zorlanmış taşınım parametresi

## Alt indisler

$\infty$	ortam
bulk	Bulk sıcaklıkta
ç	çıkış
duvar	Yüzey sıcaklığında
g	giriş
l	temel akışkan
n	nanoakışkan
ort	Ortalama
p	partikül
s	yüzey

## Kısaltmalar

CNT	Karbon nano tüp
EG	Etilen glikol
Gr	Grashof sayısı
Gz	Graetz sayısı
MEMS	Mikro elektro-mekanik sistemler
Nu	Nusselt sayısı
PG	Polietilen glikol
Ra	Rayleigh sayısı
Re	Reynolds sayısı
Ri	Richardson sayısı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. 1946 yılında yapılan ENIAC bilgisayar .....	2
Şekil 1.2. Çip sayısının yıllara göre artışı .....	3
Şekil 1.3. Elektronik bileşenin doğal taşınım ile soğutulması .....	5
Şekil 1.4. İndirekt Sıvı Soğutma Şematik Gösterimi .....	8
Şekil 1.5. Daldırma (immersion) soğutma sistemi (Çengel and Ghajar 2015).....	9
Şekil 1.6. Nanopartiküllerin mikropartiküller ile karşılaştırılması .....	12
Şekil 2.1. Farklı nanoakışkanların efektif ısıl iletkenliğinin hacimsel partikül oranıyla değişimi .....	17
Şekil 2.2. Mikrokanal SEM görüntüleri.....	42
Şekil 2.3. a)Mikro kanal soğutucu şekli b) dikdörtgensel kesitli mikro kanal c) altıgen kesitli mikro kanal d) üçgensel kesitli mikro kanal e) dairesel kesitli mikrokanal.....	45
Şekil 3.1. Deney düzeneği genel görünüşü.....	57
Şekil 3.2. $b=400 \mu\text{m}$ genişliğindeki mikro kanal şematığı .....	59
Şekil 3.3. $b=500 \mu\text{m}$ genişliğindeki mikro kanal şematığı .....	59
Şekil 3.4. Mikro kanal test bölgesi detay resmi .....	60
Şekil 3.5. Termoelemanlar için kalibrasyon deklemleri .....	62
Şekil 3.6. Pompa .....	65
Şekil 3.7. Su banyosu.....	66
Şekil 3.8. Debimetre .....	67
Şekil 3.9. Basınç transdüseri.....	68
Şekil 3.10. Besleme suyu haznesi .....	69
Şekil 3.11. Hassas terazi .....	70
Şekil 3.12. Ultrasonik homojenizatör .....	71
Şekil 3.13. Viskozite .....	72
Şekil 3.14. Isıl iletkenlik ölçer .....	73
Şekil 3.15. Güç kaynağı.....	73
Şekil 3.16. Veri toplayıcı .....	74
Şekil 3.17. Isıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.....	78

<b>Şekil 3.18.</b> Farklı sıcaklıklar için ısıl iletkenliğin partikül oranı ile değişimi.....	78
<b>Şekil 3.19.</b> Viskozitenin sıcaklıkla değişimi.....	80
<b>Şekil 3.20.</b> Partikül oranının farklı sıcaklıklardaki viskozite değişimi.....	81
<b>Şekil 4.1.</b> 500µm kanal genişliğinde saf su ısı transfer sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması .....	87
<b>Şekil 4.2.</b> 400µm kanal genişliğinde saf su ısı transfer sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması .....	87
<b>Şekil 4.3.</b> Farklı akışkanlar için 500 µm kanal genişliğinde taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	89
<b>Şekil 4.4.</b> Farklı akışkanlar için 400 µm kanal genişliğinde taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	89
<b>Şekil 4.5.</b> Farklı kanal genişliklerinde Saf su için ısı taşınım katsayısının Re sayısı ile değişimi .....	91
<b>Şekil 4.6.</b> Farklı kanal genişliklerinde %0,25 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Re sayısı ile değişimi.....	91
<b>Şekil 4.7.</b> Farklı kanal genişliklerinde %0,5 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Re sayısı ile değişimi .....	92
<b>Şekil 4.8.</b> 500µm kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için Nusselt sayısının değişimi .....	93
<b>Şekil 4.9.</b> 400µm kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için Nusselt sayısının değişimi .....	93
<b>Şekil 4.10.</b> Farklı kanal genişliğinde saf su için Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi .....	94
<b>Şekil 4.11.</b> Farklı kanal genişliğinde hacimsel %0,25 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi.....	95
<b>Şekil 4.12.</b> Farklı kanal genişliğinde %0,5 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi.....	95
<b>Şekil 4.13.</b> 500µm kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	96
<b>Şekil 4.14.</b> 400µm kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	97

<b>Şekil 4.15.</b> Farklı kanal genişliğinde saf su için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	97
<b>Şekil 4.16.</b> Farklı kanal genişliğinde %0,25 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	98
<b>Şekil 4.17.</b> Farklı kanal genişliğinde %0,5 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi .....	98
<b>Şekil 4.18.</b> 500µm kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi .....	100
<b>Şekil 4.19.</b> 400µm kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi .....	100
<b>Şekil 4.20.</b> Saf su için farklı kanal genişliklerinde $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi .....	101
<b>Şekil 4.21.</b> %0.25 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi .....	101
<b>Şekil 4.22.</b> %0.5 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi .....	102
<b>Şekil 4.23.</b> 500µm kanal genişliğinde farklı akışkanlar için $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin değişimi .....	103
<b>Şekil 4.24.</b> 400µm kanal genişliğinde farklı akışkanlar için $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin değişimi .....	103
<b>Şekil 4.25.</b> Saf su için farklı kanal genişliklerinde $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi .....	104
<b>Şekil 4.26.</b> %0.25 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi .....	104
<b>Şekil 4.27.</b> %0.5 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi .....	105
<b>Şekil 4.28.</b> Saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde $\Phi/Gz$ ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi .....	106
<b>Şekil 4.29.</b> %0,25 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde $\Phi/Gz$ ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi .....	107
<b>Şekil 4.30.</b> %0,5 SiO <sub>2</sub> -saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde $\Phi/Gz$ ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi .....	107

## ÇİZELGELER DİZİNİ

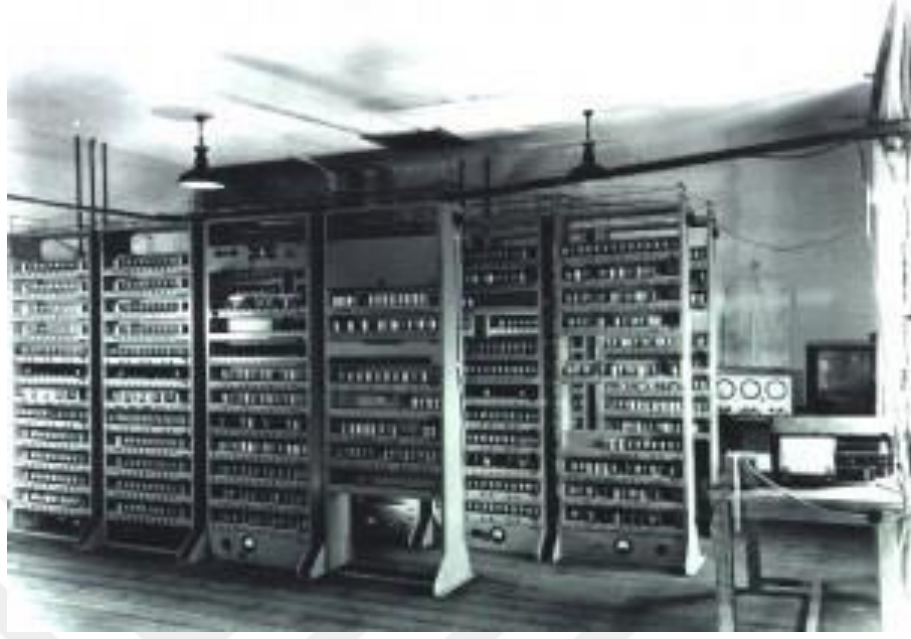
Çizelge 1.1. Kanalların boyutlarına göre sınıflandırılması .....	10
Çizelge 2.1. Bazı katı sıvı malzemeler için ısı iletkenlik değerleri .....	16
Çizelge 2.2. Isıl iletkenliği değiştiren parametreler için literatür özeti.....	21
Çizelge 2.3. İletkenlik modelleri.....	29
Çizelge 2.4. Nanoakışkan viskozitesindeki artış için literatür çalışma özetleri.....	32
Çizelge 2.5. Viskozite için klasik modeller .....	34
Çizelge 2.6. Viskozite için sayısal modeller .....	34
Çizelge 2.7. Nanoakışkan kullanılan soğutma sistemleri için deneysel çalışma özetleri.....	37
Çizelge 2.8. Sayısal çalışma özetleri.....	39
Çizelge 2.9. Yuvarlatılmış dikdörtgenel mikrokanalların geometrik parametre değerleri.....	43
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan mikrokanal boyutları.....	60
Çizelge 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan konsantrasyonlar için kütle hesapları.....	76
Çizelge 3.3. Silisyum dioksit nanopartiküllerinin özellikleri .....	77
Çizelge 3.4. Belirsizlik değerleri .....	85

## 1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde elektronik sistemleri hemen hemen bütün uygulamalarda görebilmekteyiz. 17. yüzyıla dayanan elektriğin keşfi, Alessandro Volta'nın ilk pili üretmesi ve Michael Faraday tarafından elektrik dinamosunun icadı ile elektrik üretilebilirliği sağlanabilmiştir. Bu gelişmelerden sonra elektrik enerjisi ile çalıştırılan elektronik ekipmanların kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Elektronik ekipmanları bilgisayarlar, radyolar, televizyonlar, küçük ev aletleri, radarlar, cep telefonları gibi sistemlerde tekil kullanımlarından ziyade bir sistem içerisinde entegre edilerek kullanımlarının bir çok örneğini görebilmekteyiz.

Elektronik ekipmanların çalıştırılabilmesi için doğal olarak üzerlerinden bir elektrik akımı geçmelidir. Yine doğaldır ki üzerinden elektrik akımı geçirilen bir tel  $I^2R$  kadarlık bir ısı üretimine sebep olur. Açığa çıkan bu ısı belli değerleri aştığı zaman elektronik ekipmanın çalışmasını sekteye uğratabilir ve hatta elektronik ekipmanın bozulmasına sebep olabilir (Yin *et al.* 2016). Bu cihazların küçük sıcaklık değişimlerinde kararlılıklarını sürdürdükleri düşünüldüğü zaman ortaya çıkan bu ısı sistemlerin düzenli çalışabilmesi açısından büyük bir problem teşkil etmektedir.

1883 yılında Thomas Edison tarafından icat edilen vakum tüpleri 1950'lere kadar çeşitli elektronik cihazların geliştirilmesinde kullanıldı. Bu çağdaki geliştirilmiş bilgisayarlardan en büyüğü ve en bilineni 1946 yılında Pensilvanya Üniversite'sinde yapılan 30 ton ağırlığındaki ENIAC'dır (Electronic Numerical Integrator and Computer). Bu bilgisayarda yaklaşık 18.000 den fazla vakum tüpü kullanılmıştır ve 7 m  $\times$  14 m boyutlarındadır. Çok fazla güç harcamakla birlikte vakum tüplerinin hata oranının yüksek olmasından dolayı güvenilirliği oldukça düşüktü.

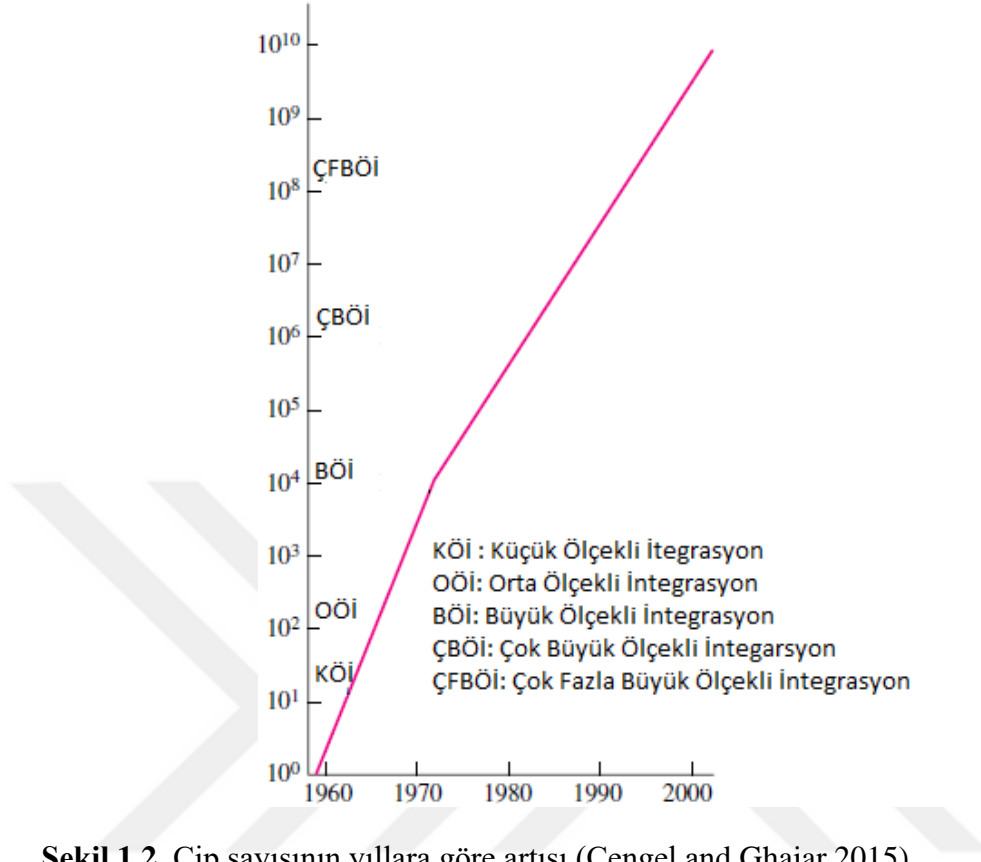


**Şekil 1.1.** 1946 yılında yapılan ENIAC bilgisayar (Anonim 2017)

Vakum tüplerinin çok fazla güç harcamasından dolayı bunun yerine geçebilecek donanım arayışı başlamıştır. Nihayetinde 1948 yılında transistörlerin icadı ile yeni bir dönem başlamıştır. Transistörler, vakum tüpleriyle kıyaslandığı zaman daha doğru ve güvenilir işlem yapabilme kapasitelerinin yanı sıra tükettikleri güç bakımından da vakum tüplerini geride bırakmışlardır.

Elektronikte bir sonraki dönüm noktası, 1959'da diyotlar, transistörler, dirençler ve kondansatörler gibi çeşitli bileşenlerin tek bir çip de toplandığı entegre devrelerle birlikte ortaya çıktı. Sistem güvenilirliği ve işlem kapasitelerini artırabilmek için bir paket içerisinde kullanılan çip sayısının da artması gerekmektedir. Şekil 1.2'de paket sistemlerde çip sayısının artışının yıllara göre değişimi gösterilmiştir.





Şekil 1.2. Çip sayısının yıllara göre artışı (Çengel and Ghajar 2015)

Çip sayısında meydana gelen bu denli artış üretilen ısının da artması demektir. Sistemden daha güvenilir sonuçlar alabilmek için çalışmalar ortaya çıkan ısının ortamdan en etkili şekilde uzaklaştırılmasına yoğunlaştırılmıştır. Bu anlamda uygun çalışma ortamını hazırlamak için çeşitli soğutma yöntemleri geliştirilmiştir.

### 1.1. Elektronik Soğutma Mekanizmaları

Elektronik ekipmanların soğutma mekanizmaları, üretilen ısının miktarına, güvenilirlik gereksinimlerine, çevresel koşullara ve maliyete bağlıdır. Düşük maliyetli elektronik cihazlar için yüksek maliyetli bir soğutma mekanizması kullanmaya gerek yoktur. Bu yüzden düşük maliyetli elektronik cihazların soğutulmasında soğutma ortamı olarak hava ile doğal veya zorlanmış konveksiyon gibi ucuz soğutma mekanizmaları yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, yüksek maliyetli, yüksek performanslı elektronik ekipmanların pahalı ve karmaşık soğutma tekniklerine başvurulması gereklidir.

### 1.1.1. İletimle soğutma

İletimle soğutma; toplu sıvı hareketinin olmadığı moleküler etkileşimler yoluyla ısının sıcak ortamdan soğuk ortama difüze olması ile gerçekleşir. Katı ortamda, bileşen içindeki iki nokta arasındaki ısı geçişi moleküllerin titreşimi ile gerçekleşir. Sıvı ve gaz ortamlarda bu geçiş molekül hareketi ile meydana gelir. Belirli mesafedeki noktalar arasında gerçekleşen ısı transferi Fourier ısı transfer yasası olarak bilinen Eşitlik 1.1 uyarınca gerçekleşir.

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

Fourier yasasına göre ısı transfer miktarı, elektronik ekipmanın üretildiği malzemenin ısı iletkenlik katsayısı, ısı transfer yüzey alanı, noktalar arasındaki sıcaklık farkı ve ısı geçişinin sağlandığı mesafeye bağlı olarak değişmektedir (Çengel 2010).

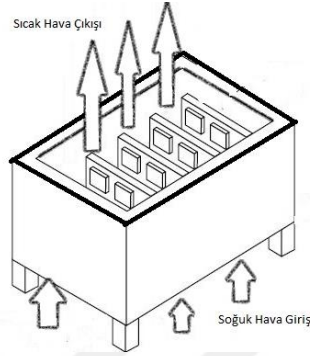
### 1.1.2. Doğal taşınım ve radyasyon hava soğutma

Doğal taşınım, düşük maliyeti ve yüksek ısı transfer kapasiteleri sebebiyle basit elektronik cihazların soğutulmasında kullanılan bir soğutma yöntemidir. Isınan havanın hacminin artması ile yoğunluğu azalır. Yoğunluğu azalan hava, sıcaklık farkından dolayı daha yoğun havaya göre yukarıya doğru meyli artar. Bu durum akışkan içinde doğal bir hareketlenmeye ve çalkantıya sebebiyet verir. Akışkan molekülleri arasındaki sıcaklık farkı bu hareketliliği devamlı kılar ve bu şekilde ısı, sıcak olan molekülden soğuk olan moleküle aktarılarak soğutulacak ekipmandan uzaklaştırılır.

Newton soğutma yasası taşınım ile transfer edilen ısının miktarını ifade etmektedir. Soğutma yasasına göre ısı transferi, akışkana temas eden yüzey alanı ( $A_s$ ), taşınım maruz kalan yüzey sıcaklığı ( $T_s$ ), yüzeyle etkileşimde bulunan akışkan sıcaklığına ( $T_\infty$ ) ve akışkanın ısı transfer katsayısına ( $h$ ) bağlıdır.

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

Denklem 1.2’de görüldüğü taşınım ile ısı transfer miktarı temelde akışkanın ısı transfer kapasitesini ifade eden ısı transfer katsayısı ve ısı transfer yüzey alanından önemli derecede etkilenir.



**Şekil 1.3.** Elektronik bileşenin doğal taşınım ile soğutulması (Çengel and Ghajar 2015)

Bir taşınım mekanizmasında doğal taşınımın etkinliğini değerlendirmek için Eşitlik 1.3 kullanılır.

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

Bu oranda  $Gr_L$ ; Grashof sayısı olarak isimlendirilen boyutsuz bir sayıdır. Grashof sayısı, akışkan üzerine etkiyen kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranının bir göstergesidir.  $Re_L$  ise bir akışkan parçacığı üzerine etkiyen atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlerine oranını belirten Reynolds sayısıdır. Eğer Eşitlik 1.3 sağlanırsa akışta zorlanmış taşınımın etkileri göz ardı edilebilir.

Radyasyon, atom ve moleküllerin elektronik düzeylerindeki değişimlerden kaynaklanan maddeden elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılan enerjidir. Diğer ısı transferi mekanizmalarından en önemli farkı radyasyonla (ışınım) ısı transferinde aracı bir ortamın olmamasıdır.

$$Q = \varepsilon\sigma AT_s^4 \quad (1.4)$$

$\sigma$ :  $5,67 \times 10^{-8}$  (Stefan-Boltzmann sabiti)

Işınım ile ısı transferi mekanizması Stefan-Boltzmann yasası ile ifade edilir. Stefan-Boltzmann yasasına göre ısı transferi hızı yüzeyin ya da maddenin yayıcılığına, yüzey alanına ve yüzey sıcaklığına bağlıdır.

### 1.1.3. Zorlanmış taşınım ile hava soğutma

Doğal taşınım ile soğutma; daha çok düşük güçlü elektroniklerin soğutulması için kullanılan düşük maliyetli bir soğutma sistemidir. Bu soğutma sistemlerinde soğutucu akışkan olarak genelde hava kullanılır. Havanın sistem içerisinde sirkülasyonu doğal yollarla sağlandığı için diğer soğutma sistemlerine göre daha ucuz bir sistemdir. Fakat bu sistemlerde soğutma kapasitesi sınırlıdır. Doğal konveksiyon soğutma sistemi soğutmada yeterli olmadığı zaman ısının uzaklaştırılmak istendiği yere bir fan yardımıyla hava cebri olarak üflenerek soğutma işlemi gerçekleştirilir. Bu soğutma sisteminde fan soğutucu akışkan olan havanın hızını artırır ve sistem içerisinde sirkülasyonunu sağlar. Sonuç olarak doğal taşınım soğutmasına göre daha verimlidir. Zorlanmış taşınım ile ısı transferinde Eşitlik 1.5’de ki koşul sağlandığı takdirde doğal taşınım etkileri göz ardı edilir.

$$\frac{Gr_L}{Re_L^2} \ll 1 \quad (1.5)$$

Zorlanmış taşınım için iki farklı akıştan bahsedilebilir. Bir yüzey üzerinde (levha, boru demetleri vb.) sınırlandırılmayan serbest bir akışkan hareketi varsa bu durum için “Dış Akış” tanımlaması yapılır. Akışkan hareketi yüzeyler tarafından sınırlandırılıyorsa (boru veya kanal içi akış gibi), bu durumda bir “İç Akış” söz konusudur.

#### 1.1.4. Karma taşınım

Zorlanmış taşınımında ısı transferi, iş akışkanın fan ve pompa gibi elemanlarla cebri olarak tahrik edilmesiyle gerçekleşirken, doğal taşınımında ise sıcaklık ve yoğunluk farkına bağlı olarak kaldırma kuvveti etkisiyle meydana gelir. Bu sebeple zorlanmış taşınımındaki akış hızları yüksek, doğal taşınımındaki akış hızları ise zorlanmış taşınımına göre hayli düşüktür (Incropera 2010)

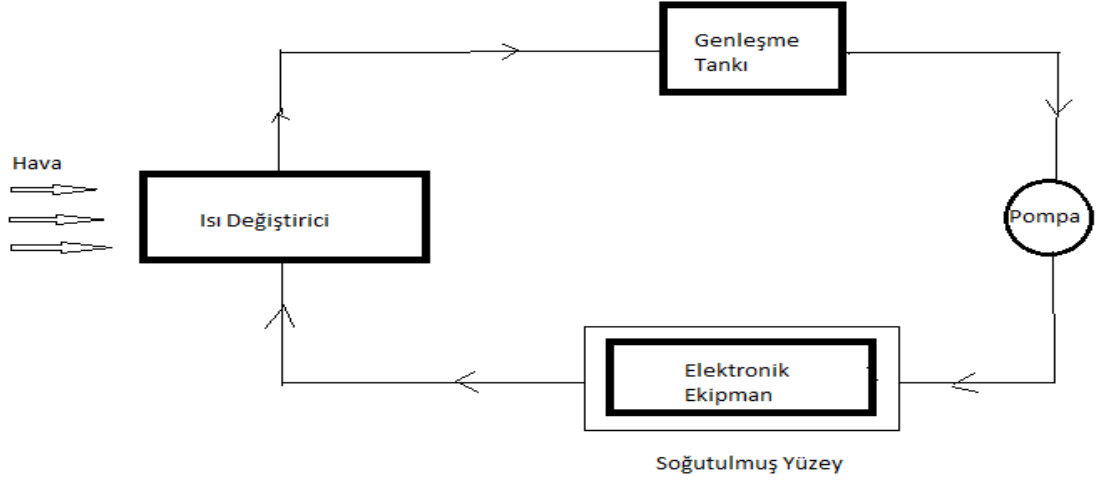
Taşınım ile ısı transferinde genellikle zorlanmış taşınımından söz edilirken, doğal taşınımın etkileri göz ardı edilir. Ancak özellikle düşük Reynolds sayılarında gerçekleştirilen uygulamalarda kararsız bir sıcaklık gradyanı varsa doğal taşınım etkileri ihmal edilemez seviyelere ulaşmaktadır. Taşınım ile ısı transferi mekanizmasında zorlanmış taşınım yanında ihmal edilemez seviyelerdeki doğal taşınımından söz edebilmek için Eşitlik 1.6 verilmiştir. Bu oranın sağlanması, taşınım mekanizmasında hem zorlanmış hem de doğal taşınım etkilerinin hesaba katılması gerektiği anlamına gelir.

$$0.01 < \frac{Gr_L}{Re_L^2} < 10 \quad (1.6)$$

Kaldırma kuvvetinin yönü ile akış yönü arasındaki fark zorlanmış akıştaki ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kaldırma kuvvetinin etkili olduğu, zorlanmış akışla ilgili detaylı incelenmiş üç özel durum vardır. Bunlar, aynı yönlü-destekleyen akış, karşı yönlü-engelleyen akış ve dik yönlü-çapraz hareket durumlarıdır. Örnek vermek gerekirse, ısıtılmış dikey bir levha üzerinde yukarı ve aşağı doğru zorlanmış akışlar, sırasıyla destekleyen akış ve engelleyen akış durumlarıyla eşleşir. Çapraz akış için ise ısıtılmış bir silindir, küre veya yatay bir levha üzerindeki yatay akış örnek gösterilebilir. Destekleyici ve çapraz akışlarda kaldırma kuvveti, sadece zorlanmış taşınım olması durumundaki ısı geçişini artırıcı etkiye sahiptir. Karşı akışlarda ise ısı transferini azaltıcı yönde etki gösterir.

### 1.1.5. Sıvı soğutma

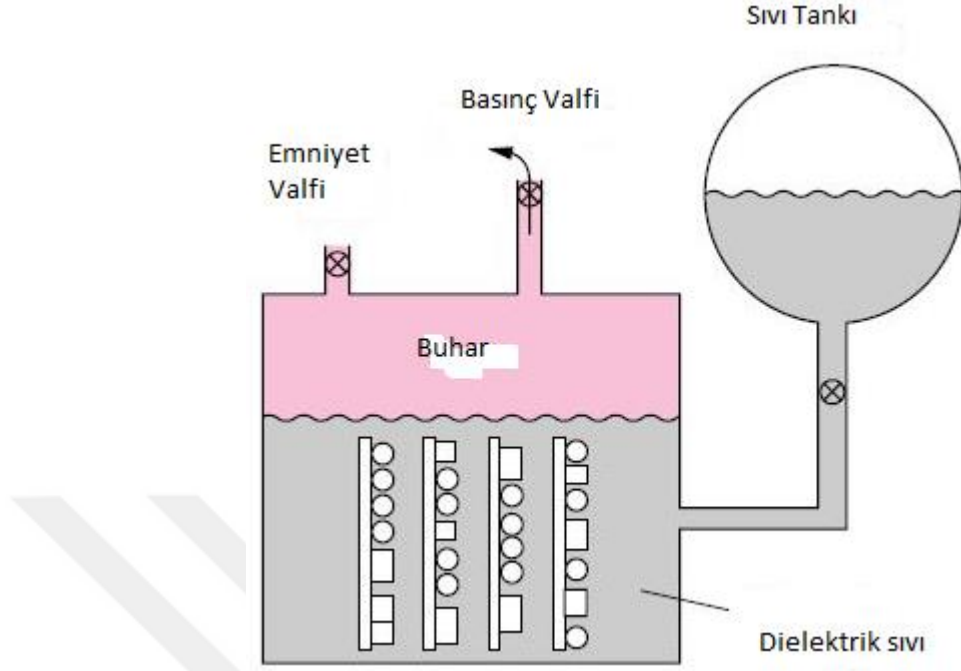
Geleneksel soğutucuların (yağ, su, etilen-glikol) termal iletkenlikleri gazlara göre daha iyi olduğundan daha karmaşık dizayna sahip daha yüksek güçlü sistemlerin soğutmasında sıvı soğutma kullanılmaktadır. Sıvı soğutmada kullanılan soğutucu akışkanın termofiziksel özellikleri sayesinde soğutma verimi artırılabilir. Sıvı soğutma kullanıldığı sistem geometrisine göre direkt ya da indirekt uygulanabilir. Direkt sıvı soğutmada soğutucu akışkan doğrudan soğutulacak ekipmana temas eder. Fakat indirekt soğutmada soğutulacak ekipmanın ısısı önce soğuk bir yüzeye aktarılır daha sonra bu soğuk yüzeye temas eden soğutucu akışkana aktarılarak ortamdan uzaklaştırılır. Sıvı soğutma sistemlerinde soğutucu akışkanın sistem içerisinde sirkülasyonunun sağlanması için pompa kullanılır.



**Şekil 1.4.** İndirekt Sıvı Soğutma Şematik Gösterimi (Çengel and Ghajar 2015)

### 1.1.6. İmmersiyon (daldırmalı) soğutma

Daldırmalı soğutma, 1940'lı yıllardan bu yana uzun yıllar boyunca elektronik ekipmanların soğutulmasında kullanılmıştır. Daldırmalı soğutma esas olarak elektroniğin di-elektrik bir sıvıya batırılması ve sıvının kaynaması esnasında (izotermik) elektroniğin ısınımsını çekmesi prensibine dayanır.



**Şekil 1.5.** Daldırma (immersion) soğutma sistemi (Çengel and Ghajar 2015)

## 1.2. Mikrokanal Nedir?

Geleneksel (Doğal ve zorlanmış taşınım esaslı) soğutma sistemlerinin soğutma kapasitesi yeterli olmadığından dolayı araştırmalar, ısı transfer katsayısını artırmaya yönelik çalışmalara kaymıştır. Isı akısını artırma yöntemlerinden birisi, akışın gerçekleştirildiği bölgede (ısı değiştiricisinde) alan hacim oranını artırarak ısı akısını arttırmaktır. Yüksek güç üreten sistemlerin etkin bir şekilde soğutulması amacıyla mikro boyuttaki birçok kanal birleştirilerek mikrokanal ısı değiştiricisi üretilir.

Mikrokanallar üzerine ilk deneysel çalışma yaklaşık 180 yıl önce Poiseuille tarafından yapılmıştır. Poiseuille çalışmasında cam mikro tüpleri kullanarak kılcal borularda su akışının debi değişimini incelemiştir (Canay 2007).

Tuckerman ve Pease (1981)'in çalışmaları ile hızla ilerleyen bir sürecin adımları atılmıştır. Günümüzde mikrokanallar ile ısıtma-soğutma sistemleri, pompalar, mikroalıcılar, valfler gibi pek çok mikro sistem tasarlamak mümkündür. Birçok

uygulama da, mikron boyutlarında; silindirik, trapezoidal, dikdörtgen gibi çeşitli geometrilere bir veya birden çok mikro kanal bulunmaktadır (Ergu 2011)

Literatürde yapılan çalışmaları incelediğimizde hidrolik çapa bağlı kanal sınıflandırmasında ortak bir payda da birleşmediği görülmektedir. (Kandlikar 2002a; Kandlikar 2002b) çalışmasında, 10  $\mu\text{m}$  den büyük ve 200  $\mu\text{m}$  den küçük hidrolik çapa sahip kanalları mikro kanal olarak sınıflandırmıştır. Kandlikar'ın aksine Mehendale *et al.* (2000). yaptığı çalışmada 1  $\mu\text{m}$  den büyük 100  $\mu\text{m}$  den küçük hidrolik çapa sahip kanalları mikro kanal olarak isimlendirmiştir. Tüm bunların dışında, 10 mm genişliğindeki dikdörtgen kanallar ve 1.5 mm çapındaki dairesel kesitli kanallarda yapılan çalışmalar da literatürde "mikro kanallar" olarak geçebilmektedir (Kılıc 2012).

**Çizelge 1.1.** Kanalların boyutlarına göre sınıflandırılması

Araştırmacılar	Makrokanal ( $D_h$ )	Minikanal ( $D_h$ )	Mikrokanal ( $D_h$ )	
(Kandlikar 2002a; Kandlikar 2002b)	$D_h > 3 \text{ mm}$	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \mu\text{m}$	$200 \mu\text{m} \geq D_h > 10 \mu\text{m}$	
(Kılıc 2012) (Cetin 2010)	$1 \text{ mm} < D_h < 6 \text{ mm}$	$100 \mu\text{m} < D_h < 1 \text{ mm}$	$1 \mu\text{m} < D_h < 100 \mu\text{m}$	
(Avcı 2008)	$D_h > 3 \text{ mm}$	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \mu\text{m}$	$200 \mu\text{m} \geq D_h > 10 \mu\text{m}$	
(Kılıc 2012)	-	-	$1.5 \text{ mm} \geq D_h$	
(Mehendale <i>et al.</i> 2000)	<b>Konvensiyonel Kanal</b>	<b>Kompakt Kanal</b>	<b>Meso Kanal</b>	<b>Mikro Kanal</b>
	$D_h > 6 \text{ mm}$	1-6 mm	100 $\mu\text{m}$ - 1 mm	1mm- 100 $\mu\text{m}$

Mikrokanallar yüksek ısı akılarına sahip olmalarının yanı sıra küçük ebatları ve ağırlıkları sebebiyle kullanıcılara taşıma kolaylığı sağlarlar, iş gören akışkan miktarının az olması yine mikrokanalların kullanımını avantajlı kılar. Bütün bu avantajlarının yanı sıra basınç düşüşü, kavitasyon, küçük hidrolik çap ve makro sistemlerden farklı olarak akış analizlerindeki belirsizlikler gibi dezavantajları da mevcuttur.



### 1.2.1. Mikrokanalların elektronik soğutmada önemi

Günümüzde Mikro elektromekanik sistemlerin (MEMS) birçok farklı uygulamada(savunma sanayiden otomotiv sanayisine, elektronik alanından tıp, kimya, biyoloji alanına) teknolojik gelişmeleri takiben kullanımına sıklıkla rastlanmaktadır. MEMS uygulamaların da başlıca problem kaynağı olarak, küçülen boyutlar ve buna karşılık MEMS'lere entegre edilen elektronik bileşenlerin yüksek ısı dayanımının olmamasıdır. İlk çalışma anından entegre sistemin sıcaklığının 70°C ve üzerinde ki sıcaklığa çıktığı ana kadar sistem hataları güvenilirlik, düzenli çalışmama ve okuma hataları vb. problemler başlar. Kompleks bir sistemde ve hassas çalışma gerektiren uygulamalarda bu tarz problemler ciddi sonuçlar doğurabilir. Bütün bu sebeplerden dolayı MEMS'lerin belirli sabit sıcaklık aralıklarında çalıştırılmaları gerekir.

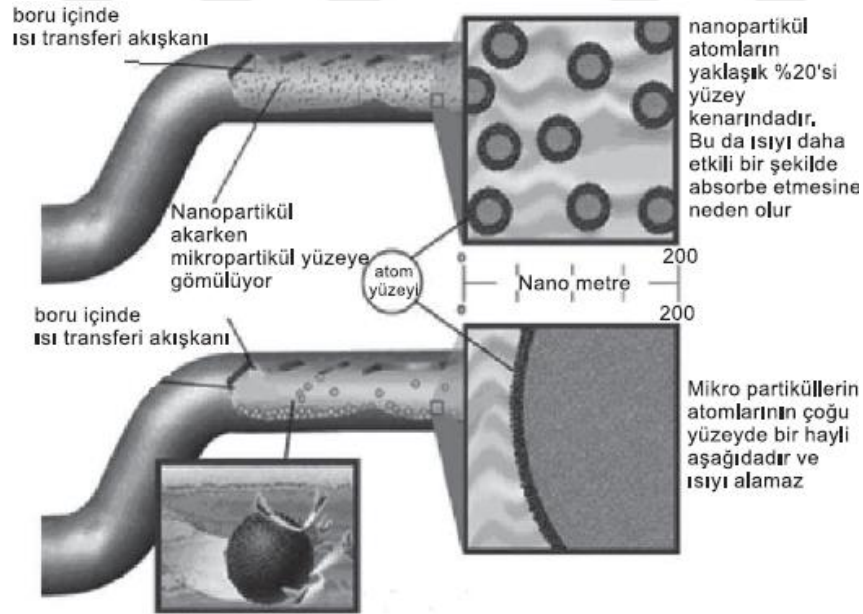
### 1.3. Nanoakışkanlar

Kanal geometrisi, artırılmış yüzey alanı gibi ısı transferini arttırmak için kanal üzerinde yapılan modifikasyonlar termal verimi arttırsa da kanallarda kullanılan geleneksel akışkanların (su, etilen glikol, yağ vb.) termofiziksel özelliklerinin yetersiz olması termal verimi sınırlandırmaktadır. Isı değiştiricilerini makro boyuttan mikro boyuta indirerek sağlanan ısı transfer iyileştirmesi ile birlikte geleneksel ısı transferi akışkanlarının termofiziksel özelliklerini iyileştirerek daha verimli çalışmaları sağlanabilir. Bu amaçla geleneksel ısı transfer akışkanlarının içine termal özellikleri daha iyi olan metal parçacıkların karıştırılması düşüncesi ortaya çıkmıştır.

1873 yılında Maxwell milimetre ve mikrometre boyutundaki partikülleri geleneksel akışkanlara karıştırarak bu fikri uygulamaya geçirmeye çalışmıştır. Fakat boyutları (milimetre ve mikrometre) teknolojik yetersizliklerden dolayı yeterince küçültülemeyen parçacıkların süspansiyon içerisinde iyi tutunamayıp hızla çökmesi ve homojen bir yapı oluşturmaması ısı transferi mekanizmalarında tıkanma ve basınç düşüşünde artışa neden olmuştur (Murshed *et al.* 2008a).

Teknolojik imkanların gelişmesiyle birlikte nano partikül (16nm-60nm) üretimi sağlanabilmiştir. Metal-ametal nano boyutlu partiküllerin üretimi bir anlamda Maxwell'in yıllar önce hayata geçiremediği, yüksek ısı iletkenliğine sahip kararlı, tıkanma ve basınç düşüşüne çok fazla etki etmeyen akışkan fikrinin gerçekleştirilmesine bir anlamda olanak sağlamıştır. Choi 1995 yılında yaptığı çalışmada 50 nm boyutundaki metal nanopartikülleri geleneksel ısı transferi akışkanlarına karıştırarak 'nanoakışkan' adı verilen ısı transfer kabiliyeti yüksek termofiziksel özelliklere sahip yeni nesil ısı transfer akışkanını elde etmeyi başarabilmiştir. Nanoakışkanlar, termofiziksel kararlılıkları ve homojen yapılarıyla temel ısı transferi akışkanlarının (su, etilen glikol, yağ) yerini almaktadır (Duangthongsuk and Wongwises 2009).

Bu yeni iş akışkanları, hazırlanırken uygulanan özel yöntemler sayesinde kararlı bir yapı gösterirler. Çökelme eğilimi olmayan bu yeni nesil akışkanlar nanopartikül ihtiva etmelerine rağmen basınç düşüşü temel akışkana göre çok az miktarda artmıştır.



**Şekil 1.6.** Nanopartiküllerin mikropartiküller ile karşılaştırılması (Manay and Sahin 2017)

Nano boyutlu partiküllerin yüzey alanı/kütle oranı yüksek olması önemli avantajlarından birisidir. Temel akışkan içerisinde partiküller birbirlerine çarparak enerjilerini birbirlerine aktarırlar (Manay 2014) . Bu şekilde ısı enerjisi daha hızlı ve etkin bir şekilde transfer edilebilmektedir.

Katı partiküllerin akışkan ortamdaki hareketleri Brownian hareketi olarak bilinen rastlantısal hareketle tanımlanır. Katı partiküller akışkan ortam içerisinde zig zag çizerek hareket ederler ve bu nedenle akışkan ortam molekülleri de farklı yönlere doğru hareket eder (Manay 2014).

### **1.3.1. Nanoakışkan türleri**

Nanoakışkanlar, temel akışkan içerisine nanopartiküllerin homojen olarak karıştırılması neticesinde oluşturulan yüksek termal özelliklere sahip akışkanlardır. Bu akışkanlar saf metal, karbon, alaşım ve seramik esaslı olarak farklı türlerde elde edilebilirler. Saf metal parçacıklarının üretim zorlukları sebebiyle pek tercih edilmezken seramik nanopartiküller ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CuO$ ) kolaylıkla üretilebilmektedir ve temel akışkan içerisinde kararlı yapı oluşturabilmektedirler. Yaygın olarak kullanılan karbon esaslı nanopartiküller ise temel akışkanlarla birleştiği zaman termal iletkenliği iyi derecede artırabilmektedir ayrıca yoğunluklarının düşük olması bir diğer tercih sebebidir.

### **1.3.2. Nanoakışkanların hazırlanması**

Nanoakışkanları basit katı-sıvı süspansiyonu olarak görmek yanlıştır. Homojen karışımı oluşturmak, topaklanmayı minimize etmek ve akışkanın kararlı yapıda olmasını sağlamak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar temel olarak tek adım yöntemi ve iki adım yöntemidir.

Tek adım yönteminde nanopartiküller temel akışkan içerisinde üretilir. Genel olarak metal nanopartikülleri için uygulanan bu yöntemde nanopartikülü oluşturulduğu ortamdan ayırmak oldukça zordur. Bu durum tek adım yönteminin en önemli

dezavantajı olarak belirtilebilir. Direkt buharlaştırılmalı tek adım metodu ilk olarak (Akoh *et al.* 1978) tarafından uygulanmış ve geliştirilmiştir.

İki adım yönteminde ise kullanılacak nanopartiküller uygun yöntemlerle temel akışkana karıştırılarak nanoakışkan hazırlanır. Oksit nanopartiküllerde iyi sonuçlar vermesi yöntemin avantajıdır. Ancak önceden hazırlanmış nano boyuttaki partiküllerin temel akışkan içerisine ilave edilmesi sırasında topaklanmanın meydana gelmesi ve bu sayede kararlı yapıdan uzaklaşılması yöntemin en önemli dezavantajıdır. Bu durumu gidermek için litaretür de yapılan çalışmalarda,

- Yüzey aktif madde kullanımı
- Nanoakışkanın pH değerinin değiştirilmesi
- Akışkanı ultrasonik titreşime maruz bırakma

gibi önleyici etkiler kullanılmaktadır (Dilek 2009).

### 1.3.2. Yüzey aktif maddeler

Yüzey aktif maddeler çözelti oluşturdukları akışkanın yüzey ve ara yüzey özelliklerini değiştirerek çözeltinin parçacık tutma özelliğini önemli ölçüde geliştirmektedir. Nanoakışkanların en düşündürücü dezavantajları, parçacıkların akış süresince kanal yüzeylerine çarparak yüzeyleri aşındırıcı etkileri ve partiküllerin süspansiyon içerisinde çökelme eğiliminden dolayı oluşan heterojen yapıdır. Nanoakışkanların bu olumsuz davranışlarını akışkan içerisinde yüzey aktif madde kullanarak giderilebilmektedir.

Bu çalışmada, tel erazyon işlemi ile imal ettiğimiz mikrokanalların içerisinde geleneksel iş akışkanları yerine ısı iletkenliği çok daha iyi olan nanoakışkanları soğutucu olarak kullanarak yüksek güçte çalışan mikro elektro mekanik sistemlerin (MEMS), daha etkin ve verimli bir şekilde soğutulması hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasında farklı iki kanal çapı (400µm-500µm) için farklı hacimsel konsantrasyonlarda (%0.25 ve %0.5) hazırlanan nanoakışkanların Isı transferi deneysel olarak incelenecektir.

## **2. KAYNAK ÖZETLERİ**

### **2.1. Nanoakışkan Literatür Özetleri**

#### **2.1.1. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri**

Temel ısı transfer akışkanlarının termal özelliklerinin sınırlı olması yeni akışkan arayışına neden olmuştur. Termofiziksel özellikleri iyi olan nano partiküllerin geleneksel akışkanlara karıştırılması ile oluşturulan yeni iş akışkanları ilgi odağı haline gelmiştir. Literatürdeki çalışmalarda yoğunlukla nanoakışkanların termofiziksel özellikleri, ısı transferi ve basınç düşüşü etkileri incelenmiştir.

##### **2.1.1.a. Isıl iletkenlik**

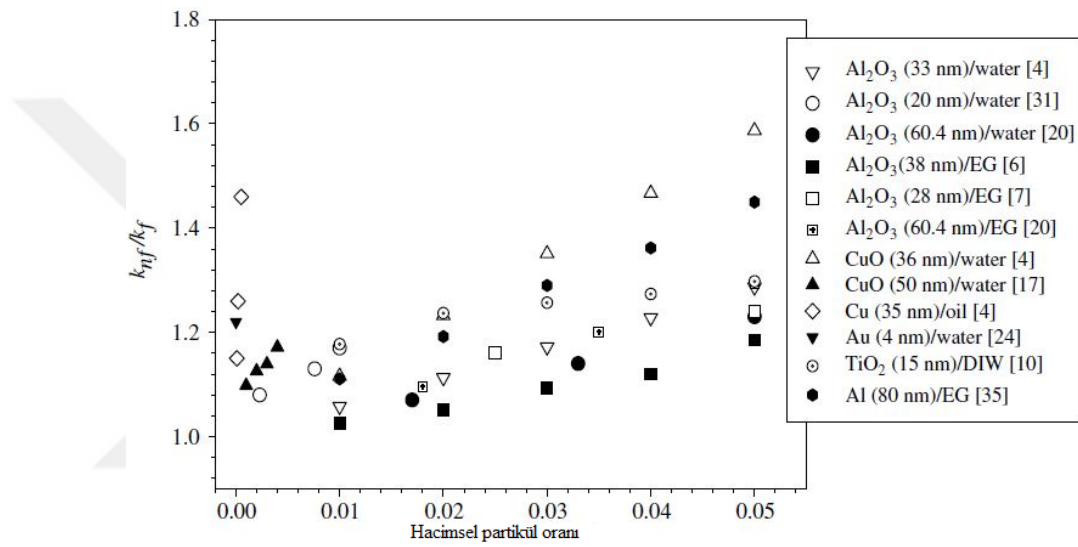
Nanoakışkan oluşturulurken kullanılan nanopartiküllerin boyutuna, türüne, hacimsel konsantrasyonuna ve geometrisine göre hazırlanan nanoakışkan farklı ısı iletkenlik özelliği gösterir. Bu sebeple ısı iletkenlik önemle üzerinde durulması gereken bir termofiziksel özelliktir. Nanoakışkanın ısı iletkenliğini ölçmek için başlıca kullanılan üç yöntem vardır. Bunlar, geçici sıcak tel yöntemi (transient hot wire method), kararlı hal paralel plaka yöntemi (steady-state parallel plate technique) ve sıcak salınım yöntemi (temperature oscillation technique) dir.

Bu yöntemler arasında en çok tercih edileni geçici sıcak tel yöntemidir. Geçici sıcak tel yöntemi sürekli verilen elektrik sinyallerine telin zaman ekseninde gösterdiği sıcaklık tepkisi ölçülerek uygulanır. Metot da kullanılan tel hem ısıtıcı hem de termometre görevi görür. Daha hızlı ve güvenilir sonuçlar alınabilen bu yöntemde yapılan çalışmalarda az miktarda nanopartikül eklendiğinde dahi ısı iletkenlikte önemli artışlar meydana getirdiği görülmüştür. Bazı malzemelerin ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Bazı katı sıvı malzemeler için ısı iletkenlik değerleri (Li *et al.* 2009)

Malzeme		Termal iletkenlik (W/m.K)
Metalik katılar	Bakır (Cu)	401
	Aleminyum (Al)	237
	Gümüş (Ag)	428
	Altın (Au)	318
	Demir (Fe)	83.5
Metalik olmayan katılar	Aleminyum oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	40
	Bakır oksit (CuO)	76.5
	Silisyum (Si)	148
	Silisyum karbür (SiC)	270
	Karbon nanotüpler (CNTs)	~3000 Çift cidarlı karbon nanotüp (MWCNTs) ~6000 Tek cidarlı karbon nanotüp (SWCNTs)
	BNNTs	260~600
Temel akışkanlar	Su (H <sub>2</sub> O)	0.613
	Etilen glikol (EG)	0.253
	Makine yağı (EO)	0.145

Literatürde ki çalışmalarda nanoakışkanların termal iletkenliğinin temel akışkan termal özelliği ile kıyaslamak için efektif ısıl iletkenlik kullanılmıştır. Efektif ısıl iletkenlik, nanoakışkan ısıl iletkenliğinin temel akışkan ısıl iletkenliğine oranı olarak tanımlanan birimsiz bir sayıdır (Murshed *et al.* 2008b). Nanoakışkanların termofiziksel ve elektro kinetik özellikleri üzerine yaptığı çalışmada çeşitli nanoakışkanlar için farklı hacimsel yüzdelerde ki efektif ısıl iletkenlik grafiğini Şekil 2.2'deki gibi sunmuşlardır.



**Şekil 2.1.** Farklı nanoakışkanların efektif ısıl iletkenliğinin hacimsel partikül oranıyla değişimi (Murshed *et al.* 2008b)

Daha önce de değinildiği gibi partikül boyutu, hacimsel konsantrasyon ve sıcak nanoakışkanların ısıl iletkenliğini önemli ölçüde etkilemektedir. (Teng *et al.* 2010) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanının termal iletkenliği üzerine yaptıkları araştırmada, partikül boyutu, hacimsel konsantrasyon ve sıcaklığın termal iletkenliğe etkilerini incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmada, Farklı nominal çaplarda (20, 50 ve 100 nm) partiküller kullanarak farklı konsantrasyonlarda (%0.5, %1, %1.5 ve %2) farklı varyasyonlarda nanoakışkanlar hazırlamışlardır. Her bir nanoakışkan için üç farklı sıcaklıkta (10, 30 ve 50°C) termal iletkenliğin değişimini incelemişlerdir. Sonuçta nanopartiküllerin akışkan termal iletkenliğini artırdığı ve daha küçük boyuttaki nanopartiküller ile hazırlanmış nanoakışkanlar için sıcaklık artışı ısıl iletkenliği artırmada daha etkin olduğu sonucuna varmışlardır.

(Hwang *et al.* 2006) farklı türde nanopartikülleri farklı temel akışkanlara ilave ederek partikül ve temel akışkanın ısı iletkenliğinin hazırlanan nanoakışkanın termal iletkenlik iyileştirmesine etkisini incelemiştir. Geçici sıcak tel metodunu kullandıkları bu çalışmada, çok duvarlı CNT- su, CuO-su, SiO<sub>2</sub>-su ve CuO-EG nanoakışkanlarını karşılaştırmışlardır.

Nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen bir diğer parametre partikül şeklidir. (Murshed *et al.* 2005) nanopartikül şeklinin termal iletkenlik performansı üzerine etkisini incelemiştir. Çubuk şekilli 10nm×40nm (çap, uzunluk) TiO<sub>2</sub> ve küresel (15nm) TiO<sub>2</sub> nanopartiküllerini de-iyonize su içerisine karıştırarak nanoakışkan hazırlamışlardır. Farklı hacimsel oranlardaki nanoakışkanların termal iletkenliğini ölçmek için geçici sıcak tel metodunu kullanmışlardır.

Yine partikül şeklinin termal iletkenlik üzerindeki etkisini inceleyen bir diğer çalışmada (Zhang *et al.* 2007b) Küresel ve silindirik nanopartikülleri içeren nanoakışkanların (Au-Toluen, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Su, TiO<sub>2</sub>-Su, CuO-Su ve CNT-Su) nanoakışkanları kullanmışlardır. Etkin termal iletkenliklerini ve termal yayınımlarını, geçici sıcak tel tekniğini kullanarak belirlemişlerdir. Küresel parçacıklar için, Au (1.65nm), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20nm), TiO<sub>2</sub> (40nm) ve CuO (30nm) silindirik parçacıklar için ise ortalama uzunlukları 10µm ve çapları 150nm olan CNT'ler kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma neticesinde termal iletkenliğin ve termal yayınının, partikül konsantrasyonu, partikül ısı iletkenliği ve CNT'ler için boy-çap oranındaki artışla birlikte arttığını vurgulamışlardır.

Karbon esaslı nano tüpler için cidar sayısı ısı iletkenlik açısından önemlidir. (Nasiri *et al.* 2012) CNT'lerin, su bazlı nanoakışkanlardaki termal iletkenliği ve kararlılığı üzerine CNT duvar sayısının etkisini incelemiştir. Nanoakışkan hazırlanmasında, tek duvarlı, çift duvarlı, çok duvarlı ve iki farklı sayıda duvarlı multi-duvarlı CNT kullanmışlardır. Termal iletkenlik ve zeta boyut dağılımına göre, CNT duvar sayısının artması kararlılık ve termal iletkenlik için dezavantaj olduğu sonucuna varmışlardır. Yine (Ding *et al.* 2006) yatay yerleştirilmiş bakır bir kanal içerisinde akan ağırlıkça farklı (%0, %0.1, %0.25 ve %0.5) konsantrasyonlarda çok duvarlı CNT nanoakışkanların ısı transfer



katsayısını incelemiştir. Bir dizi Reynolds sayısı ve farklı pH değerleri için kanal boyunca viskozite ve ısı transfer performans değerlerini belirlemiştir.

(Li *et al.* 2008) Cu- su nanoakışkanın termal iletkenliğine yüzey aktif madde ve pH değeri etkisini incelemiştir. Sonuçlar, Cu-su nanoakışkanının termal iletkenliğinin nano süspansiyonlarının yüzey aktif madde konsantrasyonu, pH değeri ve nanopartikül hacimsel oranına bağlı olduğunu göstermiştir. Bu yüzden, nanoakışkanların ısı iletkenliklerini arttırmak için hem yüzey aktif madde hem de pH değeriyle kombine bir yaklaşımın uygulanmasının daha etkili olacağını belirtmişlerdir.

(Ghozatloo *et al.* 2013) aktifleştirilmiş grafini saf suya karıştırarak nanoakışkan hazırlamışlardır. Grafin fonksiyonelleştirilmesi için oksidatif madde olarak potasyum persülfat (KPS) kullanmışlardır. Grafin nanoakışkanını hazırlamak için iki adım metodunu uygulamışlardır. Ağırlıkça %0.01-0.05 aktif grafini saf su içerisine karıştırmışlar ve hazırladıkları nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışma bulgularına göre grafin konsantrasyonu arttıkça termal özelliklerin iyileştiği sonucuna varmışlardır.

(Nasiri *et al.* 2011) mekanik ve kimyasal dağılım yöntemlerinin beş farklı yapıdaki (tek duvarlı CNT, çift duvarlı CNT, az duvarlı CNT ve iki farklı çok duvarlı CNT) nano tüplerle hazırlanmış nanoakışkanların ısı iletkenliği ve kararlılığı üzerine etkisini incelemiştir. Kimyasal dağıtım yöntemi olarak fonksiyonelleştirme yöntemini, mekanik yöntem olarak da SDS/ ultrasonik prob ve SDS/ ultrasonik banyo yöntemini kullanmışlardır. Deneysel çalışma verileri, fonksiyonelleştirme metoduyla hazırladıkları nanoakışkanların düşük ve orta sıcaklıklarda ki termal iletkenlik ve kararlılık özelliklerinin mekanik yöntemlerle hazırladıkları süspansiyonlara göre daha iyi olduğunu göstermiştir.

(Yu *et al.* 2009) Etilen Glikol temel akışkanına ZnO partiküllerini karıştırarak geçici sıcak tel metoduyla ZnO-EG nanoakışkanını hazırlamışlardır. ZnO-EG nanoakışkanının termal iletkenlik ve viskozite dahil termofiziksel özelliklerinin zaman, partikül

konsantrasyonu ve sıcaklık parametreleriyle değişimini incelemişlerdir. Deneysel alışma sonucuna göre ZnO-EG nanoakışkanının termal iletkenliği 20-360 dakika arasında zamandan bağımsızdır ve mutlak ısıl iletkenlik 10-60°C aralığında farklı sıcaklıklar için sabit artış oranıyla artmıştır. Aynı zamanda, hazırladıkları nanoakışkanların termal iletkenliğinin partikül konsantrasyonundan da büyük lde etkilendiğini göstermişlerdir. Partikül konsantrasyonuna bağlı olarak termal iletkenlik non-linear bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmadaki şartlar altında düşük hacim konsantrasyonlu ( $\varphi \leq 0.02$ ) ZnO-EG nanoakışkanı Newton davranışı göstermiştir ve viskozite artan sıcaklıkla önemli lde azalmıştır. Daha yüksek hacimsel konsantrasyonlarda ki ( $\varphi \geq 0.03$ ) ZnO-EG nanoakışkanlar için Newton davranışı göstermeyen kesme inceltme davranışı gözlenmişlerdir.

(Oh *et al.* 2008) Nanoakışkanlar mikro elektronik soğutma gibi gelişmiş ısı transferi uygulamalarının önde gelen elemanlarıdır. Nanoakışkanların termal iletkenliğini geçici sıcak tel metodu gibi konvansiyonel teknikler kullanılarak ölçülürken, bu çalışmada, 3-omega metodunu kullanmışlardır. De-iyonize edilmiş su ve etilen glikol kullanılan bir ısıtıcının 3-omega cevabı için teorik model, deneysel verilerle kıyaslanarak doğrulanmıştır. Bu onaylamayı takiben, de-iyonize su ve etilen glikol içerisinde  $Al_2O_3$  nanoakışkanının termal iletkenliği oda sıcaklığında ölçüldü. Nanopartiküllerin okelmesi ve kümelenmesinden dolayı termal yanıtın ilgi çekici etkisi gözlemlendi.

**Çizelge 2.2.** Isıl iletkenliği değiştiren parametreler için literatür özeti (Tawfik 2017).

Araştırmacılar	Partikül türü- boyutu (nm)	Temel akışkan	Hacimsel oran (%)	İyileşme (%)	İncelenen parametreler							
					Partikül konsantras- yonu	Partikül boyutu	Partikül seki	Partikül termal iletkenliği	Temel akışkan türü	Sıcaklık	Akışkan hazırlama yöntemi	
(Masuda <i>et al.</i> 1993)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -13	Su	4,33	32	×							×
	SiO <sub>2</sub> -12		2,3	1,1								
	TiO <sub>2</sub> -27		4,35	11,6								
(Eastman <i>et al.</i> 1996)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -33	Su	5	29	×							×
	CuO-36			60								
	Cu-35	HE- 200 yağ	0,052	44								
(Pak and Cho 1998)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -13	Su	4,33	32		×		×				
	TiO <sub>2</sub> -27		4,35	11,6								
(Li and Eastman 1999)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -38	Su	4,3	10	×	×		×	×			
		EG	5	18								
	CuO-24	Su	3,41	12								
		EG	4	23								
(Wang <i>et al.</i> 1999)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -28	Su	5,5	16		×						×
		EG	8	41								
		Makine yağı	7,4	30								
		Pompa yağı	7,1	20								
	CuO-23	Su	9,7	34								
		EG	14,8	54								
(Xuan and Li 2000)	Cu-100	Su	7,5	78	×	×						×
		HE- 200 yağ	7,5	43								
(Eastman <i>et al.</i> 2001)	Cu-10	Etilen glikol	0,3	40	×				×			
(Choi <i>et al.</i> 2001)	Çok cidarlı CNTs Ø25×50,0 00	Yağ	1	160	×			×				

Çizelge 2.2. (devam)

(Xie <i>et al.</i> 2002a)	SiC (küresel)-26	De-iyonize su	4,2	15,8	×			×		×	
	SiC (silindirik)-600		4	22,9							
	SiC (küresel)-26	Etilen glikol	3,5	13							
	SiC (silindirik)-600		4	23							
(Wang <i>et al.</i> 2002)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -29	Etilen glikol	4	17	×	×			×		×
	CeO <sub>2</sub> -29		4	18							
	TiO <sub>2</sub> -40		4	13							
	CuO-33		4	17							
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -28		4	16							
	ZnO-56		4	21							
(Xie <i>et al.</i> 2002b)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -60,4	Su	5	23	×				×		×
		Etilen glikol	5	30							
		Pompa yağı	5	38							
(Xie <i>et al.</i> 2003)	Çok cidarlı CNTs Ø15×30,000	De-iyonize su	1	7	×			×		×	
		Etilen glikol	1	12,7							
(Patel <i>et al.</i> 2003)	Au-10/20	Su	0,00026	21	×					×	
		Tolüen	0,011	8,8							
	Ag-10/20	Su	0,001	16,5							
(Das <i>et al.</i> 2003)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -38,4	Su	4	24	×			×		×	
	CuO-28,6		4	36							
(Wen and Ding 2004)	Çok cidarlı CNT Ø20×60,000	Su	0,84	21	×					×	

Çizelge 2.2. (devam)

(Assael <i>et al.</i> 2005)	Çift cidarlı CNT-Ø20	Su	1	8			×				×
	Çok cidarlı CNT Ø130×10,000		0,6	34							
(Chon <i>et al.</i> 2005)	Al2O3-11	Su	1	9		×				×	
	Al2O3-47		1	2							
	Al2O3-150		1	0,5							
(Hong <i>et al.</i> 2005)	Fe-10	Etilen glikol I	0,55	18	×						×
(Liu <i>et al.</i> 2005)	Çok cidarlı CNT Ø20~50	EG	1	12,4	×		×		×		
		Motor yağı	1	8,5							
(Murshe d <i>et al.</i> 2005)	TiO2-15 (Küre)	De-iyonize su	5	30	×		×				
	TiO2-Ø10×40 (silindir)		5	33							
(Prasher <i>et al.</i> 2006a)	Al2O3-10	Su	0,5	100		×				×	
(Chopkar <i>et al.</i> 2006)	Al70Cu30-20/40	EG	2,5	125	×	×					
(Ceylan <i>et al.</i> 2006)	Ag-Cu-(10)	Pompa yağı	0,003	15	×						
			0,006	33							
			0,009	12							
			0,015	0,02							
(Ding <i>et al.</i> 2006)	Çok cidarlı CNT Ø40	Su	0,49	80	×		×			×	

Çizelge 2.2. (devam)

(Hwang <i>et al.</i> 2006)	Çok cidarlı CNT- Ø130×30 0,000/50, 000	Su	1	11,3	×		×		×		
			CuO-29	1	5						
			SiO <sub>2</sub> -12	1	3						
	CuO-33	EG	1	9							
(Li and Peterson 2006)	CuO-29	Su	6	52	×					×	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -36		10	32							
(Putnam <i>et al.</i> 2006)	Au-4	Etanol	0,018	1,3	×		×				
	Au-2	Toluën	0,024	1,4							
	C <sub>60</sub> /C <sub>70</sub>		0,378	0,816							
(Wen and Ding 2006)	TiO <sub>2</sub> -34	Su	6,8	6	×						
(He <i>et al.</i> 2007)	TiO <sub>2</sub> -20	Su	2	4,2	×	×					
(Kim <i>et al.</i> 2007)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -38	Su	3	8							
		EG	3	10,6							
	TiO <sub>2</sub> -10	Su	3	11,4							
		EG	3	15,4							
	TiO <sub>2</sub> -34	Su	3	8,7							
		EG	3	12,3							
	TiO <sub>2</sub> -70	Su	3	6,4							
		EG	3	7,5							
ZnO-10	Su	3	14,2								
	ZnO-30	Su	3	11,5							
		Etilen glikol	3	21							
	ZnO-60	Su	3	7,3							
		Etilen glikol	3	10,7							
(Li and Peterson 2007)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -36	Su	6	28	×	×				×	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -47		6	26							
(Yoo <i>et al.</i> 2007)	TiO <sub>2</sub> -25	De-iyonize su	1	14,4	×	×		×			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -48		1	4							
	Fe-10	Etilen glikol	0,3	16,5							
	WO <sub>3</sub> -38		0,3	13,8							

Çizelge 2.2. (devam)

(Zhang <i>et al.</i> 2007b)	Au-1,65	Tolüen	0,003	8	×		×	×			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -20	Su	14,6	22							
	TiO <sub>2</sub> -40		2,6	6,5							
	CuO-33	Su	4,18	16,5							
	CNF-Ø150×10,000		0,89	41,4							
(Hwang <i>et al.</i> 2007)	Çok cidarlı CNT-Ø10-30×10,000-50,000	Su	1	7	×	×	×	×	×		×
	CuO-33		1	5							
	SiO <sub>2</sub> -12	Etilen glikol	1	3,2							
	CuO-33		1	9,1							
	Çok cidarlı CNT-Ø10-30×10,000-50,000		0,5	8,7							
	C <sub>60</sub> /C <sub>70</sub> -10		5	6							
(Chopkar <i>et al.</i> 2008)	Al <sub>2</sub> Cu-31	Su	2	96	×	×			×		
	Al <sub>2</sub> Cu-101		2	61							
	Ag <sub>2</sub> Al-33		2	106							
	Ag <sub>2</sub> Al-120		2	75							
	Al <sub>2</sub> Cu-31	Etilen glikol	2	84							
	Al <sub>2</sub> Cu-101		2	56							
	Ag <sub>2</sub> Al-33		2	96							
	Ag <sub>2</sub> Al-120		2	62							
(Murshe d <i>et al.</i> 2008a)	TiO <sub>2</sub> -15	Etilen glikol	5	18	×			×			
	Al-80		5	45							
(Oh <i>et al.</i> 2008)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -45	De-iyonize su	4	13,3	×						

Çizelge 2.2. (devam)

		Etilen glikol	4	9,7							
(Philip <i>et al.</i> 2008)	Fe3O4-6,7	Karosen	<2%	300	×						×
(Beck <i>et al.</i> 2009)	Al2O3-282	Su	4	17,7	×	×					
	Al2O3-282	EG	3	16,3							
(Duangthongsuk and Wongwisutes 2009)	TiO2-21	Su	2	7	×					×	
(Mintsa <i>et al.</i> 2009)	Al2O3-36	Su	18	31	×	×				×	
	Al2O3-47		18	31							
	CuO-29		16	24							
(Turgut <i>et al.</i> 2009)	TiO2-21	De-iyonize su	3	7,2	×					×	
(Zhu <i>et al.</i> 2009)	Al2O3-15/50	Su	4	10,1	×						×
(Abareshi <i>et al.</i> 2010)	Fe3O4-15/22	Su	3	11,5	×					×	×
(Beck <i>et al.</i> 2010)	Al2O3-12	Su	4	5,4	×	×			×		
		Etilen glikol	4	14,3							
	Al2O3-10	Su-Etilen glikol karışımı (%50-%50)	3	11,3							
			3	10,4							
(Yu <i>et al.</i> 2010)	Fe3O4-15	Karosen	1	34,6	×					×	
(Lee <i>et al.</i> 2011)	SiC-100	De-iyonize su	3	7,2	×						



Çizelge 2.2. (devam)

(Harish <i>et al.</i> 2012b)	Tek cidarlı CNT-100/600	Su	0,3	12,1	×					×	
(Harish <i>et al.</i> 2012a)	Tek cidarlı CNT-100/600	Etilen glikol	0,21	15,5	×					×	
(Khedkar <i>et al.</i> 2012)	CuO-25	Su	7,5	32,3	×					×	
		Mono EG	7,5	21,3							
(Pakdaman <i>et al.</i> 2012)	Çift cidarlı CNT Ø5×20	Isı transfer yağı	2	15	×					×	
(Sun <i>et al.</i> 2013)	SiO2-10	Su	1,2	11	×						
	SiO2-60		1,2	13							
(Sundar <i>et al.</i> 2013a)	Al2O3-36,5	Su-Etilen glikol karışımı (%50-%50)	8	17,8 9	×					×	
	CuO-27		8	24,5 6							
(Angayar kanni and Philip 2014)	γ-Al2O3-13	Su	6	14,5	×						
	SiO2-15		6	10,8							
	TiO2-13,5		4	15,1							
	α-Al2O3-24,4		6	18,6							
(Cingaru <i>et al.</i> 2014)	Sn-SiO2-50/100	TH66 (Therminol)	5	13	×			×			
(Buonomo <i>et al.</i> 2015)	Al2O3-40	Su	4	14,4	×					×	×
(Esfe <i>et al.</i> 2015b)	Çift cidarlı CNT-Ø3+ZnO-10/30 (%50,%50)	Etilen glikol-Su (%60,%40)	1	33	×					×	

Çizelge 2.2. (devam)

(Karimi <i>et al.</i> 2015)	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -8	De-iyonize su	2	17,2	×					×	
(Paramett hanuwat <i>et al.</i> 2015)	AG-5/25	De-iyonize su	0,5	16	×						×
(Usri <i>et al.</i> 2015)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -13	Etilen glikol-Su (%60, %40)	2	8,4	×				×	×	
		Etilen glikol-Su (%50- %50)	2	12,6							
		Etilen glikol-Su (%40, %60)	2	16,2							
(Esfe <i>et al.</i> 2015a)	MgO-40	Etilen glikol-Su (%40, %60)	3	34,43	×			×		×	
(Li <i>et al.</i> 2016)	SiC-30	Diametrik yağ	0,8	7,36	×					×	×
(Aberou mand <i>et al.</i> 2016)	AG-20	Isı transfer yağı	0,171	41	×					×	
(Khedkar <i>et al.</i> 2016)	TiO <sub>2</sub> -5	Etilen glikol	7	19,52	×					×	
(Sadegh <i>et al.</i> 2016)	AG-10	Isı transfer yağı	0,6	36,3	×					×	

Çizelge 2.2. (devam)

(Xing <i>et al.</i> 2016)	S-Tek cidarlı-Ø1-2×1000/3000	“Su	0,48	8,1	×					×	
	L- Tek cidarlı-Ø1-2×5000/30,000		0,48	16,2							
	çok cidarlı-Ø10-30×30,000		0,48	5							
(Li <i>et al.</i> 2015)	ZnO-50	Etilen glikol	2,4	13	×					×	×
(Agarwal <i>et al.</i> 2016)	CuO-55/66	Su	2	24	×				×	×	×
		Etilen glikol	2	21							
		Motor yağı	2	14							

Literatür incelendiği zaman nanoakışkan ısı iletkenliği için farklı sayısal modeller türetildiği görülmektedir. Çizelge 2.3 de bu sayısal modellerin bir kısmı özet şeklinde belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. İletkenlik modelleri (Dilek 2009)

Model	İfade
Maxwell	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + 2(k_p - k_l)\phi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)\phi}$
Hamilton-Crosser	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + (n - 1)k_l - (n - 1)(k_l - k_p)\phi}{k_p + (n - 1)k_l + (k_l - k_p)\phi}$
Wasp	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l - 2(k_l - k_p)\phi}{k_p + 2k_l + (k_l - k_p)\phi}$
Yu-Choi	$\frac{k_e}{k_l} = \frac{k_p + 2k_l + (k_p - k_l)(1 + \beta)^3\phi}{k_p + 2k_l - (k_p - k_l)(1 + \beta)^3\phi}$

Çizelge 2.3. (devam)

Bruggeman	$k_e = \frac{1}{4} [(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_l] + \frac{k_l}{4} \sqrt{\Delta}$ $\Delta = [(3\phi - 1)^2 (k_p/k_l)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_p/k_l)]$
Jeffrey	$\frac{k_e}{k_l} = 1 + 3\beta\theta + \left( 3\beta^2 + \frac{3\beta^3}{4} + \frac{9\beta^3}{16} \frac{\alpha + 2}{2\alpha + 3} + \right)$
Davis	$\frac{k_e}{k_l} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\theta} [\theta + f(\alpha)\phi]$
Lu-Lin	$\frac{k_e}{k_l} = 1 + a\phi + b\phi^2$

### 2.1.1.b. Viskozite

Temel akışkan içerisine ilave edilen nanopartiküller akışkanın ısı iletkenliğini değiştirdiği gibi viskozitesinde de değişikliğe sebep olmaktadır. Yeni nesil nanoakışkanların viskozitesinde artış yönünde ki bu değişim kanal içerisindeki ilerleyişi zorlaştırmaktadır. Bu etki pompalama gücündeki artışı da beraberinde getirmektedir. Klasik akışkanlara göre nanoakışkanların en büyük dezavantajı olan viskozite artışı araştırmacıları nanoakışkan viskozitesini artıran parametreler üzerinde çalışmaya itmiştir. Literatürde klasik akışkanlar ile nanoakışkanların viskozite değerlerini kıyaslayabilmek için efektif viskozite değerleri belirlenmiştir. Efektif viskozite değeri nanoakışkan viskozitesinin temel akışkan viskozitesine oranı olarak tanımlanmıştır. Tıpkı nanoakışkanların ısı iletkenliğindeki artışta olduğu gibi viskozite artışı da kullanılan partikülün birtakım özelliklerine bağlıdır. Bunlar partikül boyutu, topaklanma eğilimi, partikül şekli, hacimsel konsantrasyon ve sıcaklıktır.

(Wang *et al.* 1999) 28nm boyutundaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartiküllerini kullanarak nanoakışkan hazırlamışlardır. Temel akışkan olarak saf su ve etilen glikol kullanarak akışkan çeşidinin viskozite artışındaki artışını inceleme fırsatı bulmuşlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda %6 hacimsel konsantrasyona sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-saf su nanoakışkanında viskozite artışı %86 olurken %3.5 hacimsel konsantrasyonlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-EG nanoakışkanında %39 artış meydana gelmiştir.

(Nguyen *et al.* 2007) partikül boyutu ve çeşidinin ısı transferi iyileştirmesi ve viskozite değişimi üzerindeki etkisini deneysel bir çalışma yaparak incelemiştir.  $Al_2O_3$  (36nm ve 47nm,) ve CuO (29nm) partiküllerini kullanmışlardır. Çözeltilerini hacimsel olarak (%1-%9,4) hazırlamışlardır. Kritik olarak belirledikleri hacimsel konsantrasyon %4 tür. Bu değer altında nanoakışkan viskozitesi yaklaşık olarak aynı iken bu değerden daha büyük konsantrasyonlarda partikül boyutu arttıkça akışkan viskozitesinin de arttığı sonucuna varmışlardır. Yine, (Nguyen *et al.* 2008) yaptıkları çalışmada partikül boyutunun akışkan viskozitesini artırdığını belirtmişlerdir.

(Prasher *et al.* 2006a) nanoakışkan termofiziksel özelliklerini inceledikleri bir çalışmada  $Al_2O_3$ -PG (polietilen glikol) karışımını kullanmışlardır. Farklı boyutlardaki (27nm, 40nm, 50nm) partiküllerin nanoakışkan viskozitesini artırdığı sonucuna varırken partikül boyutundaki değişimin akışkan viskozitesini nasıl değiştirdiği konusunda tam bir yorum getirememişlerdir. (Timofeeva *et al.* 2011) ise SiC (16nm, 29nm, 66nm, 99nm) nanopartiküllerini kullandıkları çalışmalarında tanecik boyutunun artışına karşılık viskozitenin azaldığını belirtmişlerdir.

(Murshed *et al.* 2008a)  $TiO_2$  (15nm) ve  $Al_2O_3$ (80nm) partiküllerini kullanarak nanoakışkanlarda ki viskozite artışını incelemiştir. Sonuçta  $TiO_2$  nanoakışkanında %86 artış gözlerken buna karşılık  $Al_2O_3$  nanoakışkanında ise %80 artış meydana gelmiştir. Aynı şekilde (Garg *et al.* 2008) Cu-EG nanoakışkanı için yaptıkları çalışmada nanoakışkan viskozitesinin %24 arttığını belirtmişlerdir.

(Anoop *et al.* 2009b) temel akışkana göre nanoakışkan viskozitesindeki değişimi incelemek için farklı boyutlarda (45nm, 150nm, 95nm, 100nm)  $Al_2O_3$  nanopartiküllerini kullanmışlardır. %8 ve %6 hacimsel konsantrasyonlar için aldıkları veriler neticesinde partikül boyutundaki artışın viskozite artışını azalttığını belirtmişlerdir. (Duangthongsuk and Wongwises 2009) ve (Turgut *et al.* 2009) 21nm boyutundaki  $TiO_2$  partiküllerinin saf sudaki viskozite davranışını incelemiştir ve klasik akışkana nanopartikül ilavesinin viskoziteyi ciddi seviyede artırdığı sonucuna varmışlardır. Nanopartikül ilave

edilerek oluşturulmuş farklı türdeki nanoakışkanların viskozite değişimi için yapılmış çalışmalar Çizelge 2.4’de özet halinde verilmiştir.

**Çizelge 2.4.** Nanoakışkan viskozitesindeki artış için literatür çalışma özetleri (Sundar *et al.* 2013b)

Partikül	Boyut(nm)	Temel akışkan	Yöntem	Hacimsel konsantrasyon %	Viskozite artışı %	Kaynak
AlN	50	EG	İki adım	0.1	1.195	(Yu <i>et al.</i> 2011)
AlN	50	PG	İki adım	0.1	1.375	(Yu <i>et al.</i> 2011)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<50	Su	İki adım	0.1-1	37-49	(Peyghambarzadeh <i>et al.</i> 2011b)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30	Su	İki adım	0.3	2.90	(Lee <i>et al.</i> 2008)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36	Su	İki adım	13	210	(Nguyen <i>et al.</i> 2007; Nguyen <i>et al.</i> 2008)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47	Su	İki adım	13	430	(Nguyen <i>et al.</i> 2007; Nguyen <i>et al.</i> 2008)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<50	Motor yağı	İki adım	1.5	136	(Kole and Dey 2010c)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43	Su	İki adım	5	136	(Chandrasekar <i>et al.</i> 2010)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27 40 50	PG	İki adım	3	29 36 24	(Prasher <i>et al.</i> 2006b)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80	Su	İki adım	5	82	(Murshed <i>et al.</i> 2008a)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28	Su, EG	İki adım	6 3.5	86 39	(Wang <i>et al.</i> 1999)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25	CMC	İki adım	0.2		(Hojjat <i>et al.</i> 2011)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45 150 95 100	Su	İki adım	8 8 6 6	6 3 77 57	(Anoop <i>et al.</i> 2009b)
CaCo <sub>3</sub>	50	Su	İki adım	4.11	69	(Zhu <i>et al.</i> 2010)
Cu	200	EG	İki adım	2	24	(Garg <i>et al.</i> 2008)
CuO	11 37	Su	İki adım	10 wt%	73 11.5	(Pastoriza-Gallego <i>et al.</i> 2011)
CuO	152	EG	İki adım	6	32	(Anoop <i>et al.</i> 2009a)
CuO	50	CMC	İki adım	0.2		(Hojjat <i>et al.</i> 2011)
SiC	<100	Su	İki adım	3	102	(Lee <i>et al.</i> 2011)

**Çizelge 2.4.** (devam)

SiO <sub>2</sub>	35 94 190	Etanol	İki adım	5 6 7	95 85 44	(Chevalier <i>et al.</i> 2007)
TiO <sub>2</sub>	15	Su	İki adım	5	86	(Murshed <i>et al.</i> 2008a)
TiO <sub>2</sub>	95	Su	İki adım	1.18	11	(He <i>et al.</i> 2007)
TiO <sub>2</sub>	21	Su	İki adım	2	15	(Duangthongsuk and Wongwises 2009)
TiO <sub>2</sub>	10	CMC	İki adım	0.2		(Hojjat <i>et al.</i> 2011)
TiO <sub>2</sub>	21	Su	İki adım	3	135	(Turgut <i>et al.</i> 2009)

(Anoop *et al.* 2009a) CuO (152nm) partikülünü kullanarak etilen glikol bazlı CuO-EG nanoakışkanın viskozitesini sıcaklıkla değişimini incelemişlerdir. Çalışma sıcaklıkları 20-50°C aralığında tutularak veriler rapor edilmiştir. Sonuç olarak akışkan viskozitesinin sıcaklık artışıyla azaldığını tespit etmişlerdir. (Kole and Dey 2010c) farklı hacimsel konsantrasyonlarda (%0.1 ve %1.5) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Su nanoakışkanı hazırlayarak 10-50°C sıcaklık aralığında viskozite değerlerini belirlemişlerdir. Sıcaklık artışına karşılık viskozite düşüşüne dikkat çekmişlerdir.

(Gallego *et al.* 2011) aynı şekilde 283.15K-323.15K sıcaklık aralığında CuO-Su nanoakışkanı için viskozite değişimini incelemişlerdir. Deneylerinde 11nm ve 37nm olmak üzere iki nanopartikül kullanmışlardır ve sıcaklık artışının viskozite değerinin azalması yönünde etki gösterdiğini belirtmişlerdir.

Literatürde nanoakışkanların viskozitelerini hesaplamak için bazı klasik modeller mevcuttur. Bu klasik modellerin yanı sıra araştırmacılar tarafından türetilmiş partikül çeşidi, partikül şekli, temel akışkan türü, hacimsel partikül oranı gibi parametrelere bağlı eşitliklere rastlamak mümkündür. Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.6'da literatürde belirli şartlar altında türetilmiş ve uygulamalarında bazı kısıtlamalar bulunan viskozite modelleri özet halinde verilmiştir.

**Çizelge 2.5.** Viskozite için klasik modeller (Kumar *et al.* 2012)

Model ismi	Eşitlikler	Açıklama
(Einstein 1906)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi$	Hacimsel konsantrasyonu 0.02 den büyük yada eşit olan küresel partiküller için
(Krieger and Dougherty 1959)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left[1 - \frac{\phi_p}{\phi_m}\right]^{-\eta\phi_m}$	Rastgele tekil dağılmış küresel parçacıklar için maksimum 0.64 lük topaklanmalarda geçerlidir.
(Nielsen 1970)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (1 + 1.5\phi_p)e^{\frac{\phi_p}{(1-\phi_m)}}$	Güç kanunu modeli ve 0.02'den büyük hacimsel konsantrasyonlar için uygundur.
(Batchelor 1977)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2$	Brownian hareketi dikkate alındı.

**Çizelge 2.6.** Viskozite için sayısal modeller (Kumar *et al.* 2012)

Model ismi	Eşitlikler	Açıklama
(Eilers 1941)	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_m} = 1 + 2.5\phi + [1.5625 + 2.5/(\phi_{max})]\phi^2 + \dots$	Maksimum hacim kesri temeline dayanır. Küre için, $0.5236 \leq \phi_{max} \leq 0.7405$
(De Bruijn 1942)	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_m} = 1 + 2.5\phi + 4.698\phi^2$	Küresel nanopartiküller için geçerlidir.
(Vand 1948)	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_m} = 1 + 2.5\phi + 7.349 + \dots$	Küresel nanopartiküller için geçerlidir.
(Saitô 1950)	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_m} = 1 + 2.5\phi + 2.5\phi^2 + \dots$	Viskozitenin hacim kesrine bağlı olduğu rapor edilmiştir.
(Mooney 1951)	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_m} = 1 + 2.5\phi + [3.125 + (2.5 / \phi_{max})]\phi^2$	Küresel partiküller için geçerlidir ( $0.5236 \leq \phi \leq 0.7405$ ).
(Fullman 1991)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + a \frac{1}{\lambda^n}$ , burada $\lambda = \frac{2}{3}d \frac{(1-\phi)}{\phi}$	Malzeme yapısına bağlıdır.
(Simha 1952)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi + [125/64\phi_{max}]\phi^2$	Küresel partiküller için geçerlidir ( $0.5236 \leq \phi \leq 0.7405$ ).
(Brinkman 1952)	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}}$	Einstein'nın modelinde düzeltme yapılmıştır.
(Frankel and Acrivos 1967)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{9}{8} \left[ \frac{(\phi/\phi_m)^{1/3}}{1 - (\phi/\phi_m)^{1/3}} \right]$	Küresel partiküller için geçerlidir ( $0.5236 \leq \phi \leq 0.7405$ ).



Çizelge 2.6. (devam)

(Lundgren 1972)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi + \frac{25}{4}\phi^2 + 0(\phi^3)$	Taylor ve Series modellerinden türetilmiştir.
(Graham 1981)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi + 4.5 \left[ \frac{1}{\frac{h}{d_p} \left( 2 + \frac{h}{d_p} \right) + \left( 1 + \frac{h}{d_p} \right)} \right]$	Parçacıklar arası boşluk ve hacim kesri temellidir.
(Kitano <i>et al.</i> 1981)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left[ 1 - \left( \frac{\phi}{\phi_m} \right) \right]^{-2}$	İki fazlı akış temeline dayanır.
(Pak and Cho 1998)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2)$	Oda sıcaklığı referans alınarak türetilmiştir.
(Chung <i>et al.</i> 1984)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi + \left( \frac{35}{8} + \frac{5}{4}\beta \right) \alpha^2 + \left( \frac{105}{16} + \frac{35}{8}\beta \right) \alpha^{3+\dots}$	Kinetik gaz teorisi temelinde parçacıklar arası boşluklar göz önüne alınmıştır.
(Kumar <i>et al.</i> 2012)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + \eta\phi + k_H\phi^2 + \dots$	Partikül ve temel akışkan viskozitesi hesaplamada kullanılmıştır.
(Brinkman 1952)	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 7.3\phi + 123\phi^2$	Partikül hacim kesrinin viskozitedeki önemi vurgulanmıştır.
(Drew and Passman 2006)	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi$	İki fazlı karışımların küresel parçacıkların seyreltik süspansiyonları için formüleleştirilmiştir.
(Tseng and Lin 2003)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 13.47e^{35.98\phi}$	TiO <sub>2</sub> -su nanoakışkanı için türetilmiştir.
(Maïga <i>et al.</i> 2004)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 123\phi^2 + 7.3\phi + 1$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –su nanoakışkanı için türetilmiştir.
(White and Corfield 2006)	$\ln \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = a + b \left( \frac{T_0}{T} \right) + c \left( \frac{T_0}{T} \right)^2$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –su nanoakışkanının viskozite-sıcaklık fonksiyonu olarak oluşturulmuştur.
(Koo and Kleinstreuer 2005)	$\mu_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \rho_m \phi_p \sqrt{\frac{K_B T}{2\rho_p r_p}} \left[ (-134.63 + 1722.3\phi_p) + (0.4705 - 6.04\phi_p)T \right]$	Brownian hareketinden dolayı viskozitedeki artış belirler. CuO nanoakışkanı için geçerlidir.

Çizelge 2.6. (devam)

(Kulkarni <i>et al.</i> 2006)	$\ln(\mu_{nf}) = -(2.8751 + 53.548\phi - 107.12\phi^2) + (1078.3 + 15857\phi + 20587\phi^2)(1/T)$	Sıcaklığa bağlı modeldir(5 °C-50°C.).
(Nguyen <i>et al.</i> 2007)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (2.1275 - 0.0215T + 0.00027T^2)$	Sıcaklığa bağlı viskozite modelidir.
(Chung <i>et al.</i> 1984)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + \eta\phi + (\eta\phi)^2 + (\eta\phi)^3$	Küresel partiküllerin %35 e kadar hacimsel kesri için geçerlidir.
(Avsec and Oblak 2007)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + \eta\phi + (\eta\phi_e)^2 + (\eta\phi_e)^3$	%35 e kadar hacimsel kesir için geçerlidir.
(Namburu <i>et al.</i> 2009)	$\text{Log}\mu_{nf} = Ae^{BT}$	Sıcaklığa bağlı modeldir.
(Masoumi <i>et al.</i> 2009)	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + \frac{\rho_N V_B d_N^2}{72C \uparrow \delta\mu_F}$	Partiküllerin Brownian hareketini temel alınmıştır. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> parçacıkları için geçerlidir.
(Lundgren 1972)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + b\left(\frac{\phi}{1-\phi}\right)^n$	Elektromanyetik ilaveler ve mekanik-geometrik özellikler göz önünde bulundurulmuştur.
(Kitano <i>et al.</i> 1981)	$\frac{k_{nf}}{k_f} = \left[1 - \left(\frac{\phi}{1-\phi}\right)\left(\frac{a_g}{1-\phi}\right)^{1.2}\right]^{-[\eta]\phi_m}$	KriegerDougherty viskozite modelinden türetilmiştir.

### 2.1.2. Isıl iletkenlik ve viskozite çalışmaları

Nanoakışkan literatür araştırmaları başlığı altında bahsedildiği gibi, temel akışkanların termofiziksel özelliklerinin sınırlı olması yeni akışkan arayışına sebep olmuştur. Isı transfer kabiliyeti yüksek olan nano boyutlu partiküllerin klasik akışkanlar içerisine mekanik olarak karıştırılması neticesinde nanoakışkanlar elde edilmiştir. Bu yeni nesil akışkanların klasik akışkanlara kıyasla daha iyi termal etkiler doğurması kullanımını yaygınlaştırmıştır. Diğer taraftan nanoakışkanların fiziksel özelliklerindeki değişimi tetiklediği deneysel ve sayısal çalışmalarla kanıtlanan parametreler mercek altına alınmıştır. Nanoakışkanların kullanıldığı deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8’de verilmiştir.

**Çizelge 2.7.** Nanoakışkan kullanılan soğutma sistemleri için deneysel çalışma özetleri (Sidik *et al.* 2017).

Araştırmacılar	Nanoakışkan	Sonuçlar
(Peyghambarzadeh <i>et al.</i> 2011a)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Etilen Glikol, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Etilen Glikol /Su ( $\phi$ = 5-20 Etilen Glikol)	$\phi$ = 1 için ısı transferi iyileşmesinde %40 artış gözlenmiştir.
(Chavan and Pise 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su	$\phi$ = 1, termal iletkenlik %3 artmıştır. Maksimum ısı transferi iyileşmesi %40-%45 aralığındadır.
(Raja <i>et al.</i> 2013)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su	$\phi$ = 2, maksimum ortalama ısı transferi iyileşmesi %25 tür , NOx emisyonu %12.5 azalmıştır.
(Zhong <i>et al.</i> 2010)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Etilen Glikol, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Etilen Glikol /Su	Isı transfer katsayısındaki maksimum iyileşme $\phi$ = 5 için %6.52 olmuştur.
(Teng and Yu 2013)	MWCNT- Etilen Glikol /Su (%50 Etilen Glikol)	$\phi$ = 0.4 için MWCNT- Etilen Glikol /Su nanoakışkanında termal iletkenlikteki maksimum iyileşme %49.6 dır. MWCNT partiküllerinin düşük konsantrasyonlarda maksimum verim faktörü %14.1 dir.
(Nieh <i>et al.</i> 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Etilen Glikol /Su (%50 Etilen Glikol)) TiO <sub>2</sub> - Etilen Glikol /Su (%50 Etilen Glikol)	Çalışmada kullanılan nanoakışkanların termal iletkenlikleri yaklaşık %24-%39 artmıştır. $\phi$ = 2 için, maksimum verim faktörleri Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Etilen Glikol /Su nanoakışkanında %27.2 ve TiO <sub>2</sub> - Etilen Glikol /Su nanoakışkanında %14.4 dir.
(Leong <i>et al.</i> 2010)	CuO-EG	$\phi$ = 2 için pompalama gücü klasik akışkana kıyasla %12.13 artmıştır. Isı transfer hızı yaklaşık %3.8 iyileşmiştir.
(Sarkar and Tarodiya 2013)	CuO, SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> - Etilen Glikol /Su (80% Su, 20% Etilen Glikol)	Isı transfer hızı SiC nanoakışkanında %15.34 artış gösterirken Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> için 14.33%, TiO <sub>2</sub> için %14.03, ve CuO %10.2 iyileşme ile sonuçlanmıştır.
(Heris <i>et al.</i> 2014)	CuO- Etilen Glikol /Su (%40 EG, %60 Su)	$\phi$ = 0.8 de ısı transfer iyileşmesi yaklaşık %55 olmuştur.

Çizelge 2.7. (devam)

Araştırmacılar	Nanoakışkan	Sonuçlar
(Kole and Dey 2010c)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Etilen Glikol /Su (%50 EG, %50 Su)	$\varphi = 0.4$ e kadar eklenen partiküller Newton olmayan akış davranışı göstermiştir.
(Peyghambarzadeh <i>et al.</i> 2013)	CuO–Su, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –Su	$\varphi = 0.65$ için ısı transfer katsayısı %9 artmıştır.
(Liu <i>et al.</i> 2013)	elmas–engine oil	Nanoakışkan motor gücünü maksimuma çıkararak motor performansını %1.15 ve torku %1.18 artırmıştır artırmaktadır. Yakıt tüketimi ise göreceli olarak %1.27 azalmıştır.
(Naraki <i>et al.</i> 2013)	CuO–Su	$\varphi = 0.4$ için, nanoakışkanın ortalama ısı transfer katsayısındaki iyileşme yaklaşık %8 artmıştır..
(Hussein <i>et al.</i> 2014b)	TiO <sub>2</sub> –Su, SiO <sub>2</sub> –Su	Isı transfer hızındaki iyileşme, TiO <sub>2</sub> için %20 ve SiO <sub>2</sub> için %32 olmuştur.
(Hussein <i>et al.</i> 2014a)	SiO <sub>2</sub> –Su	Maksimum ısı transfer iyileşmesi %46 dır ( $\varphi = 2.5$ ).
(Hussein <i>et al.</i> 2014c)	SiO <sub>2</sub> –Su, TiO <sub>2</sub> –Su	Nusselt sayısındaki iyileşme, TiO <sub>2</sub> –Su nanoakışkanında %11 ve SiO <sub>2</sub> –Su nanoakışkanında %22.5 tir.
(Ebrahimi <i>et al.</i> 2014)	SiO <sub>2</sub> –Su	Isı transferi %9.3 temel akışkana göre iyileşmiştir ( $\varphi = 2.5, 60^{\circ}\text{C.}$ )
(Tzeng <i>et al.</i> 2005)	CuO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , antifoam –transmission oil	En iyi ısı transferi ve en düşük ısı transfer dağılımı CuO nanoakışkanında tespit edilmiştir.
(Zhang <i>et al.</i> 2007a)	CuO–coolant	$\varphi = 3$ için nanoakışkanın soğutma kapasitesi %15 artmıştır.
(Saripella <i>et al.</i> 2007)	CuO–Etilen Glikol/Su (%50:%50)	Nanoakışkanların daha yüksek ısı transfer katsayısı motor gücünü, soğutucu pompa hızını ve gücünün artırmasıyla sonuçlanmıştır.
(Ali <i>et al.</i> 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –Su	$\varphi = 1$ de ısı transfer katsayısı %14.79 soğutucu ısı transferinde %14.79 ve Nusselt sayısında %9.51 iyileşme görülmüştür.

Çizelge 2.7. (devam)

(Mohammadi <i>et al.</i> 2009)	$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - motor yağı, CuO- motor yağı,	Termal iletkenlikte maksimum iyileşme $\varphi= 2$ için, $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -motor yağı nanoakışkanında %5 iken CuO-motor yağı nanoakışkanında %8 dir.
(Kole and Dey 2010a)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Etilen Glikol	$\varphi= 2$ ve 50°C sıcaklıkta, ısıl iletkenlikte %4.5 artış olmuştur.
(Vasheghani 2012)	AlN- motor yağı, $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - motor yağı, $\gamma$ - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - motor yağı	Farklı partikül boyutlarında, $\varphi= 3$ de termal iletkenlik, AlN nanoakışkanı için %75.23, $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20nm) için %37.49, $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (20 nm) için %31.47 ve $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (100 nm) için %26.1 artış göstermiştir.
(Kole and Dey 2010b)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Etilen Glikol	(80°C de $\varphi= 3.5$ ) ısı transferi iyileşmesi %11.25
(Ahmadi <i>et al.</i> 2013)	MWCNT-engine oil	(20°C de $\varphi= 0.5$ ) termal iletkenlik %12.7 artmıştır.
(Elias <i>et al.</i> 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Etilen Glikol /Su (50:50)	$\varphi= 0.5$ de termal iletkenlik %8.3 artmıştır.
(Chougule and Sahu 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su, CNT-Su	$\varphi= 1$ için, termal iletkenlikler CNT-Su nanoakışkanında %76, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su nanoakışkanında %18 artmıştır. Isı transfer iyileşmesi ise CNT-Su nanoakışkanında %90.76 ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su nanoakışkanında %52.03 dir.
(Peyghambarzadeh <i>et al.</i> 2011b)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su	Termal iletkenlik $\varphi= 1$ için %3 iken ısı transferi iyileşmesi %45 artmıştır.

Çizelge 2.8. Sayısal çalışma özetleri (Sidik *et al.* 2017).

Araştırmacılar	Nanoakışkan	Sonuçlar
(Lv <i>et al.</i> 2010)	Cu-Su, Cu-motor yağı	Nanopartikül hacimsel konsantrasyonu %5 olan Cu-Su nanoakışkanının ısı transfer katsayısı ve ısı dağıtım kapasitesi saf suya göre yaklaşık %46 ve %43.9 daha iyidir.
(Vajjha <i>et al.</i> 2010)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Etilen glikol/Su (%60;%40)CuO-Etilen glikol/Su (%60;%40)	Temel akışkan olarak etilen glikol ve su karışımı kullanılan nanoakışkana hacimsel %10 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanopartikül ilavesi ısı transfer katsayısını %94 artırırken, hacimsel CuO-Etilen glikol/Su nanoakışkanı %89 artırmıştır.

Çizelge 2.8. (devam)

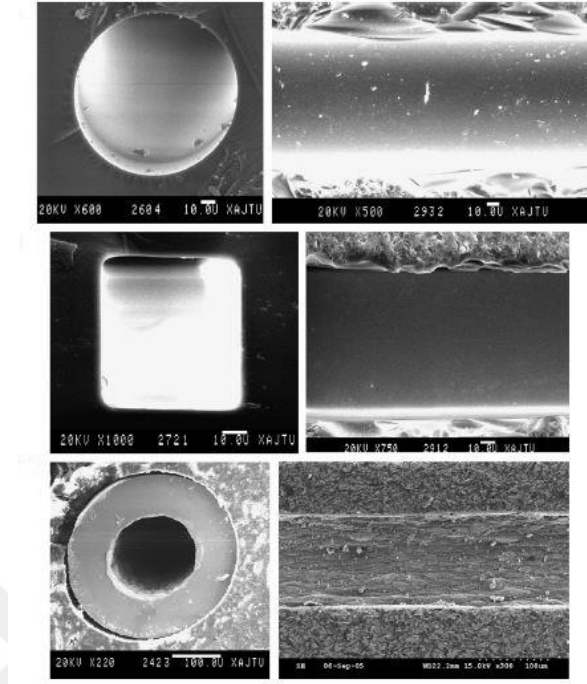
Araştırmacılar	Nanoakışkan	Sonuçlar
(Huminiç and Huminiç 2012)	Cu-Etilen glikol	Farklı Reynolds sayılarında yapılan çalışmada en yüksek ısı transfer iyileştirmesi %82 ile 125 Reynolds sayısında elde edilmiştir.
(Vajjha <i>et al.</i> 2015)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Etilen glikol/Su (%60;%40), CuO-Etilen glikol/Su (%60;%40)	5500 Reynolds sayısı için, ortalama ısı transfer katsayısında hacimsel %3 nanopartikül içeren nanoakışkanlar oluşturmuşlardır. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanoakışkanında temel akışkana göre %36,6 artış meydana gelirken CuO nanoakışkanında %49,7 artış gözlemlenmiştir.
(Huminiç and Huminiç 2013)	CuO-Etilen glikol	Nanoakışkanların ısı taşınım katsayısı saf etilen glikol'den daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Düz ve eliptik tüpler için sayısal çalışmalarını yürütmüşlerdir. Kanal şeklinin ısı transfer katsayısı üzerine etkisini incelemişlerdir. ısı transfer katsayısı eliptik tüplerde göreceli olarak azalmıştır.
(Abbasi and Baniamerian 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Au, CuO, TiO <sub>2</sub> -Su/Buhar	İki fazlı akış da yaptıkları incelemede, buhar miktarının artmasının ısı transfer katsayısını olumsuz yönde etkilediği sonucuna varmışlardır. Buna rağmen iki fazlı akışta en iyi sonuç sırasıyla Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , Au ve CuO nanoakışkanlarında görülmüştür.
(Hatami <i>et al.</i> 2014)	CuO-Su, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Su, TiO <sub>2</sub> -Su, Etilen glikol-Su (%50;%50)	En iyi ısı transfer kabiliyeti TiO <sub>2</sub> -Su Nanoakışkanında gözlemlenmiştir.
(Delavari and Hashemabadi 2014)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -water, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -EG	Tek faz ve iki faz yaklaşımını kullanarak ısı transferini iyileştirmeye çalışmışlardır. İki faz yaklaşımının tek faz yaklaşımına göre daha iyi sonuç verdiği sonucuna ulaşmışlardır.

## 2.2. Mikrokanal Literatür Özetleri

Teknolojik gelişmeler ve kullanım avantajları sonucu küçük boyuttaki cihazlar hayatımızın birçok alanında kullanım yeri bulmuştur. Boyutları küçülen cihazlar çalışır durumdayken yüksek miktarda ısı atmak zorundadırlar. Bu noktada, mikrokanallardaki ısı transferi karakteristiği ön plana çıkmaktadır.

Son yıllarda MEMS uygulamalarındaki hızlı gelişmeler kılcal boruların sistemlerde yaygın kullanımını da beraberinde getirmiştir (Jong *et al.* 2007). Dikdörtgensel mikrokanallardaki akışı Navier-Stokes denklemleriyle matematiksel bir model oluşturarak incelemiştir. Yer çekimi ve kılcallık etkisini araştırdıkları çalışmada akışkanın mikrokanallar içerisinde ki akış süresinin tahmini için bir iterasyon oluşturmuşlardır. Kanal yüksekliği azaldığı zaman yer çekimi kuvvetlerinin akış üzerindeki etkisi azalırken kılcal kuvvetlerin etkisinin arttığı sonucuna varmışlardır.

(Tang *et al.* 2007) yaptıkları çalışmada He ve Nitrojen gazlarının, farklı çaplardaki (50  $\mu\text{m}$ - 201  $\mu\text{m}$ ) kaynatılmış silika mikrotüplerdeki, farklı hidrolik çaplardaki (52  $\mu\text{m}$ - 100) kaynatılmış kare mikrokanallarda ve çapları 119  $\mu\text{m}$ - 300  $\mu\text{m}$  aralığında değişen paslanmaz çelik tüplerdeki akış karakteristiğini incelemiştir. Mikrokanallardaki gaz akışında sıkıştırılabilirlik, seyreltme ve yüzey pürüzlülüğü etkilerini incelemiştir. Deneysel çalışma verilerine, göre kaynatılmış mikrokanal ve tüplerdeki sürtünme faktörü sonuçları literatürdeki diğer sonuçlara uyum göstermektedir. Fakat paslanmaz çelik mikrokanallardaki sürtünme faktörü konvansiyonel kanallara göre çok daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi olarak paslanmaz çelik kanalların yüzey pürüzlülüğünü göstermişlerdir. Nispeten daha az yüzey pürüzlülüğüne sahip (%1'den az) kanallarda ki gaz akışında konvansiyonel laminer tahminlerin uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Gaz akışkanların sıkıştırılabilir olması sebebiyle konvansiyonel teoriden pozitif bir sapma olduğunu ifade etmişlerdir.



**Şekil 2.2.** Mikrokanal SEM görüntüleri (Tang *et al.* 2007)

De-iyonize su ve PAM solüsyonunun mikrokanallardaki non-Newtonian akışı üzerine deneysel çalışma yapan (Tang *et al.* 2012) geniş bir Re sayısı skalasında çalışmışlardır. Deneysinde, çapları 75  $\mu\text{m}$ - 250  $\mu\text{m}$  aralığında değişen silika mikrotüpler, hidrolik çapları 75  $\mu\text{m}$ - 100  $\mu\text{m}$  aralığında değişen kare mikrokanallar ve çapları 120  $\mu\text{m}$ - 300  $\mu\text{m}$  arasında değişen paslanmaz çelik mikrotüpler kullanmışlardır. Pürüzsüz silika mikrokanallardaki de-iyonize su için elde ettikleri sürtünme faktörü değerlerinin konvansiyonel kanallar için yapılan teorik tahminlerle iyi bir uyum içerisinde olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca hidrofobik şartlar altında de-iyonize su ve PAM solüsyonunun akış davranışını incelemişlerdir. Hidrofobik pürüzsüz silika mikrokanallarda ki akış direnci pürüzlü kanallara göre azaldığı görülmüştür. Yüzey incelmesi üzerine yüzey ıslanabilirlik etkisi PAM solüsyonun da Newtonian de-iyonize suya göre daha belirgin olduğu ifade edilmiştir.

(Chu *et al.* 2010) ise farklı yuvarlatma çapı ve kanal genişliğine sahip yuvarlatılmış dikdörtgenel mikrokanallar için akış karakteristiğini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sıkıştırılmaz ve izotermik laminer akış ( $80 < \text{Re} < 876$ ) şartlarında



gerçekleştirdikleri çalışmada, kanal genişliğinin basınç düşüşü üzerinde oldukça etkili olduğunu belirtmişlerdir. Kanal yuvarlatma çapının artmasına karşılık basınç düşüşünün arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca sürtünme faktörü için elde ettikleri deneysel sonuçları yüzde 10 dan az bir hatayla sayısal olarak da doğrulamışlardır.

**Çizelge 2.9.** Yuvarlatılmış dikdörtgenel mikrokanalların geometrik parametre değerleri (Chu *et al.* 2010)

Kanal tipi	Kanal genişliği, $w(\mu\text{m})$	Kanal yüksekliği, $h(\mu\text{m})$	Yuvarlama yarıçapı, $R_c(\mu\text{m})$	Boy-en oranı, $\sigma$	Yuvarlama oranı, $\lambda$
C1	200	200	5000	1	0,04
C2	300	200	5000	0,667	0,048
C3	300	200	7500	0,667	0,032
C4	400	200	7500	0,5	0,035

Mikrokanallar yüzey alanları sebebiyle konvansiyonel kanallara göre daha yüksek miktarda ısıyı transfer edebilmektedirler. Elektronik ekipmanların doğru ve güvenilir sonuç verebilmeleri için uygun çalışma sıcaklıklarında çalıştırılmaları gerekmektedir. Bu durumda hem tek fazlı hemde çift fazlı akışlar için ısı akılarının uygun yöntemle ortamdaki uzaklaştırılmaları elektronik bileşenlerin uzun ömürlü kullanılmaları için önem taşımaktadır. Mikrokanallarda ısı transferini etkileyen parametrelerin kontrolünü sağlamak ve maksimum ısı akısını transfer etmek için optimum kanal geometrisi ile ilgili olarak literatürde sayısal ve deneysel çalışmalar mevcuttur.

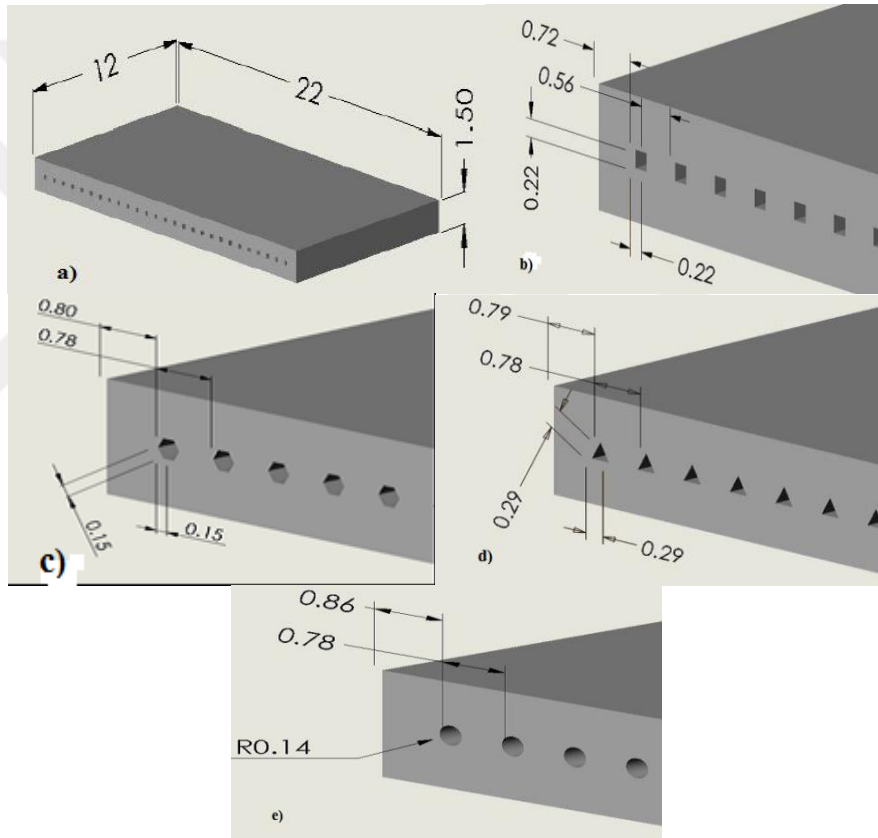
(Mokrani *et al.* 2009) hidrolik çapları 1mm – 100  $\mu\text{m}$  arasında değişen dikdörtgenel mikrokanallar için akışkan akışı ve konvektif ısı transferini incelemişlerdir. Akışın sürtünme katsayısını tam gelişmiş akış bölgesinde basınç düşüşünü doğrudan ölçerek belirlemişlerdir. Mikrokanalların yüzeylerinde farklı noktalardan aldıkları sıcaklık değerleri ile ters iletim metodunu kullanarak kanallar içerisindeki termal şartları tahmin edebilmişlerdir. Laminer akıştan türbülanslı akış bölgesine geçişin geniş ölçekli kanalların geçiş aralığına yakın olduğu sonucuna varmışlardır.

(Dang and Teng 2011) mikro kanal ısı değiştiricileri performansında etkili olabileceğini dūřündükleri konfigürasyonları deneysel olarak çalışmışlardır. Bu parametreleri olarak alt tabaka kalınlığı, kesit alanı ve giriş-çıkış yerleşimleri olarak belirlemişlerdir. İki kategoride akışkan akış şartları (sıcak tarafın değişen giriş sıcaklığı ve soğuk tarafın değişen kütlelel debisi) belirleyerek inceledikleri parametrelerin mikro kanal ısı değiştiricisinin performansında ciddi etki gösterdiklerini saptamışlardır. Kesit alanının performans indeksine (ısı transfer hızının basınç dūřüřüne oranı) etkisi kalınlıktan daha fazla olmuştur. Hidrolik çaptaki azalmayla ters orantılı bir şekilde ısı akısı ve basınç dūřüřleri artmıştır. Ayrıca en yüksek basınç kaybı 506 Pa ile I tipi kanalın aksine S tipi kanallarda görölmüştür.

Mikro kanalların termal performansı yüzey pürüzlüğünden bir hayli etkilenirler, bu durumu incelemek üzere (Shen *et al.* 2006) göreceli pürüzlüğü %4-6 olan mikro kanallarda ısı transfer karakteristiğini incelemişlerdir. Bu amaçla 800µm yüksekliğinde ve 300µm genişliğinde 26 adet dikdörtgenlel kanaldan oluşan kompakt soğutucu kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarında de-iyonize su kullanmışlardır. Sabit sıvı giriş sıcaklığı (30°C, 50°C ve 70°C) ve 140-450W sabit ısı akısında şartları uygulanmıştır. Sürtünme katsayısı, yerel ve ortalama Nusselt sayılarının muhtemel yüzey pürüzlüğü etkilerinden dolayı konvansiyonel teorilerden önemli derecede ayrıldığı sonucuna ulaşmışlardır.

Mikro kanallarda akış karakteristiği ve ısı transfer hızında büyük önem taşıyan yüzey pürüzlüğünü inceleyen bir diğer araştırmacı (Yuan *et al.* 2016) alışmalarını dairesel kanallarda uygulamıştır. Bütün test parçalarını 0,4mm çapında ve 10mm uzunluğunda 44 eř paralel mikrokanaldan oluşturmuştur. Farklı yüzey pürüzlüğüne (Ra=0.86 µm, 0.92 µm, 1.02 µm) sahip üç tip mikrokanal diziliminde 150-2800 arasında değişen Reynolds değerlerini kullanmışlardır. Göreceli yüzey pürüzlüğünde ki artış Poiseuille ve Nusselt sayılarının artışı ile karşılık bulurken diğer taraftan sürtünme katsayısını artırmaktadır. Ayrıca laminer akıştan türbölanslı akışa geçiş (Re=1500) makro kanallardan daha erken olmuştur. Kurulu sistemin ısı transfer etkinliği için, kanal yüzey pürüzlüğünün artışının ısı transfer hızını dūřürdüęünü ifade etmişlerdir.

(Singh *et al.* 2015) kanal geometrisinin ısı transfer hızı ve basınç düşüşü üzerindeki etkisini incelemek için dikdörtgensel, üçgensel, dairesel, altıgen kesitli mikrokanal dizilimlerini kullanmışlardır. Sayısal olarak tamamladıkları bu çalışmada n-oktan akışkan bir kenarı adyabatik diğer kenarı sabit 55°C derece ısıtılan kanallara 0,1 m/s hızda ve 5°C akışkan sıcaklıkta girmektedir. Ayrıca kanal sayısını (9, 18, 27) ve Re sayısını (100-1000) değiştirerek ısı transfer hızı ve basınç düşüşü etkilerini incelemişlerdir.



**Şekil 2.3.** a) Mikro kanal soğutucu şekli b) dikdörtgensel kesitli mikro kanal c) altıgen kesitli mikro kanal d) üçgensel kesitli mikro kanal e) dairesel kesitli mikrokanal (Singh *et al.* 2015)

Mikro kanal yüzeylerinin ısı çekme performansı bir diğer yüzey özelliği olan ıslatan ve ıslatmayan yüzeylerden etkilenmektedir.(Hsieh and Lin 2009) De-iyonize su, metanol, su-metanol karışımı ve etanol akışkanlarının, tek yüzeyi ısıtılan (asimetrik ısıtılmış yüzeyler) dikdörtgen kesitli mikrokanallarda ısı transferi karakteristikleri çalışılmıştır. En-boy oranı 0,56 ve hidrolik çapı 129  $\mu\text{m}$  olan mikro kanallarda 5-240 Re sayılarında

çalışılmıştır. Kanallar hem izotermal (0°C) hemde sabit ısı akısında (12,6 mW/mm<sup>2</sup>, 18.1 mW/mm<sup>2</sup>, 32.3 mW/mm<sup>2</sup>, 50.5 mW/mm<sup>2</sup>) ısıtılmıştır. Islatmayan yüzeyli mikro kanallarda yüzeye yakın noktalarda kayma hızı elde edilmiştir. Test akışkanları için ısılatan yüzeyli mikrokanallar da hem yerel hem de ortalama ısı transferi açısından daha verimli sonuçlar alınmıştır.

### 2.1.3. Nanoakışkan kullanılan mikrokanallarda literatür çalışmaları

(Jang and Choi 2006) mikrokanallı soğutucuların performansı üzerine yaptıkları sayısal çalışmada, iki farklı (6 nm Bakır-Su, 2 nm Elmas-Su) nanoakışkan çeşidinin farklı konsantrasyonları üzerine çalışmışlardır. 2.25 W sabit pompa gücünde hacimsel %1, 2nm elmas-su nanoakışkanı içeren mikrokanal soğutucunun performansı sadece saf su içeren mikrokanal soğutucuya göre yaklaşık %10'a kadar iyileştiğini göstermişlerdir. Ayrıca nanoakışkanların, ısınmış mikrokanal duvarları ve soğutucu arasındaki hem termal direnci hem de sıcaklık farkını azalttığı sonucuna varmışlardır.

(Lee and Mudawar 2007) tek ve iki faz için dikdörtgen kesitli (215 µm, 821 µm) mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transfer hızı, basınç düşüşü, akışın aksel değişimi, akış kararlılığı ve bulk sıcaklıkları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nanoakışkan olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-HFE7100 kullanmışlardır. Ayrıca çalışmalarında nanoakışkanı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülleri bakımından farklı konsantrasyonlarda kullanarak nanoakışkan derişiminin parametreler üzerindeki etkisini de inceleme fırsatı bulmuşlardır.

(Jung *et al.* 2009) kare kesitli mikrokanallarda, 170 nm boyutunda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartiküllerinden oluşan farklı konsantrasyonlardaki (%0.6, %1.2, %1.8) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-saf su nanoakışkanlarını kullanmışlardır. Sabit ısı akısında gerçekleştirilen çalışmada nanoakışkanın sürtünme katsayısı ve ısı transfer etkinliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Hacimsel %1.8 konsantrasyonda ki nanoakışkanın ısı taşınım katsayısı bakımından suya göre %32 daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

(Mohammed *et al.* 2011) kare ( $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ ) kesitli 25 adet mikrokanalın birleşiminden oluşan mikrokanal ısı değiştiricisinde dört farklı ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , Ag ve  $\text{TiO}_2$ ) türde ve üç farklı (%2, %5, %10) konsantrasyondaki nanoakışkanları kullanarak Reynolds sayısındaki değişimin ısı transferi ve akış karakteristiği üzerindeki etkisini sayısal olarak çalışmışlardır. Laminer akış ve sabit ısı akısı şartlarında gerçekleştirilen çalışmada sıcaklık profili, ısı transfer hızı, ısı transfer katsayısı, basınç düşüşü, pompalama gücü, etkinlik, ortalama performans indekslerinin kanal boyunca değişimini incelemişlerdir.

(Chen and Ding 2011) farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -su nanoakışkanlı mikrokanal ısı değiştiricisinin zorlanmış ısı taşınımı soğutma performansı ve ısı transfer karakteristiğini araştırmışlardır. Mikrokanal olarak kullandıkları porous ortam için, kanal duvar sıcaklık dağılımlarını, nanopartikül hacimsel oranları ve atalet kuvvet parametreleri indekslerini baz alarak sunmuşlardır. Atalet kuvvetlerinden dolayı toplam termal direnç ve akışkanın sıcaklık dağılımı önemli ölçüde değişirken kanal duvarlarının sıcaklık dağılımının atalet kuvvetlerinden etkilenmediği göstermişlerdir.

(Akbarinia *et al.* 2011) kayma ve kaymama akış rejimlerinde dikdörtgenel mikrokanallar da nanoakışkan kullanımının ısı transferi iyileştirmesi üzerindeki etkilerini düşük Reynolds sayıları için incelemişlerdir. Zorlanmış taşınım şartlarında gerçekleştirilen çalışmada  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Su nanoakışkanının, boyutsuz hız, hız, boyutsuz sıcaklık, boyutsuz yüzey sıcaklıkları profilleri, farklı giriş hızı, farklı hacimsel konsantrasyonlar (%0, %1, %3, %5) ve farklı Knudsen sayıları için elde etmişlerdir.

(Singh *et al.* 2012) mikrokanallardaki nanoakışkanların hidrodinamiğini incelemişlerdir. Bu çalışmada üç farklı hidrolikçapa sahip ( $130\mu\text{m}$ ,  $211\mu\text{m}$  ve  $300\mu\text{m}$ ) mikrokanal, iki farklı boyutta alüminyum-oksit nanopartikülü ( $45\text{nm}$ ,  $150\text{nm}$ ) ve üç farklı alüminyum-oksit konsantrasyonuna sahip (hacimsel %0.25, %0.5, %1) nanoakışkan kullanmışlardır.  $211\mu\text{m}$  ve  $301\mu\text{m}$  mikrokanallarda türbülansa erken geçiş gözlemlemişlerdir. Temel akışkan olarak kullanılan su ve etilen-glikol ile karşılaştırıldığında nanoakışkanların mikrokanallardaki karakteristiğinin farklı olduğu sonucuna varmışlardır.

Mikrokanallardaki nanoakışkanın sürtünme karakteristiği; kanal çapına, partikül konsantrasyonuna ve viskoziteye bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

(Hung *et al.* 2012) mikrokanallarda nanoakışkan kullanarak ısı transfer iyileştirmesini incelemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada,

- Partikül boyutu
- Partikül hacim oranı
- Temel akışkan
- Nanopartikül tipi

Parametrelerine ek olarak pompalama gücünün ısı transferi üzerine etkisini de incelemişlerdir ve artan pompalama gücüne bağlı olarak ısıl direncin düştüğünü ve dolayısıyla ısı transfer hızının arttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının ısı transfer performansı saf suyunkinden %21,6 daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Düşük dinamik viskoziteye sahip temel akışkan (su gibi) ve yüksek termal iletkenlikli materyaller kullanarak mikrokanal ısı değiştiricisinin termal performansını iyileştirmek mümkündür (Hung and Yan 2012). Su bazlı  $Al_2O_3$  ve elmas nanoakışkanlarını kullanarak mikrokanal ısı değiştiricisinin termal performans iyileştirmesini sayısal olarak incelemişlerdir. Soğutucu akışkana nanopartikül ilavesi nanopartikül türü, temel akışkan, partikül hacimsel oranı, partikül boyutu ile bağlantılı olarak akışkanın termofiziksel özelliklerini değiştirmektedir. Ayrıca çalışmalarında, pompalama gücünün artmasıyla mikrokanal ısı değiştiricisinin ortalama termal performansının azaldığı sonucuna varmışlardır. Yine (Hung and Yan 2012) yaptıkları çalışmada, iki tabakalı bir mikrokanal ısı değiştiricisinde nanoakışkan kullanımına ek olarak mikrokanal geometrisi üzerinde oynamalar yaparak ısı transfer performansını incelemişlerdir. Bu sayede, kanal açıklık oranı (kanal genişliğinin kanal yüksekliğine oranı), kanal sayısı, kanal genişlik oranı ve pompalama gücünün ısı transfer performansına etkisini araştırmışlardır.

(Tokit *et al.* 2012)  $Al_2O_3$ -su, CuO-su,  $SiO_2$ -su nano akışkanlarının termal performansını kesik mikrokanallı ısı değiştiricisi için incelemiştir. Sayısal analizlerinin sonucunda efektif ısı iletkenlik bakımından en yüksek verim  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanında ve en düşük verim  $SiO_2$ -su nanoakışkanında elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır.

(Fazeli *et al.* 2012)  $SiO_2$ -su nanoakışkanı kullanarak bir minyatür ısı değiştiricisinin ısı transfer karakteristiğini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Soğutucuyu, yüzeyi plexiglass ile yalıtılmış 40mm boyunda 4mm çapında alüminyum mikrokanal kümesinden imal etmişlerdir.  $180 W/cm^2$  sabit ısı akısı ve 400-2000 aralığında değişen Reynolds sayıları için yaptıkları deneylerde, sudaki  $SiO_2$  partiküllerinin dağılımının ortalama ısı transfer katsayısını önemli ölçüde artırdığı ve soğutucunun termal direncini %10 a kadar azalttığı sonucuna varmışlardır. Sayısal analizlerinde ise kanal çapı, kanal sayısı ve kanal uzunluğu parametreleri temelinde basınç düşüşü, elektronik bileşenlerin maksimum sıcaklığı ve ısı transfer etkinliği değişimlerini incelemiştir. Kanal çapının, bir soğutucudaki kanal sayısı ve soğutucu uzunluğu gibi soğutucunun maksimum sıcaklığı üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir.

(Ahmed *et al.* 2016) çift katmanlı dikdörtgen ve üçgen alüminyum mikrokanal ısı alıcıları üzerine yaptıkları çalışmada sırasıyla  $Al_2O_3$ -su ve  $SiO_2$ -su nanoakışkanlarını kullanmışlardır. Farklı kanal sayıları (18N, 20N, 22N, 24N), farklı konsantrasyonlar (%0.3, %0.6, %0.9) ve pompalama güçleri (0.1W, 0.2W, 0.3W, 0.5W) için yaptıkları deneylerde mikrokanalların termal açıdan karakteristiklerini incelemiştir. Kanal türünün, çift katmanlı soğutucular üzerinde etkisi gözlemlemiştir. İki soğutucu mikrokanalın duvar sıcaklıklarını karşılaştırmışlar ve üçgen çift katmanlı mikrokanalın daha uniform ve %27,4 daha düşük sıcaklıklara sahip olduğunu göstermişlerdir. Termal direncin üçgen mikrokanal soğutucuda %16,6 daha küçük olduğunu tespit etmişlerdir. Basınç düşüşü bakımından iki mikrokanal türünde kayda değer bir fark gözlemlememişlerdir. Pompalama gücünü artırarak ısı direnci azaltmanın yanısıra kanal kalınlığını azaltarak ve kanal sayısını artırarak da termal direncin azaltılabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca en düşük termal direnç ( $0.13^\circ C/W \cdot m^2$ ) ve en

iyi ısı performans %0,9 hacimsel konsantrasyondaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanında belirlemişlerdir.

(Sivakumar *et al.* 2016) serpantin mikrokanal ısı değiştiricisi kullanarak zorlanmış taşınım ısı transfer katsayısı üzerine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su ve CuO-su nanoakışkanlarının etkisini incelemişlerdir. Farklı partikül konsantrasyonu ve farklı sıcaklıklar için zorlanmış taşınım ısı transferini analiz etmişlerdir. Reynolds sayısı ve akışkan türüne göre sürtünme faktörü, ısı transfer etkinliği, termal iletkenlik değişimini incelemişlerdir. CuO-su nanoakışkanının, temel akışkan ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanına göre daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca partikül konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak zorlanmış taşınım ısı transfer katsayısında artış gözlemlemişlerdir.

(Yang *et al.* 2016) iş akışkanının nanoakışkan olduğu mikrokanallarda, tam gelişmiş bölge ve sabit ısı akısı şartlarında sabit ısı akısı için zorlanmış taşınım özelliklerini sayısal olarak incelemişlerdir. Hidrodinamik ve termal gelişmiş bölgede yaptıkları çalışmada, viskoz dağılımın ısıtma ve soğutma durumlarında olumsuz etkiye neden olduğunu ve kayma hızının artmasına karşılık ısı transferinin arttığını aynı zamanda basınç düşüşünün azaldığını vurgulamışlardır.

(Alipour *et al.* 2017) gümüş-su nanoakışkanının üç boyutlu trapezoid mikrokanaldaki türbülanslı akış ve ısı transfer parametreleri üzerine etkisini sabit ısı akısı altında sayısal olarak araştırmışlardır. Hesaplamalar 10000 – 16000 Reynolds sayısı aralığında ve dört yönden çentiklenmiş farklı yiv genişliğinin çentik genişliğine oranı için türbülanslı akış bölgesinde yapmışlardır. Sürtünme katsayısı, Nusselt sayısı, ısı transfer katsayısı ve ısı veriminin yiv çentik genişliği oranına bağlı değişimlerini incelemişlerdir. Sayısal model sonuçları, akışkanın konvektif ısı transfer katsayısının, artan Reynolds sayısı ve nanopartiküllerin hacim konsantrasyonu ile arttığını ifade etmişlerdir.

(Anbumeenakshi and Thansekhar 2017) 0.727 mm hidrolik çapa sahip 30 adet dikdörtgenel mikrokanaldan oluşan bir mikrokanal soğutucuyu eş kapasitedeki üç ayrı ısıtıcıyla uniform olmayan ısı akısı şartlarında ve iki farklı konsantrasyonda (%0.1 -



%0.25) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- saf su nanoakışkanını kullanarak ısı performas araştırması yapmışlardır. Akışkan çeşidi, ısı girişi ve ısıtıcı pozisyonu parametrelerinin soğutucu maksimum sıcaklığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Uniform ve uniform olmayan ısıtma şartlarında hacimsel olarak daha derişik nanoakışkanın veri sonuçlarında, daha düşük maksimum yüzey sıcaklığı ve ortalama yüzey sıcaklığı oluştuğu sonucuna varmışlardır. Deneyler sonucunda elde ettikleri ısıl etkinlik değerlerine göre, soğutma uygulamalarında hassas sıcaklık kontrolü sağlamak için mikrokanallarda nanoakışkan kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

(Chabi *et al.* 2017) iş akışkanı olarak %0.1 ve %0.2 hacimsel derişimdeki CuO – su nanoakışkanının kullanıldığı mikrokanal ısı değiştiricisinde ki zorlanmış taşınım ısı transfer karakteristiğini incelemişlerdir. Mikrokanal ısı değiştiricisinin hidroluk performansını, sürtünme faktörünü ve basınç düşüşünü baz alarak belirlemişlerdir. Kritik bir Reynolds sayısı değerine kadar ısı transfer iyileştirmesi yaklaşık %40 lara kadar artarken bu değerden sonra azaldığını belirtmişlerdir.

(Dominic *et al.* 2017) Nanoakışkan kullanılarak dalgalı minikanalların ısı transfer ve basınç düşüşü karakteristiği deneysel olarak araştırmışlardır. Minikanal soğutucu, 30×30mm<sup>2</sup> boyutlarında ve 11 mm kalınlığında alüminyum alt tabaka üzerine yerleştirilmiş 15 adet dikdörtgensel kanaldan oluşmaktadır. Minikanallar, 0.9 mm kalınlığında, 1.8 mm yüksekliğinde ve derinlikleri ise dalgalı kanal girişinde 1.3 mm çıkışında 3.3 mm arasında değişmektedir. Deneyler hidro dinamik ve termal gelişmiş bölgelerde laminer ve geçiş rejimlerinde yürütülmüştür. Çalışma akışkanı olarak De-iyonize su ve %0.5 ve %0,8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoakışkanları kullanmışlardır. Sinüzoidal kanallı minikanalda, düz minikanala göre basınç düşüşü %30-38 daha az iken, ısı transfer performansı %9 daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.

#### **2.1.4. Karma taşınım literatür çalışmaları**

Mikro ve makro boyutlu elektronik cihazların çalışma sıcaklıklarında ki ciddi artışlar uygulamada birçok problemi beraberinde getirmektedir. Büyük endüstriyel

uygulamalarda sıklıkla görülen soğutma mekanizması olarak karma taşınım öne çıkmaktadır. Elektronik cihazların ve endüstriyel uygulamaların bu karmaşası karma taşınım ısı transferi mekanizmasında sağlanan termal iyileştirme ile giderilebilmektedir. Literatürde yapılan araştırmalar neticesinde çalışmaların bu konu üzerine yoğunlaştırıldığı görülmektedir. Önceki çalışmalarda genel itibariyle, Reynolds sayısı ve Grashof sayısı gibi doğal ve zorlanmış akış parametrelerinin veya geometrik parametrelerin değişiminin termal iyileştirme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Karma taşınım mekanizması ile ısı transferi iyileştirilmesi konusunda ilk çalışmalardan birisi olarak karşımıza çıkan ve (Brown and Gauvin 1965) tarafından yapılan çalışmada, silindirik bir hava kanalında ( $D_{iç}= 11,23$  ve  $L=259,08$ ) düşük hızlarda ki ısı transferi incelenmiştir.  $385 < Re < 4,930$  aralığında yapılan çalışmalarda kanal boyunca yüzey sıcaklığı sabit tutulmuştur ( $100^{\circ}C$ ,  $500^{\circ}C$  ve  $950^{\circ}C$ ). Destekleyici akışın karma taşınım mekanizmasına etkilerini incelemek için hava, silindirik kanal boyuna yukarıya doğru yönlendirilmiştir. Laminer destekleyici akış için yerel Nusselt sayısı ( $N_{Gr}/N_{Re}$ ) ile ilişkilendirmişlerdir. Tam gelişmiş bölgede türbülanslı akışta, yerel Nusselt sayısı aksenal konumdan bağımsız olarak Grashof sayısı ile ilişkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır. (Brown and Gavvin 1965) yaptıkları bir başka çalışmada karma taşınım için zıt akış etkilerini incelemişlerdir. Aşağıya doğru yönlendirilmiş hava akımı ile  $425-4650 \text{ kg/sa.m}^2$  aralığında değişen kütleli debi değerlerinde deneysel çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Bu çalışma sonuçlarına göre destekleyici akıştan farklı olarak zıt akışta, Grashof sayısının  $10^6$  mertebeleri için yerel Nussel sayısı grafik eğiminde ciddi bir artış görülmüştür.

(Depew and August 1971) yaptıkları çalışmada, yatay bir boruda laminer akış şartlarında karma taşınım etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri verileri kullanarak iki farklı korelasyon önermişlerdir. Bu korelasyonlar için maksimum hata oranının %40 olduğunu belirtmişlerdir. Temel güç yasası denklemi ile modellenmiş Newtonian olmayan bir akışkanın laminer karma taşınım ile ısı transferi performansı (Tomcej and Nandakvmar 1986) incelemişlerdir. Bu çalışmada, kayma kuvvetlerinin etkili olduğu

ikincil akış nedeniyle sıvılar için kayma inceltme etkisi gözlemişlerdir. Ayrıca Nusselt sayısındaki artışa karşılık Grashof sayısının sürekli arttığını gözlemişlerdir.

Prandtl sayısı, karma taşınım etkilerinin incelenmesinde yol gösterici bir parametredir. (Chou and Hwang 1986) Prandtl sayısının yatay yönlendirilmiş dikdörtgenel bir kanaldaki doğal ve zorlanmış taşınım üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sayısal olarak yapılan çalışmada kanal duvarları sabit bir ısı akısıyla ısıtılmıştır. Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ( $Ra=10^4$ ,  $3 \times 10^4$ ,  $6 \times 10^4$  ve  $10^5$ ) ve Prandtl sayısına göre değişim eğrilerini oluşturmuşlardır. Eksenel olarak sabit ısı girişi ve homojen duvar sıcaklığı şartlarında dikdörtgenel bir kanal için termal giriş bölgesinde laminar karma taşınımı sayısal olarak inceleyen bir başka çalışma (Chou 1990) tarafından yapılmıştır. Farklı en-boy oranına (0.2, 0.5, 1.2 ve 5) sahip dikdörtgenel kanallar ile yapılan bu çalışmada gelişmiş hız ve gelişmiş sıcaklık bölgelerini belirlemek için yeni bir çözüm yöntemi geliştirmek hedeflenmiştir. Sabit ısı akısı sınır şartları altında yapılan önceki çalışmalarla kıyaslandığı zaman sabit duvar sıcaklığı sınır şartlarına göre yapılan bu çalışmada Nusselt sayısının önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Değişen sınır şartlarının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi göreceli olarak küçük olduğu görülmüştür.

(Wu and Perng 1999) blok halinde ısıtılan yatay yönlendirilmiş bir kanaldaki karma taşınım ile ısı transferi iyileştirmesi üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, kanal içerisine eğik plaka yerleştirilerek akış bölgesinde girdap oluşumu sağlanmıştır. Eğik plaka açısı  $30^\circ$ - $90^\circ$  arasında değiştirilerek plaka eğiminin ısı transferindeki etkisi incelenmiştir. 260-530 aralığında değişen Reynolds sayıları için veriler değerlendirilmiştir. Çapraz akışa maruz kalan bir blok üzerine eğik bir plakanın yerleştirilmesi, yatay kanal akışındaki karma taşınım ısı transfer performansını etkin bir şekilde artırdığı sonucuna varmışlardır.

(Islam *et al.* 2001) hava ve suyun çalışma sıvısı olarak kullanıldığı, yatay bir dairesel halka kesitli boru içinde sürekli laminar akış için karma taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelenmişlerdir. Reynolds sayısı aralığı  $200 \leq Re \leq 1000$ , Rayleigh sayısı aralığı

$104 \leq Ra \leq 108$  ve Prandtl sayısı aralığı  $0.7 \leq Pr \leq 5.42$  olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak Prandtl sayısının artışının Nusselt sayısını düşürdüğü gözlemlenmiştir.

(Teamah *et al.* 2005) sonsuz izotermal yatay silindirlere arasındaki laminer birleşik ısı transferini gözlemiştir. Reynolds sayısı aralığı  $Re = 0-2000$ , Rayleigh sayısı aralığı  $Ra = 10^3-10^6$  ve Prandtl sayısı aralığı  $Pr = 0.01-10$  olarak belirlenmiştir. Ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısındaki artıştan etkilenmediği savunulmuştur.

(Chong *et al.* 2007) dikdörtgen kanalın tam ortasına yerleştirdikleri ısıtılmış plaka ile yatay ve farklı açılarda konumlandırılarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel veriler,  $Pr \approx 0.7$ ,  $-60$  ile  $+60$  arasında değişen eğim açısı,  $334-1911$  arasında değişen  $Re$  sayısı ve  $5.26 \cdot 10^2 - 5.78 \cdot 10^6$  arasında değişen Grashof sayısı için alınmıştır. Sonuçlar değerlendirildiği zaman, tam gelişmiş bölgedeki ortalama Nusselt sayısının giriş bölgesindeki ortalama Nusselt sayısından yaklaşık iki kat daha fazla olduğu görülmüştür. Ortalama Nusselt sayısı ve basınç düşüşleri,  $Re < 1500$  için eğim açısı  $-60^\circ$  den  $+60^\circ$ 'a yükseltilirken azaldığı tespit edilmiştir. Fakat  $Re > 1800$  için, ısı transferi katsayısının ve basınç düşüşünün eğim açılarından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.

(Mirmasoumi and Behzadmehr 2008) yatay bir boruda su- $Al_2O_3$  nanoakışkanı ile laminer karma taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelenmiştir. Grashof ve Reynolds sayılarının geniş aralığında nanoyakıtın hidrodinamik ve termal davranışlarını araştırmak için iki fazlı karışım modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak hacimsel partikül yoğunluğu arttıkça ikincil akış gücü artmıştır.

(Zanchini 2008) üniform duvar sıcaklıkları olan düşey bir dairesel kanaldaki sıcaklığa bağlı bir viskoziteye sahip kararlı ve laminer karma taşınımı analitik olarak incelenmiştir. Akış tamamen aksel ve akışkan yoğunluğunun sıcaklığın doğrusal bir fonksiyonu olduğu kabul edilir. Boyutsuz hız dağılımının, boyutsuz basınç düşüşünün ve Fanning sürtünme faktörlerinin analitik ifadeleri belirlenmiştir.

(Akbari *et al.* 2008) yatay ve eğimli borularda su ve  $Al_2O_3$  içeren nano akışkanların laminer karma taşınımını sayısal olarak incelemişlerdir. Isı transfer katsayısı 0.004 hacimsel partikül konsantrasyonunda %15 civarında arttığını belirtmişlerdir. Sürtünme katsayısı dolayısı ile basınç düşümü tüp eğimi ile birlikte sürekli artarken, ısı transfer katsayısı eğim açısını  $45^\circ$  değerinde maksimuma ulaştığı sonucuna varmışlardır.

Yatay dairesel bir kanal içerisindeki laminer karma taşınım ısı transfer karakteristiğini farklı giriş geometrileri kullanarak (Mohammed 2009) deneysel olarak incelemiştir. Deneysel düzeneği, farklı giriş geometrileri olan 30 mm iç çap ve 900 mm ısıtılan uzunluğa ( $L/D = 30$ ) sahip ısıtmalı bir bölüm olarak alüminyum dairesel bir borudan oluşturulmuştur. Giriş şekilleri olarak, ısıtılan boru ile aynı iç çapa sahip ancak  $L = 600$  mm ( $L/D = 20$ ),  $L = 1200$  mm ( $L/D = 40$ ),  $L = 1800$  mm ( $L/D = 60$ ),  $L = 2400$  mm ( $L/D = 80$ ) değerlerinde değişken uzunluklara sahip keskin kenarlı ve konik ağızlı olan sakinleştiriciler kullanılmıştır. Sabit ısı akısı şartlarında veriler alınmıştır.  $L/D = 80$  giriş şekli için yapılan değerlendirmeler neticesinde yüzey sıcaklık değerlerinin, düşük kütleli debi ve yüksek akış direncinden dolayı diğer giriş geometrilerinden daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, konik ağızlı giriş geometrisi için Nusselt sayısı değerlerinin havanın ortalama sıcaklık ve yoğunluğundaki farklılıklardan dolayı diğer giriş geometrilerinden daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir.

(Dogan and Sivrioglu 2010) yatay dikdörtgen kanal üzerine farklı yükseklik ve aralıklarda yerleştirilmiş kanatçıklardan karma taşınım ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Sabit ısı akısı sınır şartlarında yaptıkları çalışmada iş akışkanı olarak hava kullanmışlardır. Sabit Reynolds sayısı ( $Re=1500$ ) ve değişken Rayleigh sayısı ( $3 \times 10^7 < Ra < 8 \times 10^8$ ) için yapılan deney sonuçlarına göre, karma taşınım ısı transferi için maksimum ısı transferini sağlayan, Rayleigh sayısına bağlı optimum kanat boşluğunun 8-9 mm olduğu sonucuna varmışlardır.

Cherif *et al.* (2011) dikey dikdörtgen kanalda film buharlaşmasının karma taşınım ısı ve kütle transferi üzerine etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Buharlaşma fenomeni,

uygulanan ısı akısı yoğunluğu ve besleme suyu sıcaklığı arttırılarak veya besleme suyu kütleli debisini azaltılarak geliştirildi.

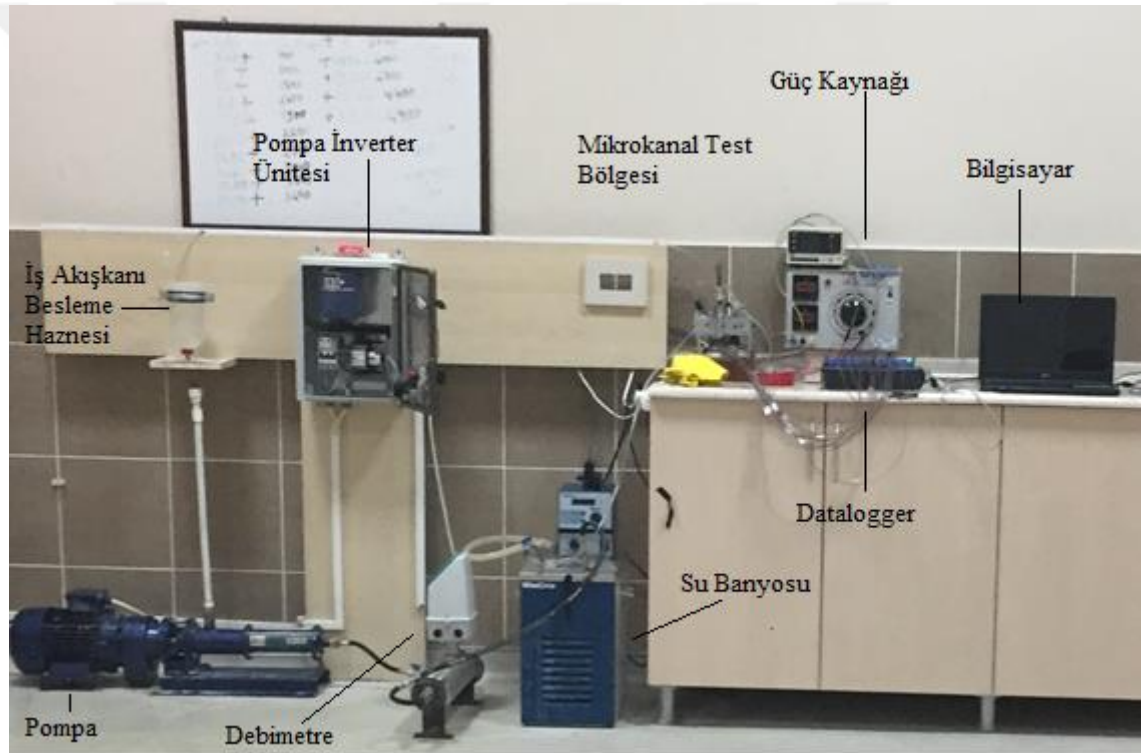
Izadi *et al.* (2013) bir dairesel halka kesitli boru boyunca akan su- $Al_2O_3$  nanoakışkanı kullanarak birleşik doğal ve zorlanmış taşınımı gözlemlemişlerdir. Bir dizi üç boyutlu eliptik korunum denklemi, sonlu hacim tekniği kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Nanoparçacıkların hacimsel oranı ve Richardson sayısının termal ve hidrodinamik parametreler üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Deney Düzeneginin Tanıtılması

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Enerji Laboratuvarında kurulan dikdörtgenel mikrokanal ısı değiştiricisinin kullanıldığı deney düzeneginde yapılmıştır. Deney düzeneginin şematik görünümü Şekil 3.1’de sunulmuştur.



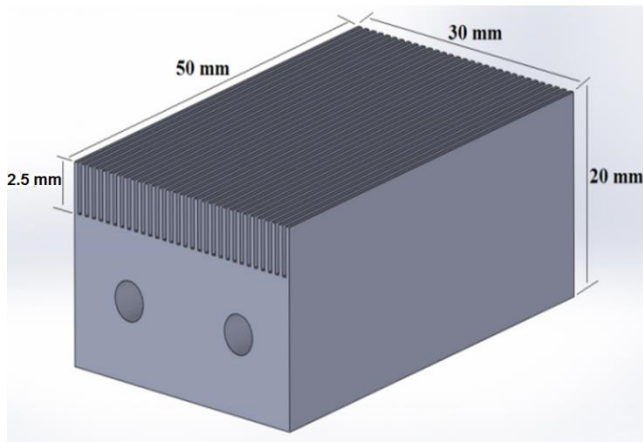
**Şekil 3.1.** Deney düzenegi genel görünüşü

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi düzenek,

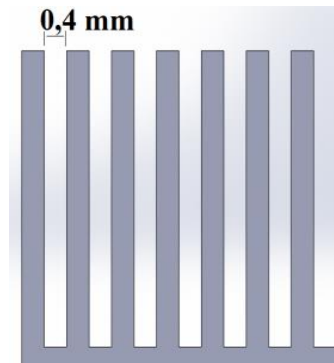
- Pozitif yer değiştirmeli invertörlü pompa
- Çok düşük akış debilerini dahi yüksek hassasiyetle okuyabilen kütleli debimetre
- İş akışkanı besleme haznesi
- İş akışkanını kararlı ve sabit sıcaklıkta sistemde dolaşmasını sağlayan su banyosu

- 400 $\mu$ m ve 500 $\mu$ m genişliğindeki mikrokanalların kullanıldığı mikrokanal test bölgesi
- Mikrokanal yüzeylerinde sabit ısı akısını elde etmek ve deney süresince devam ettirmek amacıyla Her birisi 100 Watt gücünde olan iki adet kartuş ısıtıcı mikrokanal test bölgesi içerisine yerleştirilmiştir. 6 mm çapında ve 5 mm uzunluğundaki bu kartuş ısıtıcıları beslemek için kullanılan güç kaynağı
- Mikrokanal giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkını belirlemek amacıyla kullanılan basınç transdüseri
- Mikrokanal test bölgesinde, akışkan giriş sıcaklığının ve akışkan çıkış sıcaklığının yanı sıra mikrokanal test bölgesi üzerinde 15 farklı noktadan termokupllar yardımıyla alınan sıcaklık değerlerini bilgisayara aktarmak için kullanılan datalogger
- Datalogger'dan alınan sıcaklık ve basınç verilerinin depolandığı bilgisayar farklı işlevsel özellikleri olan cihazlardan oluşmaktadır.

Deneyleerde 20×30×50 mm ebatlarında alüminyum malzemenin belirlenen üst yüzeyine 5 mm yüksekliğinde ve 50 mm uzunluğunda mikro kanallar tel erazyon yöntemiyle paralel olarak açılmıştır. 400 $\mu$ m ve 500 $\mu$ m olmak üzere iki farklı genişlikte elde edilen mikro kanal dizilimleri sayesinde kanal genişliğinin mikro kanal soğutucu performansı üzerindeki etkisi ve beraberinde basınç düşüşü etkisi incelenme fırsatı elde edilmiştir.



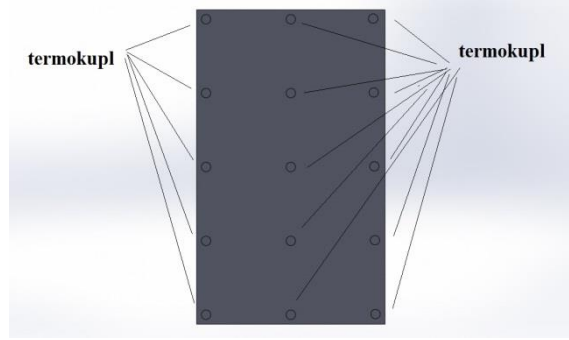
a) 400  $\mu$ m mikrokanal şematığı



b) mikro kanal detay çizimi

**Şekil 3.2.** (devam)

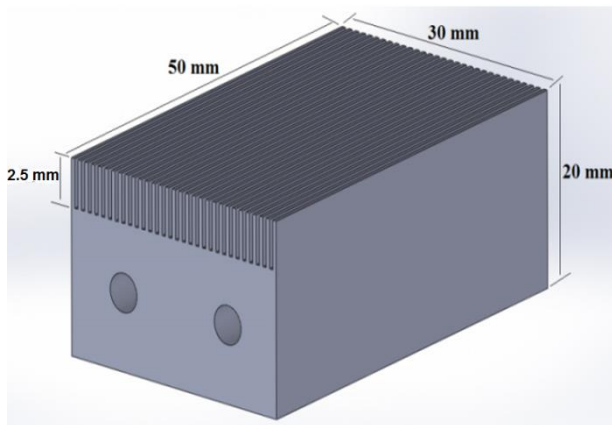
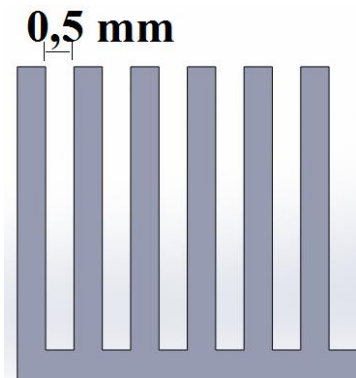




c) Isıl çiftlerin yüzeye yerleşim noktaları

Şekil 3.2.  $b=400 \mu\text{m}$  genişliğindeki mikro kanal şematığı

Şekil 3.2c ve Şekil 3.3c'den de görüldüğü gibi on beş adet T tipi termo eleman, akış süresince ısı transferi akışkanının kanallara giriş yaptığı andan başlayarak mikro kanalları terk edinceye kadar yüzey sıcaklık dağılımını belirlemek üzere yerleştirilmiştir. Mikro ısı değiştiricinin alt yüzeyine 1,5 mm çapında açılmış oluklar içerisinde monte edilen termo elemanlar ıslak mikro kanal yüzeylerinin hemen altına temas ettirilerek hassas okuma sağlanabilmektedir. Ayrıca Çizelge 3.1'de mikro kanalların ölçüleri detaylı bir şekilde sunulmuştur.

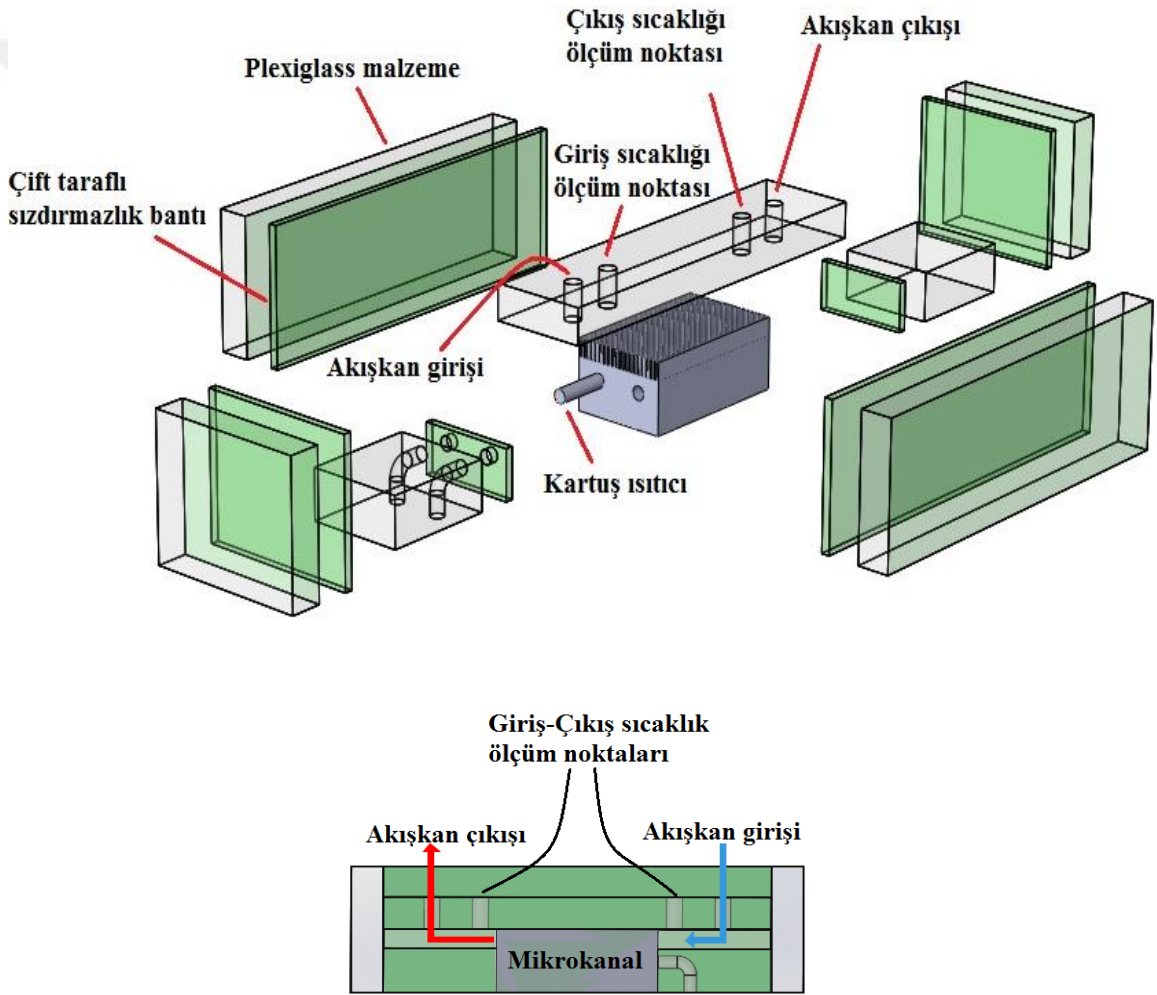
a) 500  $\mu\text{m}$  mikrokanal şematığı

b) mikro kanal detay çizimi

Şekil 3.3.  $b=500 \mu\text{m}$  genişliğindeki mikro kanal şematığı

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan mikrokanal boyutları

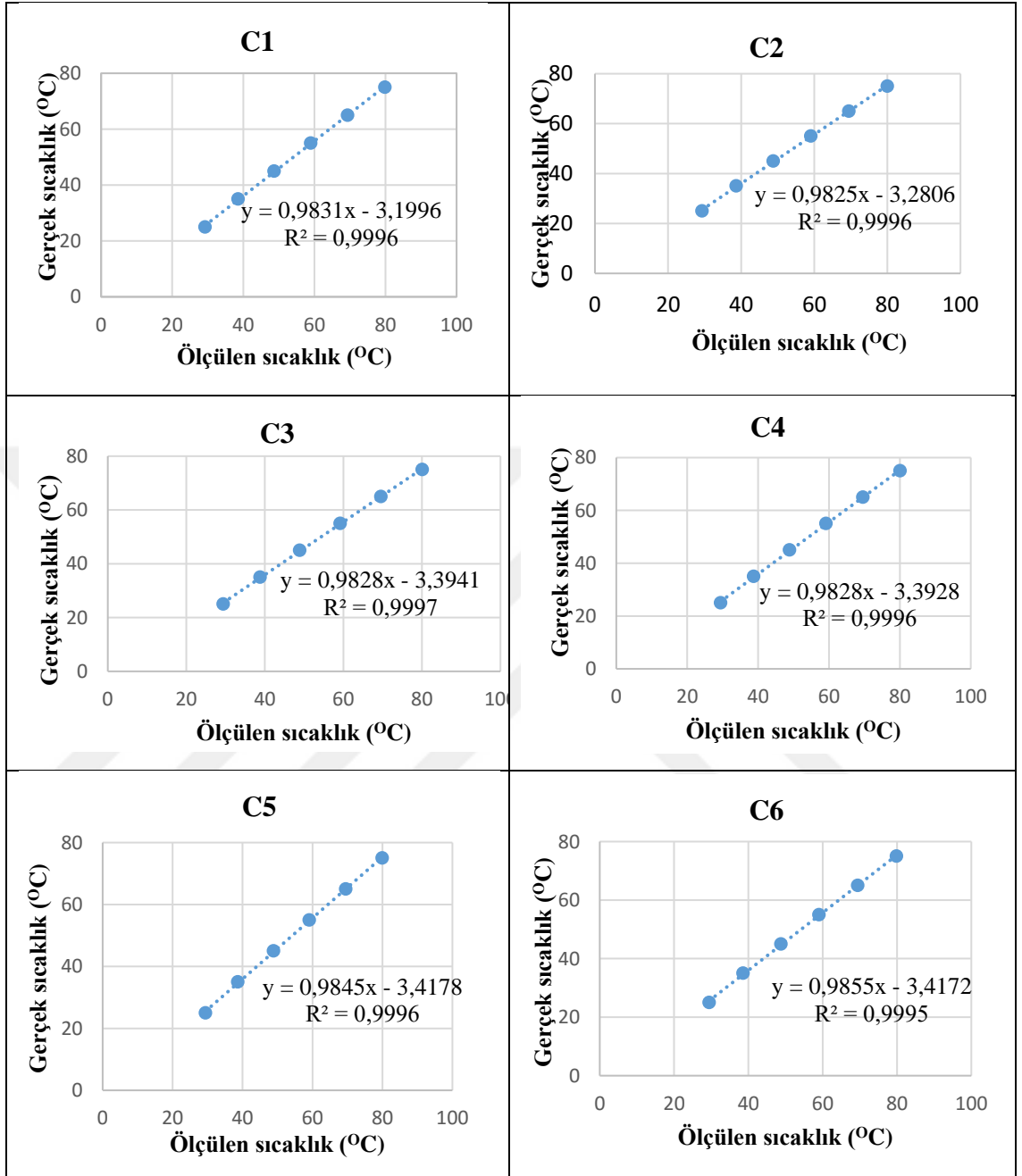
Mikro kanal No.	Kanal Uzunluğu L (mm)	Kanal Genişliği b ( $\mu\text{m}$ )	Kanal Yüksekliği h (mm)
1	50	400	2,5
2	50	500	2,5



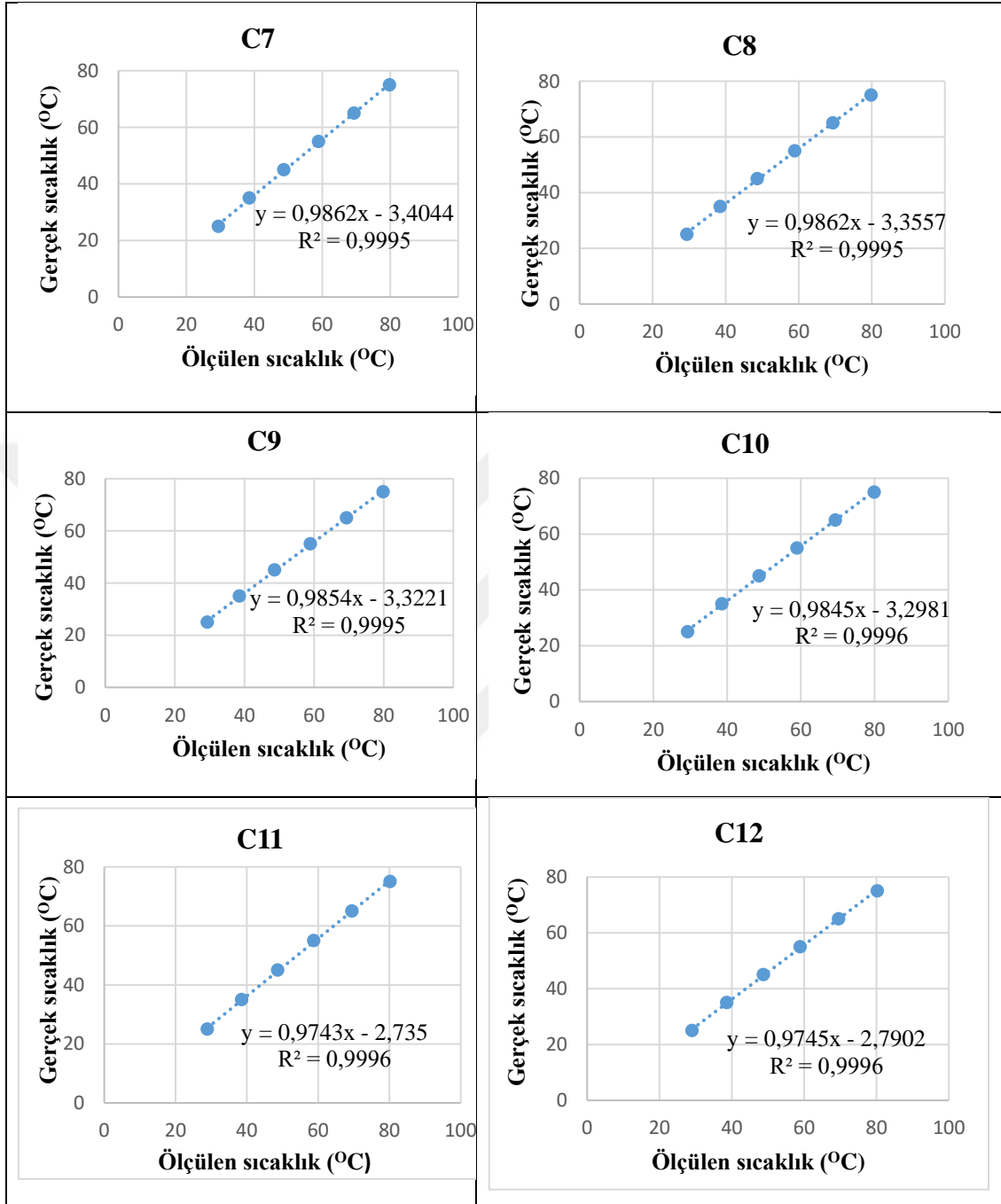
Şekil 3.4. Mikro kanal test bölgesi detay resmi

### 3.1.1. Termoelemanlar

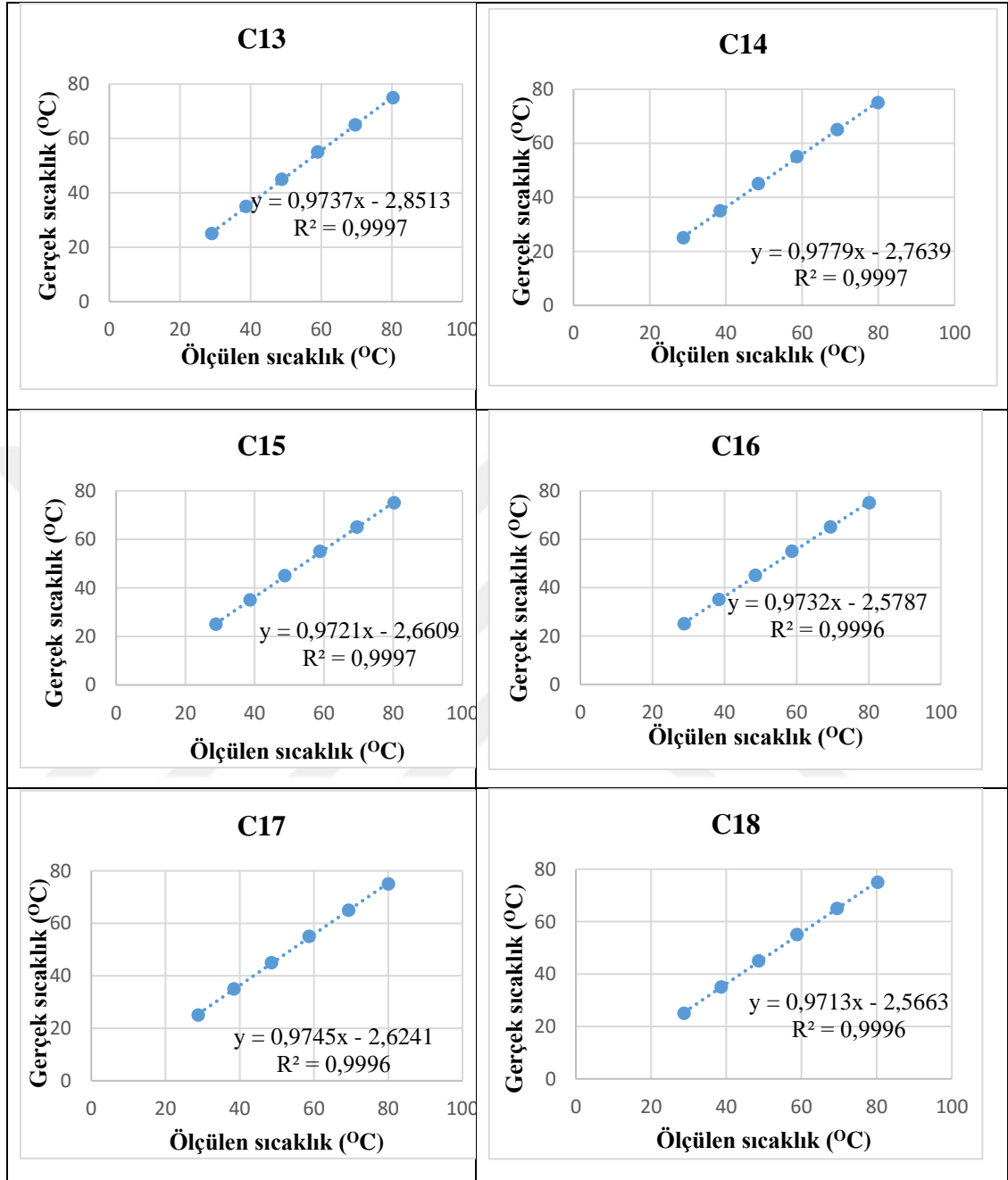
Termoeleman olarak iç çapı 0,25 mm ve dış çapı 0,75 mm olan fiziksel zorlamalara, kimyasallara ve aşınmaya dayanıklı T tipi fiberglas örgülü termokupl tercih edilmiştir. Seçilen termoelemanların çalışma sıcaklıkları Şekil 3.5'te verilmiştir. Termoçiftleri boru üzerinde oluşması muhtemel olan elektrik alandan etkilenmemeleri için uçları yüksek elektrik yalıtımı özelliğine sahip silikon conta ile kaplanmıştır. Olası termal direnci göz ardı etmemek için termoelemanlar WiseCircu marka %0,1 hassasiyete sahip sıcak su banyosunda 10°C-80°C sıcaklık aralığında 10°C artış aralıklarıyla kalibre edilmiştir. Her bir termoeleman için kalibrasyon denklemleri eğrileri Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Termoelemanlar için kalibrasyon deklemleri



Şekil 3.5. (devam)



Şekil 3.5. (devam)

### 3.1.2. Pompa

Deney sisteminde akışın sürekliliğini sağlamak için Şekil 3.6'daki pompa kullanılmıştır. Literatürde kullanılan diğer dişli pompalardan farklı olarak atımsız ve sürekli akış sağladığı için bu deney sisteminde pozitif yer değiştirmeli, indikatörlü, frekans kontrollü pompa tercih edilmiştir.

- Değişken hızlı
- Maksimum çalışma basıncı: 12 bar
- Maksimum çalışma ortam sıcaklığı: 50°C
- Maksimum iş akışkan sıcaklığı: 120°C
- Çalışma frekansı: 50 Hz



Şekil 3.6. Pompa

### 3.1.3. Sirkülatörlü su banyosu

Test bölgesinden çıkan akışkan, mikrokanal yüzeylerindeki ısıyı üzerine çektiği için giriş sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda çıkmaktadır. Sistem karalılığını ve deney örneklerini aynı koşullarda yapılabilmesi için sistemde dolaşan akışkanın sabit sıcaklıkta test bölgesine girmesi gerekmektedir. Bunu sağlamak için akışkan, test bölgesine girmeden önce sıcak su banyosundan geçirilmiştir. Bu şekilde, mikrokanal

girişinde akışkan sıcaklığı sabit tutulabilir. Bu deney düzeneğinde kullanılan cihaz Şekil 3.7’de sunulmuş ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir. Deney sisteminde akışkanın mikrokanallara giriş sıcaklığı 15°C olarak uygulanmıştır.

- **Model:** Wisd WiseCircu WBC-22
- Su haznesi: 6 Litre
- Cihaz çalışma sıcaklık aralığı: Min. +5°C – Max. +100°C
- Kullanılan sensör: PT100
- Hassasiyet:  $\pm 0.1^\circ\text{C}$
- Pompalama gücü: 14 Litre/dakika
- **Kontrol sistemi:** Ayarlanabilir sıcaklık ve frekans denetleyici
- **Ekran:** Dijital LCD ekran
- **Güvenlik aygıtları:** Yüksek sıcaklık ve akım koruma özellikli düşük seviye detektörü
- **Güç kaynağı:** AC 220V / 230V, 50Hz / 60 Hz



Şekil 3.7. Su banyosu

### 3.1.4. Debimetre

Sistemde dolaşan akışkanın debisini ölçmek için Şekil 3.8’de verilen SIEMENS STRANS FC- MASS600 marka kütleli debimetre kullanılmıştır. İçerisinde döner eleman bulunmadığından partikül birikmesi ve akış bölgesine müdahale gibi olumsuz



etkilerden kaçınılabilmektedir. Ayrıca geniş ölçüm skalası sayesinde düşük hızlara inilebilmiştir. Debi değerleri debimetre üzerindeki dijital ekrandan okunabildiği gibi bilgisayara da aktarılabilmektedir.



**Şekil 3.8.** Debimetre

### **3.1.5. Basınç trasndüseri**

Mikrokanallarda meydana gelen basınç düşümünü belirlemek için VALCOLM marka basınç trasndüseri kullanılmıştır. Test bölgesi giriş ve çıkışında ki basınç prizlerine 13 cm uzunluğundaki hortumlarla bağlanan 4-20mA çıkışlı cihazdan alınan değerler datalogger yardımıyla bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir.



**Şekil 3.9.** Basınç transdüseri

### **3.1.6. İş akışkanı besleme haznesi**

Deney sisteminde sürekli olarak 2,5 L akışkan devri daim etmektedir. Akışkan değişimi yada kanal değişimi sırasında test edilecek olan akışkan besleme haznesine dolduruldu. Tesisat boruları, bağlantı elemanları ve diğer sistem elemanlarında meydana gelen sistem havası pompa çalıştırılarak giderildi. Bu işlem esnasında az miktarda akışkan kayıpları besleme haznesine akışkan ekleyerek tamamlandı. İş akışkanı besleme haznesinin resmi Şekil 3.10'da verilmiştir.



**Şekil 3.10.** Besleme suyu haznesi

### 3.1.7. Hassas terazi

İstenilen konsantrasyonlarda nanoakışkan hazırlamak için kullanılacak partiküllerin kütlesini hassas bir şekilde tartmak gerekir. Bu işlemi yerine getirmek için Shimadzu TX4202L model hassas terazi kullanılmıştır. Cihazın yüksek hassasiyeti sayesinde hedeflenen sonuçlara ulaşılmıştır. Şekil 3.11’de resmi verilen hassas terazinin katalog değerleri aşağıda detaylı olarak sunulmuştur.

- **Model:** Shimadzu TX4202L
- Ağırlık kapasitesi: 4200 gram
- Minimum gösterge değeri: 0.01 gram
- **Kalibrasyon için ağırlık aralığı:** 1000 gram ile 4200 gram arasındadır.
- Tekrarlanabilirlik (Standart sapma):  $\leq 0.01$  gram
- Hassasiyet:  $\pm 0.02$  gram
- Tepki süresi: 2.5 saniye
- Çalışma ortam sıcaklığı: Min.  $+5^{\circ}\text{C}$  Max.  $+40^{\circ}\text{C}$
- **Cihaz ağırlığı:** Yaklaşık 2.8 kilogram
- **Ekran:** Arka aydınlatmalı ve fonksiyonlu dijital LCD

- **Güç kaynağı:** Giriş: ~ 220V / 230V Çıkış: ~12V / 1A



**Şekil 3.11.** Hassas terazi

### 3.1.8. Ultrasonik homojenizatör

Bu tez çalışmasında kullanılan nanoakışkan iki adım yöntemine göre hazırlanmıştır. İki adım yöntemi temel olarak parçacıkların temel akışkana ilave edilmesi şeklinde uygulanır. Bu işlem esnasında topaklama ve çökelme gibi olumsuz etkileri ortadan kaldırmak ve kararlı yapıda nanoakışkan hazırlamak için işlem esnasında Ultrasonik homojenizatör kullanılmıştır (Şekil 3.12). Model ve katalog bilgileri aşağıda detaylandırılmıştır.

**Model:** UP400S

**Açıklama:** Nanoakışkanlar için Ultrasonik Homojenizatör

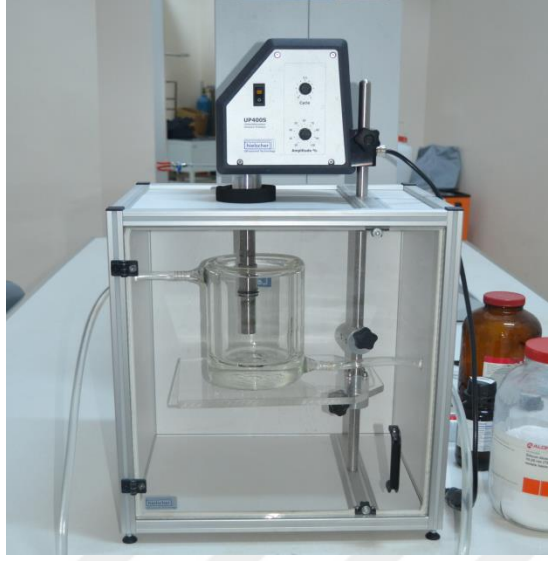
**Güç:** 400 Watt

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

**Atım aralığı:** %0 - %100 değerleri arasında ayarlanabilmektedir.

**Çalışma frekansı:** 24 kHz

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



**Şekil 3.12.** Ultrasonik homojenizatör

### 3.1.9. Viskozimetre

Nanoakışkanların dinamik viskozitesi SV-10 model viskozimetre yardımıyla ölçülmüştür. Ölçümler sırasında viskozitenin sıcaklığa bağlı değişimini tespit etmek için sıcak su banyosu kullanılmıştır. Bu sayede farklı sıcaklıklar için viskozite değerleri alınabilmektedir.

**Model:** Viscometer SV- 10 Series

**Titreşim frekansı:** 30Hz

**Hassasiyet:** % 1

**Çalışma ortam sıcaklığı:** +10°C - +40°C arasında

**Minimum numune miktarı:** Standart 35ml ile 45ml arasında

**Bilgisayar bağlantısı:** RS- 232C

**Kablo uzunluğu:** 1.5 metre

**Aksesuarlar:** Küçük numune kabı, Cam numune kabı, Su ceketine sahip numune kabı,  
Pozisyon sabitleyici



Şekil 3.13. Viskozite

### 3.1.10. Isıl iletkenlik ölçer

Nanoakışkanların termal iyileştirmesinin tespitinde önemli bir parametre olan ısıl iletkenlik değerleri Linseis THB-100 cihazıyla ölçülmüştür. Cihaz resmi Şekil 3.14’de verilmiştir.

**Model:** Linseis THB(Transient Hot Bridge) 100

**Ölçüm metodu:** Transient Hot Bridge (zamana bağlı sıcaklık köprüsü)

**Ölçülebilen termofiziksel özellikler:** Termal iletkenlik, Termal difüzyon, Öz ısı

**Hassasiyet:** %2 den daha iyi

**Doğruluk:** %5’den daha iyi



**Şekil 3.14.** Isıl iletkenlik ölçer

### 3.1.11. Güç kaynağı

Test bölgesinde sabit ısı akısı şartlarını sağlayabilmek için iki adet ısıtıcı kullanılmıştır bu ısıtıcıların beslemesi için güç kaynağı kullanılmıştır. Manuel olarak ayarlanarak istenilen güç sisteme sağlanabilmiştir.



**Şekil 3.15.** Güç kaynağı



### 3.1.12. Veri toplayıcı

Test bölgesinde giriş-çıkış sıcaklıkları da dahil 17 farklı noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. LR8402-20 model Hioki marka data kartı kullanılarak veriler bilgisayar ortamına aktarılmış ve anlık olarak kaydedilebilmiştir. Şekil 3.15'deki data kartının katalog bilgileri aşağıda sunulmuştur.

- 30 adet analog kanal
- Örnekleme hızı: maksimum 10ms
- Giriş: max.  $\pm 100V$  DC
- Termokupl ile Sıcaklık ölçümü
- Otomatik termokupl tanıma özelliği K, J, E, T, N, R, S, B, W
- Nem ölçümü ve otomatik nem sensörü algılama
- Puls Toplamı ve Puls Devri Ölçümü
- Ani güç kesintilerine karşı koruma
- Dahili USB ve LAN bağlantısı
- Uzaktan kontrol ile ayarlama
- Verileri cihaz üzerindeki ekranda takip etme olanağı



Şekil 3.16. Veri toplayıcı



## 3.2. Hesaplamalar ve Verilerin Değerlendirilmesi

### 3.2.1. Nanoakışkan hazırlanmasında kullanılan hesaplamalar

Bu deneysel çalışmada nanoakışkan hacimsel yüzdesi değişken parametrelerden birisi olarak seçilmiştir. Kararlılık, kümelenme azlığı ve partikül çözünürlülüğündeki avantajlarından dolayı iki adım metodu uygulanmıştır. Üç farklı hacimsel konsantrasyonda nanoakışkan hazırlanmıştır (%0.25 ve %0.5). Nanoakışkanların partikül kütlelerinin belirlemek için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$C_v = \frac{\rho_n - \rho_l}{\rho_p - \rho_l} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'den  $\rho_n$  bulunup 3.2 denklemine yazılarak  $m_n$  hesaplanır.

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_n} \quad (3.2)$$

Nanoakışkan kütleli oranı ( $C_m$ ) denklem 3.3'den hesaplanarak 3.4 denkleminde yerine yazılarak  $m_p$  partikül kütlesi bulunur.

$$C_m = C_v \frac{\rho_p}{\rho_n} \quad (3.3)$$

$$m_p = C_m \times m_n \quad (3.4)$$

Temel akışkan kütlesi ve hacmini belirlemek için, nanoakışkan kütlesi ve nanopartikül kütlesi 3.5 denkleminde yerine yazılarak temel akışkan kütlesi,  $m_{su}$  ve  $V_{su}$  denklem 3.6'da yerine yazılarak temel akışkan hacmi bulunur.

$$m_{su} = m_n - m_p \quad (3.5)$$

$$\rho_{su} = \frac{m_{su}}{V_{su}} \quad (3.6)$$

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (3.7)$$

Ayrıca nanoakışkan özgül ısı kapasitesini belirlemek için Denklem 3.8’de verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$[\rho c_p]_n = (1 - \varphi)(\rho c_p)_l + \varphi(\rho c_p)_p \quad (3.8)$$

### 3.2.1.a. Nanoakışkan termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Isı transferi özellikleri incelenecek olan nanoakışkanlar iki adım yöntemi ile hazırlanmıştır. İki adım yönteminde, ilk aşama nanopartikül hazırlama ve ikinci aşama hazırlanmış nanopartiküllerin temel akışkan içerisine uygun yöntemler kullanılarak dağıtılmasıdır. Hacimsel partikül oranı olarak belirlediğimiz %0.25 ve %0.5 konsantrasyonlar için bir önceki bölümde verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 3.2’de verilmiştir. Sigma-Aldrich firmasından tedarik edilen nanopartiküllerin bazı özellikleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Deneysel çalışmada kullanılan konsantrasyonlar için kütle hesapları

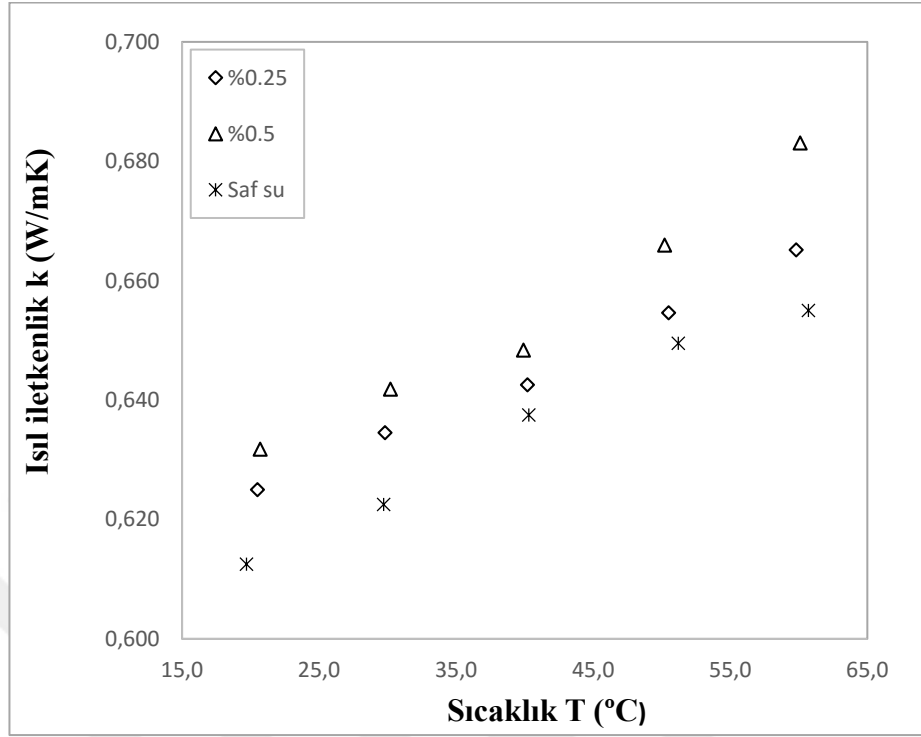
$C_v$	$\rho_{SiO_2}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{su}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{nanoakışkan}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_{nanoakışkan}$ (L)	$m_{nanoakışkan}$ (g)	$C_m$	$m_{SiO_2}$ (g)
0.0025	2400	998.7	1002.20	2250	2255.0	0.00598681	13,5
0.005	2400	998.7	1005.71	2250	2262.8	0.011931911	27

**Çizelge 3.3.** Silisyum dioksit nanopartiküllerinin özellikleri (Anonymous 2017)

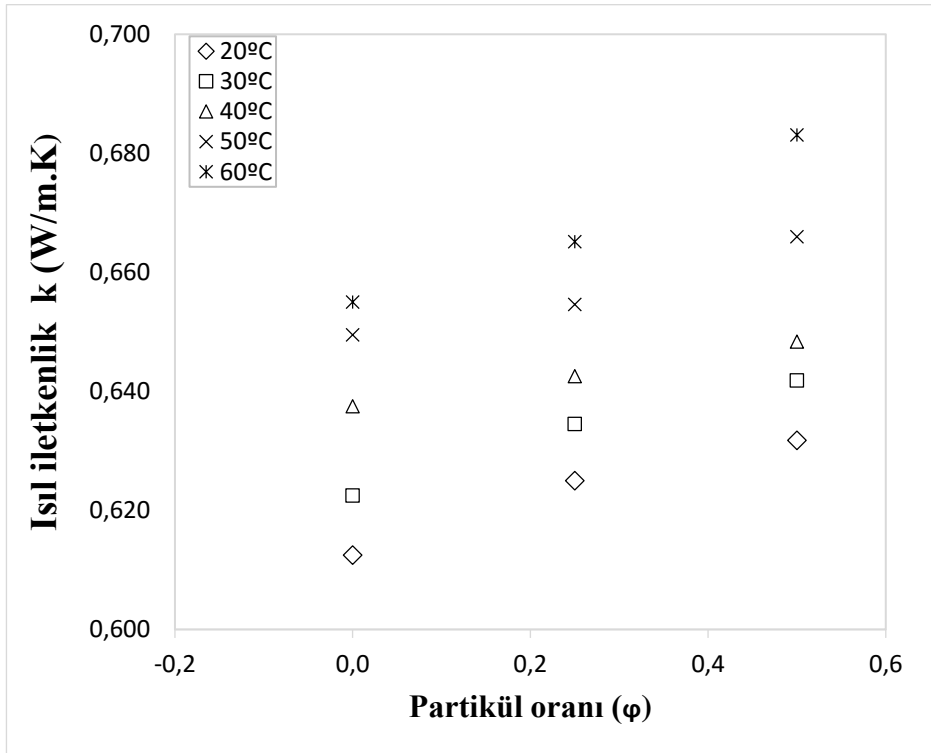
Özellikler	SiO <sub>2</sub> (Silikon dioksit)
Moleküler Ağırlığı	60.08 g/mol
Yoğunluk	2.2-2.6 g/mL (25°C)
Bulk Yoğunluğu	0.011 g/mL
Partikül Boyutu	10-20 nm
Renk	Beyaz
Safılık	%99.5
Kaynama Noktası	2230°C
Erime Noktası	1710°C
Isıl İletkenliği	0,68 W/mK

İstenilen hacimsel oranlarda nanoakışkan hazırlamak için temel akışkan ve nanopartikül miktarları belirlenmiştir. Boş bir kaba aktarılmış saf su içerisine hassas terazide ölçümü yapılan partiküller ilave edilerek mekanik olarak karıştırılmış ve akabinde 7 saat süreyle homojenizatör içerisine alınarak stabilizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemler bütün hacimsel oranlar için ayrı ayrı tekrarlanarak nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Elde edilen akışkanların kararlı hallerinden dolayı herhangi bir problemle karşılaşılmamıştır (çökme, kümelenme vb.). Hazırlanan nanoakışkanlardan ısıl iletkenlik ölçümleri viskozite ölçümleri ve SEM görüntüleri için numuneler alınmıştır.

Saf su ve SiO<sub>2</sub>- saf su nanoakışkanları ısıl iletkenlik ölçümlerinde Linseis THB-100 ısıl iletkenlik ölçer kullanılmıştır. Geçici sıcak tel (Transient Hot Bridge) tekniği ile çalışan cihazdan alınan veri sonuçları Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Isıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3.18. Farklı sıcaklıklar için ısı iletkenliğinin partikül oranı ile değişimi

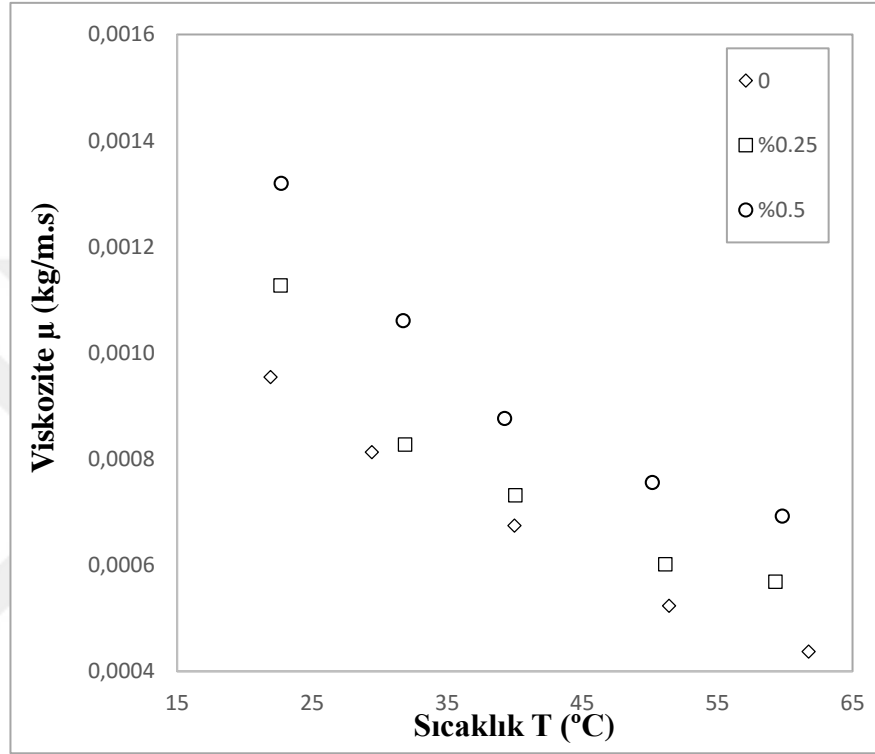
Isıl iletkenlik ölçümleri saf su ve üç farklı (%0.25 ve %0.5) hacimsel partikül konsantrasyonuna sahip nanoakışkan için farklı sıcaklıklarda (20-60°C) alınmıştır. Şekil 3.17'de görüldüğü gibi sıcaklık akışkanların ısı iletkenliğini etkileyen önemli bir faktördür. Sıcaklıkta ki artışa karşılık ölçümleri alınmış olan bütün akışkanların ısı iletkenlik değeri artmıştır. Üzerinde durulması gereken bir diğer nokta ise nanopartikül ihtiva eden nanoakışkanların ısı iletkenlik değerlerinin saf su ısı iletkenlik değerinden yüksek olmasıdır. Isıl iletkenlikteki en yüksek artış oranı yaklaşık %11,5 olarak 60°C sıcaklıktaki %0,5 hacimsel konsantrasyona sahip nanoakışkanda meydana gelmiştir. Akışkanlarda ısı iletimi moleküllerin birbirleriyle çarpışması ve moleküllerin yayılımı sayesinde gerçekleşir. Sıcaklık artışı yayılım ve çarpışma etkilerini arttırarak ısı iletkenlik değerinin artmasına sebep olur.

Farklı sıcaklıklarda ki nanoakışkanların partikül oranlarına karşılık ısı iletkenlik değerlerindeki değişim Şekil 3.18'de verilmiştir. Hacimsel konsantrasyondaki artışla birlikte farklı sıcaklıklardaki akışkanların ısı iletkenlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi olarak partikül ısı iletkenliğinin temel akışkan ısı iletkenliğinden yüksek olması ve Brownian etkisi olarak bilinen partiküllerin akışkan içerisindeki rastlantısal hareketi sonucu oluşan momentum ve ısı transferi etkileri gösterilebilir.

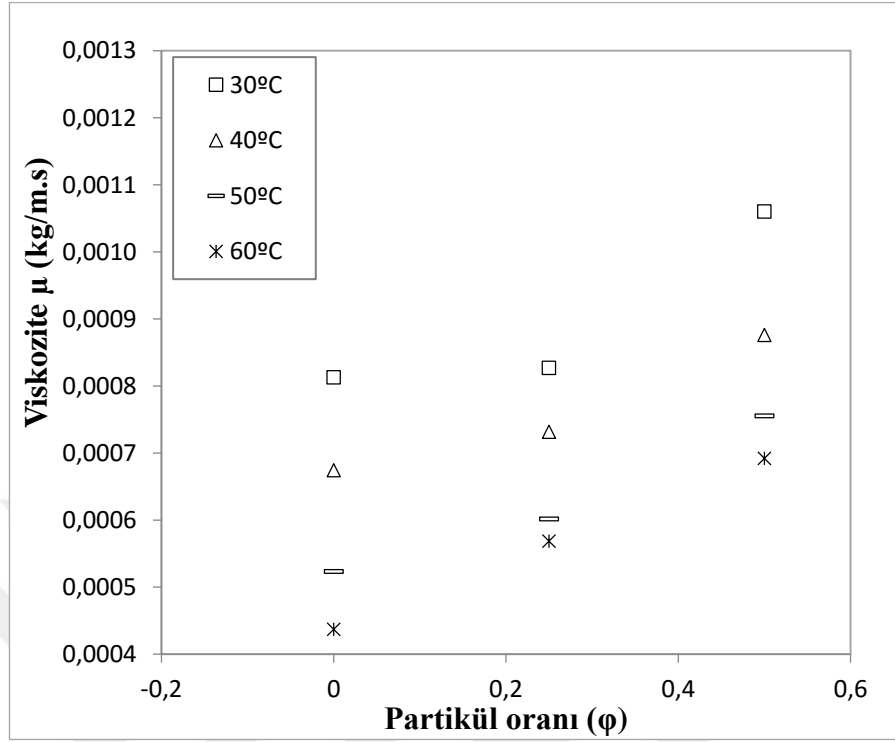
DeneySEL çalışmada kullanılan akışkanların viskozite ölçümleri A&D SV-10 vibro viskozimetre ile elde edilmiştir. Isıl iletkenlikle aynı şartlar altında gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçları Şekil 3.19'da viskozitenin sıcaklıkla değişimi ve Şekil 3.20 de ise farklı sıcaklıklarda viskozitenin partikül oranına karşılık değişimi olarak verilmiştir.

Temel akışkana partikül ilavesi viskozite değerinin artışına sebep olması beklenen bir durumdur. Şekil 3.19'da da gördüğümüz gibi nanoakışkanların viskozite değerleri saf suyun viskozite değerinden büyüktür. Ayrıca sıcaklığın da viskozite üzerindeki etkisi küçümsenmeyecek kadar fazladır. Sıcaklık artışına cevap olarak bütün akışkanların viskozitelerinde düşüş gözlenmiştir. Hacimsel partikül oranının artışı bütün sıcaklıklarda viskozitenin artışı ile sonuçlanmıştır. En yüksek sıcaklık değeri ve en

düşük hacimsel partikül oranına sahip olan akışkan için en düşük viskozite değerine ulaşılmıştır. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkan için 20°C’de en yüksek viskozite değeri elde edilmiş ve bu değer saf suya göre %50 daha fazladır.



**Şekil 3.19.** Viskozitenin sıcaklıkla değişimi



**Şekil 3.20.** Partikül oranının farklı sıcaklıklardaki viskozite değişimi

### 3.2.2. Isı transferi hesaplamaları

Sistem için gerekli olan güç bir güç kaynağı ile sağlanmıştır. Bu elektriksel güç dijital indikatör üzerinden okunabildiği gibi yine indikatör üzerinden okunan ve ısıtıcılardan geçen akım ve gerilim değerlerinin çarpılmasıyla da belirlenebilir.

$$Q = VI \quad (3.9)$$

Kayıplar ihmal edilerek sisteme verilen elektriksel gücün tamamının taşınım ile transfer edildiği kabulü altında Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11 yazılabilir.

$$Q = Q_{\text{taşınım}} \quad (3.10)$$

$$VI = hA[T_s - T_{\text{ort}}] \quad (3.11)$$

$A_s$  ısı transfer yüzey alanı,  $T_s$  yüzey sıcaklığı,  $T_{ort}$  giriş-çıkış sıcaklıkları ortalaması olmak üzere ortalama ısı taşınım katsayısı Eşitlik 3.12'den hesaplanabilir.

$$h = \frac{VI}{A_s(T_s - (T_g + T_c)/2)} \quad (3.12)$$

$D_h$  mikrokanal hidrolik çapı,  $k$  ısı iletim katsayısı olmak üzere Nusselt sayısı hesabı için Eşitlik 3.13 kullanılabilir.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3.13)$$

Akışkan üzerine etki eden kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanan ve zorlanmış taşınım için önemli bir parametre olan Reynolds sayısı Eşitlik 3.14'ten  $U$  ortalama akışkan hızı kullanılarak hesaplanabilir.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (3.14)$$

Doğal taşınım için önemli parametrelerden birisi olarak değerlendirilmesi gereken Grashof sayısı kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır. Karma taşınım da ki doğal taşınım etkilerinin belirlenmesinde bir hayli önemli olan Grashof sayısı Eşitlik 3.15 kullanılarak hesaplanır.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - (T_g + T_c)/2)D^3}{\nu^2} \quad (3.15)$$

Laminer akış karakteristiğini belirlemede kullanılan ve boyutsuz bir sayı olarak karşımıza çıkan Greatz sayısı Eşitlik 3.16 kullanılarak hesaplanır.

$$Gz = \frac{\pi}{4} RePr \frac{D_h}{L} \quad (3.16)$$



Rayleigh sayısı, kaldırma kuvvetleri ve viskoz kuvvetler arasındaki ilişkiyi tanımlayan Grashof sayısı ile viskoz yayılım ve termal yayılım arasındaki ilişkiyi ifade etmek için kullanılan Prandtl sayısının çarpımıyla hesaplanır (Eşitlik 3.17).

$$Ra = GrPr \quad (3.17)$$

Karma taşınım da sıkça kullanılan ve kaldırma kuvvetlerinin, atalet kuvvetlerine oranı olarak tanımlanan Richardson sayısı Eşitlik 3.18 ile hesaplanır.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (3.18)$$

Isı transferi mekanizmasında, karma taşınım ve destekleyen akışta etkili ise Nusselt sayısı zorlanmış ve doğal taşınım kaynaklı ısı transfer parametrelerinin katkıları toplanarak hesaplanır (Eşitlik 3.19).

$$Nu = Nu_{zorlanmış} + Nu_{doğal} \quad (3.19)$$

Karma taşınımı konu alan çalışmalarda veriler değerlendirilirken benzer denklemler kullanılmıştır. Bu denklemin genel formu Eşitlik 3.20’de verilmiştir. Eşitlikte ki ‘a’ sabit bir sayıyı temsil etmektedir ve üniform ısı akısı sınır şartları için 2.11 alınması önerilmiştir.  $\Phi$  ise karma taşınımında doğal taşınım etkilerini ifade eden bir parametredir (Feng and Li 2013).

$$\left( Nu \left( \frac{\mu_{duvar}}{\mu_{bulk}} \right)^{0.14} \right)^3 = (a \times Gz^{1/3})_{zorlanmış}^3 + (a \times \Phi^{1/3})_{doğal}^3 \quad (3.20)$$

Greatz, Grashof ve Prandtl sayılarının fonksiyonu olarak  $\Phi$  sayısı Eşitlik 3.21’de tanımlanmıştır. Doğal taşınım ve karma taşınım etkilerinin karşılaştırılmasında Eşitlik 3.20 ve Eşitlik 3.21 kullanılmıştır.

$$\Phi = \left( \frac{GrPrL/D}{Gz+L/D} \right)^{3/4} \quad (3.21)$$

### 3.2.3. Belirsizlik analizi

Deneysel çalışmalarda verilerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bunun için belirsizlik analizi yapmak faydalı olmaktadır. Literatürde kabul görmüş ve hata analizi için kullanışlı bir yöntem olan Kline ve McKlintock (1953) yönteminden faydalanılmıştır. Belirsizlik analizi yapılarak en yüksek hataya sebep olacak değişken rahatlıkla görülebilir. Bu tespit yapıldıktan sonra ilgili değişken daha hassas kontrol altında tutularak sistem hatası en aza indirilebilir. Eşitlik 3.19'da belirsizlik analizi verilmiştir.

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

Eşitlik 3.9'da R veriyi ,  $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$  R'nin bağlı olduğu bağımsız değişkenler göstermektedir. Bağımsız değişkenlerin hata oranları ise  $w_1, w_2, w_3, w_4, \dots, w_n$  dir. Eşitlik 3.24, 3.25, 3.26'de Reynolds sayısı, Nusselt sayısı ve Grashof sayıları için belirsizlik eşitlikleri verilmiştir.

$$\frac{w_{Re}}{Re} = \left[ \left( \frac{w_{\dot{m}}}{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{w_{D_h}}{D_h} \right)^2 + \left( \frac{w_{\mu}}{\mu} \right)^2 + \left( \frac{w_{\rho}}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \left[ \left( \frac{w_V}{V} \right)^2 + \left( \frac{w_{D_h}}{D_h} \right)^2 + \left( \frac{w_l}{l} \right)^2 + \left( \frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + \left( \frac{w_k}{k} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.24)$$

$$\frac{w_{Gr}}{Gr} = \left[ \left( \frac{w_{\rho}}{\rho} \right)^2 + 9 \left( \frac{w_{D_h}}{D_h} \right)^2 + \left( \frac{w_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 + 4 \left( \frac{w_V}{V} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

Yukarıdaki denklemlerden de görüldüğü gibi Grashof sayısı için belirsizlik hesabında parametreler farklı etkiye sahiptir. Bu da hassas ölçüm yapılması gerektiğini

göstermektedir. Ölçüm yapılan cihazların katalog bilgilerinden temin edilen hassasiyet değerleri yukarıda ki denklemlerde ilgili yerlere yerleştirilerek elde edilmiş belirsizlik değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Belirsizlik değerleri

Parametre	Re	Nu	Gr	As
% belirsizlik	3,05	1,97	2,56	0,16

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada 10 nm boyutundaki SiO<sub>2</sub> partikülleri kullanılarak hazırlanan su bazlı nanoakışkanların dikdörtgenel mikro kanallardaki karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney parametreleri olarak kanal genişliği, kütleli debi ve nanopartikül hacimsel oranı seçilmiştir. Bu üç parametredeki değişimlere karşılık ısı transfer karakteristiğindeki tepki incelenmiştir.

##### 4.1. Isı Transferi Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması

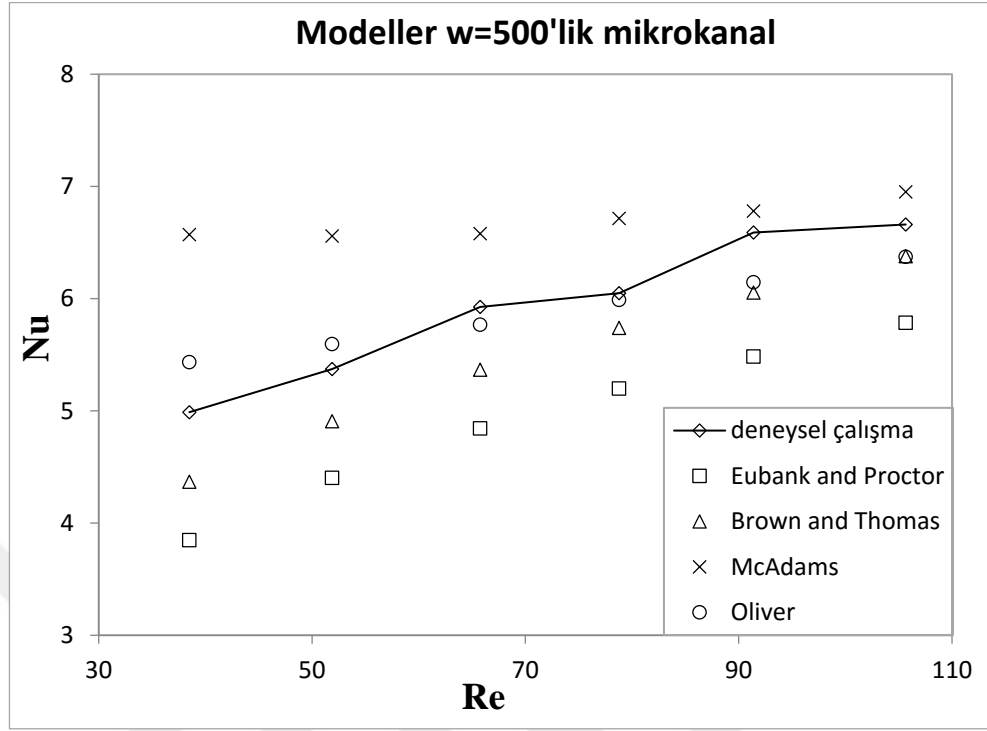
Yapılan deneyler sonucunda alınan verilerin uygunluğunun belirlenmesi için daha önce yapılan çalışmalar neticesinde elde edilmiş modeller ve veriler ile karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Saf su için elde edilen sonuçlar Eubank-Proctor, McAdams, Brown-Thomas ve Oliver modelleri ile karşılaştırılmıştır (Olver 1962; Feg and Li 2013).

$$\text{Nu} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} = 2.11 \left( \text{Gz} + 6.2 \times 10^{-4} \left( \frac{\text{GrPrL}}{D} \right)^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{Eubank ve Proctor Modeli}) \quad (4.1)$$

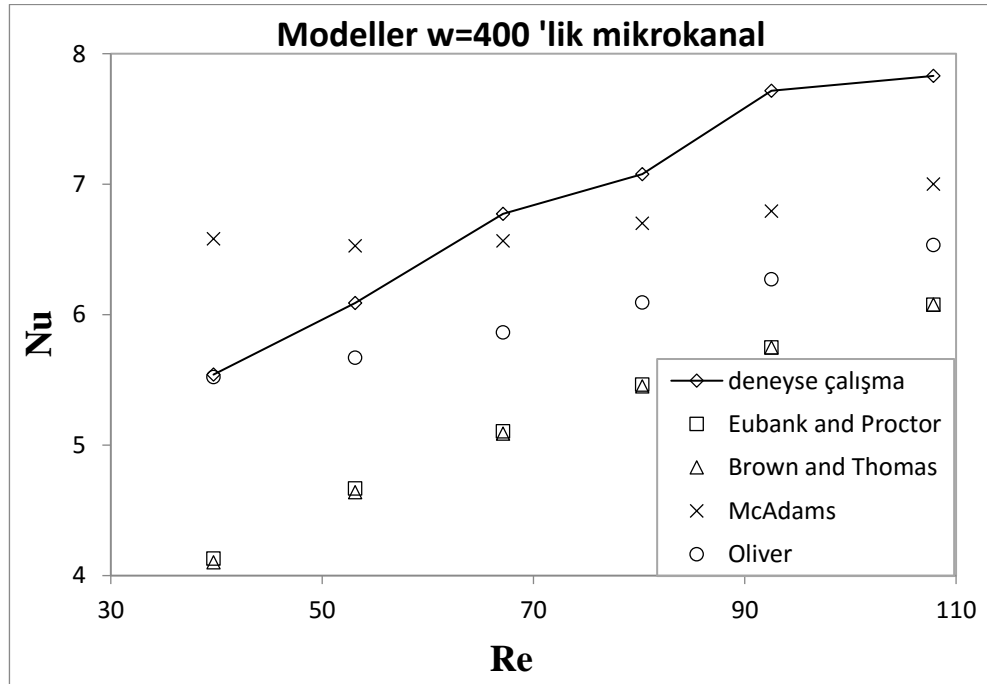
$$\text{Nu} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} = 2.11 \left( \text{Gz} + 0.0182 (\text{GrPr})^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{McAdams Modeli}) \quad (4.2)$$

$$\text{Nu} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} = 2.11 \left( \text{Gz} + 0.0273 \left( \frac{\text{GrPrL/D}}{\text{Gz+L/D}} \right)^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{Brown ve Thomas Modeli}) \quad (4.3)$$

$$\text{Nu} \left( \frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} = 2.11 \left( \text{Gz} + 0.0083 (\text{GrPr})^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{Oliver Modeli}) \quad (4.4)$$



Şekil 4.1. 500µm kanal genişliğinde saf su ısı transfer sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması



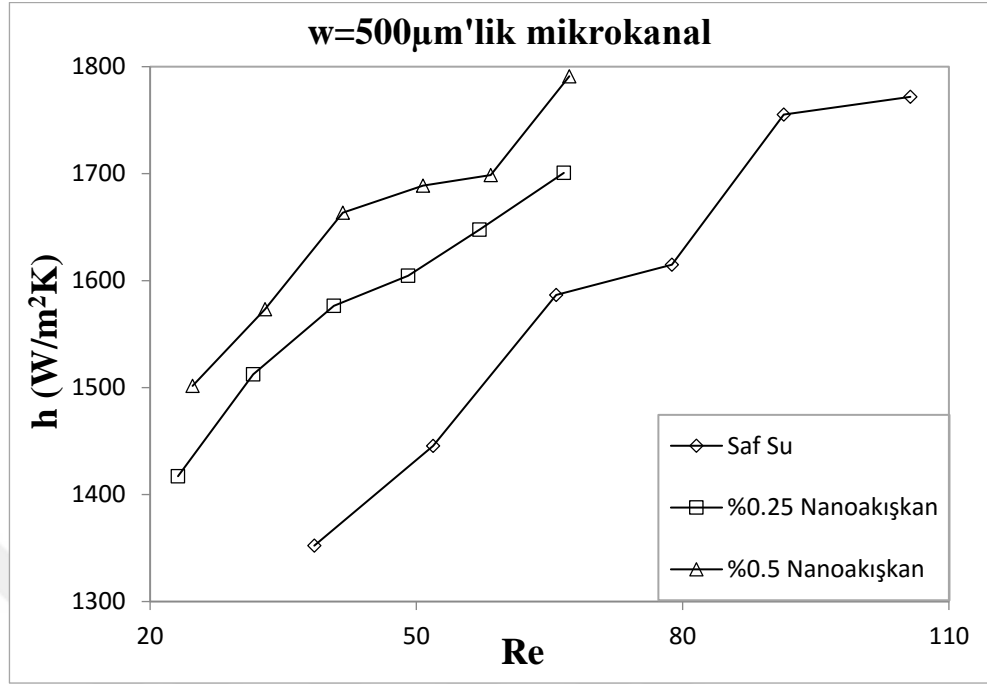
Şekil 4.2. 400µm kanal genişliğinde saf su ısı transfer sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması

400 $\mu\text{m}$  ve 500  $\mu\text{m}$ 'lik kanal genişliğinde ki paralel mikrokana1 dizilimleri için alınan sonuçların literatürle karşılaştırılması Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Her iki kanal genişliğinde modeller ve deneysel çalışma eğrilerinde Re sayısında ki artışa karşılık Nusselt sayısı artmıştır. Şekiller modeller açısından incelendiği zaman en yüksek ısı transferi sonuçları McAdams Modeli'nde en düşük ısı transferi sonuçları ise Eubank ve Proctor Modeli'nde gözlenmiştir. Eubank Proctor Modeli ile Brown ve Thomas Modeli kendi içinde benzer eğilime sahipken diğer taraftan, McAdams Modeli ile Oliver Modeli kendi içerisinde benzer eğilimlere sahip olduğu görülmüştür. Düşük Reynolds sayılarında modeller arasındaki ısı transfer tahminleri bir miktar farklıdır fakat Reynolds sayısındaki artış ile bu fark azalmıştır. 500  $\mu\text{m}$ 'lik kanal genişliğinde deneysel eğri, bütün Reynolds sayılarında model eğrileri arasında kalmıştır. 400  $\mu\text{m}$ 'lik kanal genişliğinde ise Reynolds sayısı 70'i aştığı zaman deneysel eğrinin model eğrileri üzerine çıktığı görülmüştür.

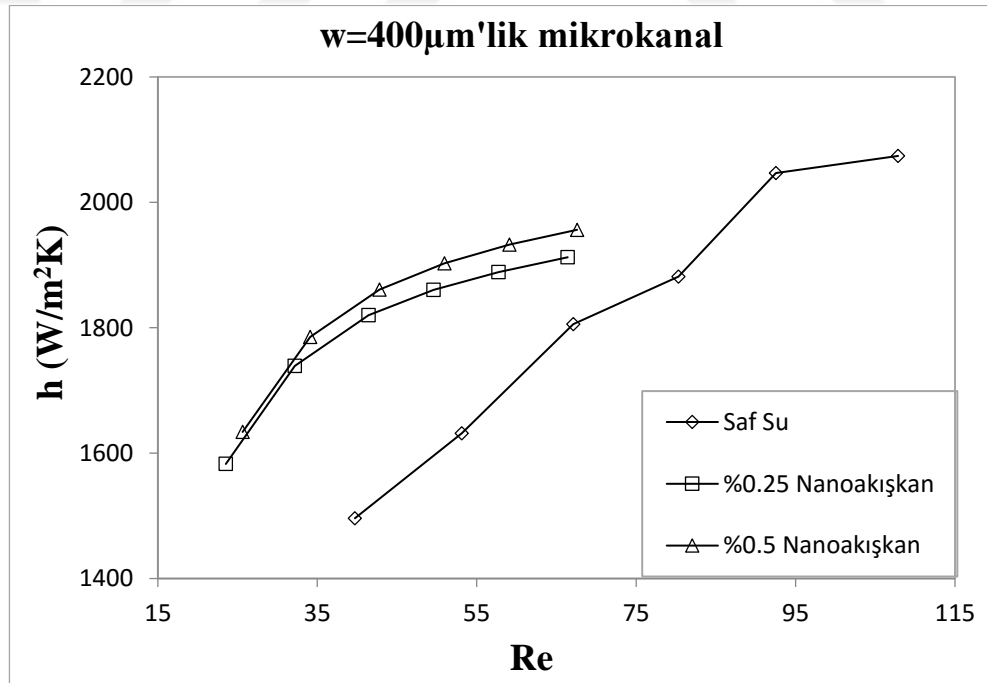
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 birlikte değerlendirildiği zaman bütün Reynolds sayıları için, kanal genişliği 400  $\mu\text{m}$  olan mikrokana1ın ısı transfer sonuçları kanal genişliği 500  $\mu\text{m}$  olan mikrokana1ın ısı transferi sonuçlarından daha yüksektir. Bu durumu, kanal genişliğindeki azalmanın ısı transfer yüzey alanını artırması ile açıklamak mümkündür. Saf su için, iki kanal arasındaki en yüksek artış %17,5 olarak belirlenmiştir.

#### **4.2. Karma Taşınım Verilerinin Değerlendirilmesi**

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de sırasıyla 500  $\mu\text{m}$  ve 400  $\mu\text{m}$  genişliğindeki dikdörtgensel kana1 dizilimlerinde saf su ve farklı hacimsel konsantrasyonlara (%0,25 ve %0,5) sahip SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için ısı transferi katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi sunulmuştur.



**Şekil 4.3.** Farklı akışkanlar için 500  $\mu$ m kanal genişliğinde taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi



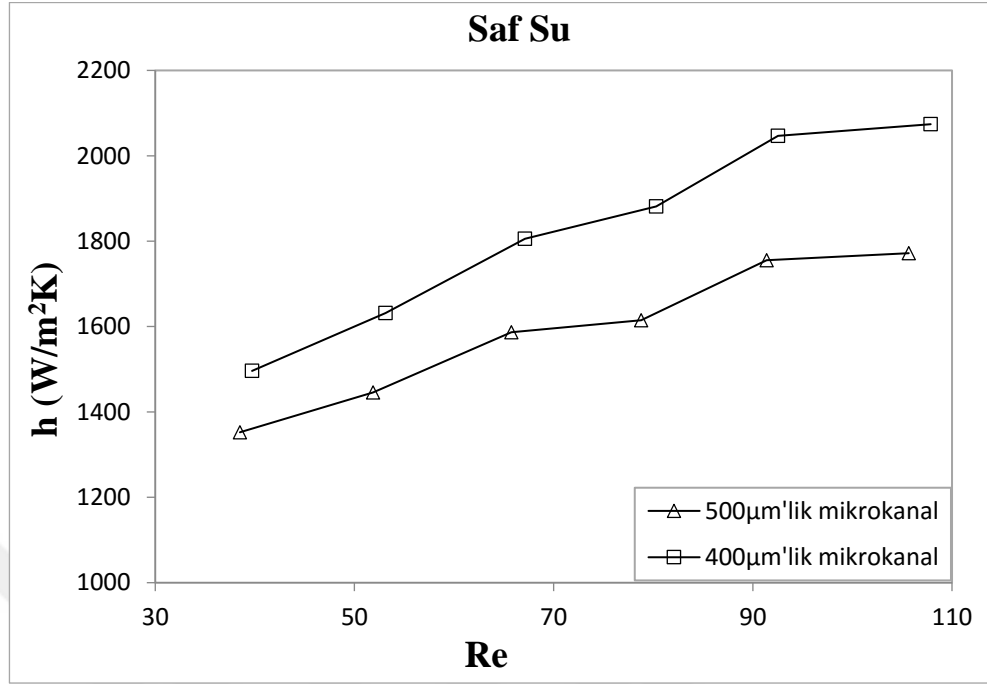
**Şekil 4.4.** Farklı akışkanlar için 400  $\mu$ m kanal genişliğinde taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'den açıkça görüldüğü gibi ısı transferi katsayısı bütün akışkan türlerinde Reynolds sayısındaki artışla birlikte artmıştır. Ayrıca bütün Reynolds sayılarında en küçük ısı transferi katsayısı saf suda görülmüştür. Saf su içerisine nanopartikül ilavesi beklendiği üzere ısı transfer katsayısının artışına neden olmuştur. Nanopartikül hacimsel konsantrasyonunu arttırarak, partikül konsantrasyonunun ısı transferi katsayısının artışı üzerine etkisi incelenebilmiştir. Aynı Reynolds sayılarında Saf su ya oranla ısı transfer katsayısında en büyük artış %0,5'lik SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanında gözlemlenmiştir. Nanoakışkanların taşınım ısı transferi katsayısını saf suya göre arttırmasının nedeni,

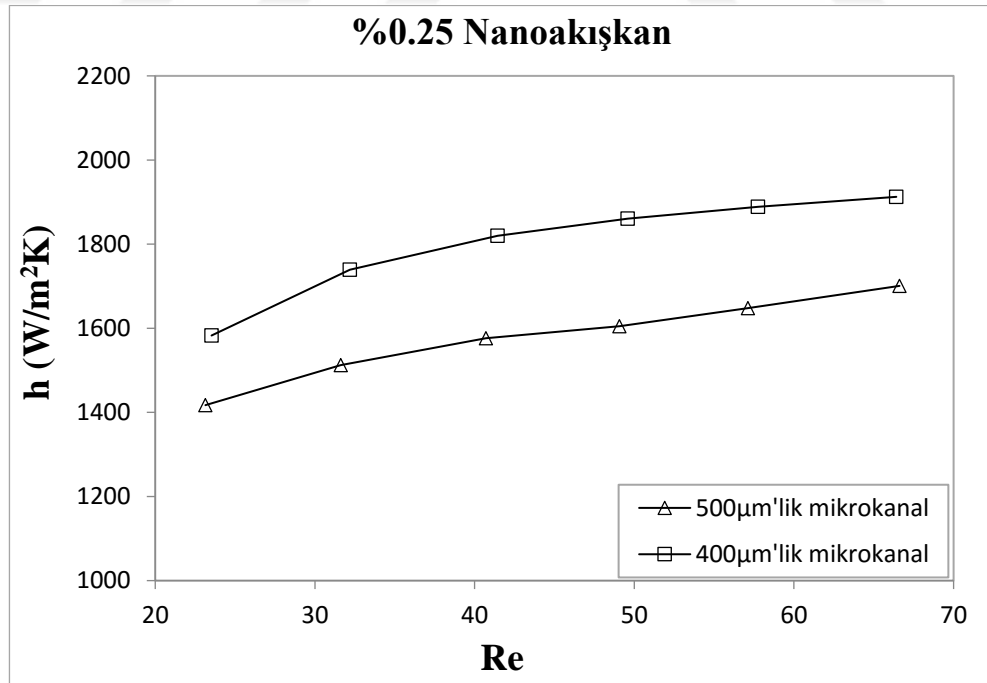
- Brownian hareketi; nanopartiküllerin, karışım içerisinde rastlantısal hareketi olarak da bilinir. Partiküllerin bu hareketleri ile enerji daha etkin bir şekilde taşınabilmektedir.
- Nanopartiküllerin kümelenmesi; partiküllerin karışım içerisinde kümelendiği birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Prasher *et al.* 2006a). Isının katı ortamlarda sıvılara göre daha hızlı taşındığı düşünülerek nanopartikül kümelenmesi, akışkanın ısı transfer kabiliyetini arttırdığı söylenebilir.
- Sıvı katmanlaşması; nanoakışkanlarda, partikül ile sıvı molekülleri arasında katman oluşumu birçok araştırmacı tarafından ispatlanmış bir durumdur. Bu katmanlı yapıların ısı performansını arttırdığı düşünülebilir.
- Yakın alan radyasyonu; (Domingues *et al.* 2005) nanopartiküller arasındaki mesafenin partikül boyutundan küçük olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, iki partikül arasındaki yakın alan radyasyonunun ısı transfer hızını etkilediğini belirtmişlerdir. Bu durumun 10nm boyutundan daha küçük partiküller için daha etkin bir parametre olduğunu dile getirmişlerdir. Ayrıca, Brownian hareketinin partiküller arası mesafeyi azaltacağını belirterek yakın alan radyasyon etkisini arttıracağını ileri sürmüşlerdir.

Yukarıda sıralanan ve daha önceki çalışmalarda etkinliği ispatlanmış durumlardan kaynaklandığı düşünülebilir.

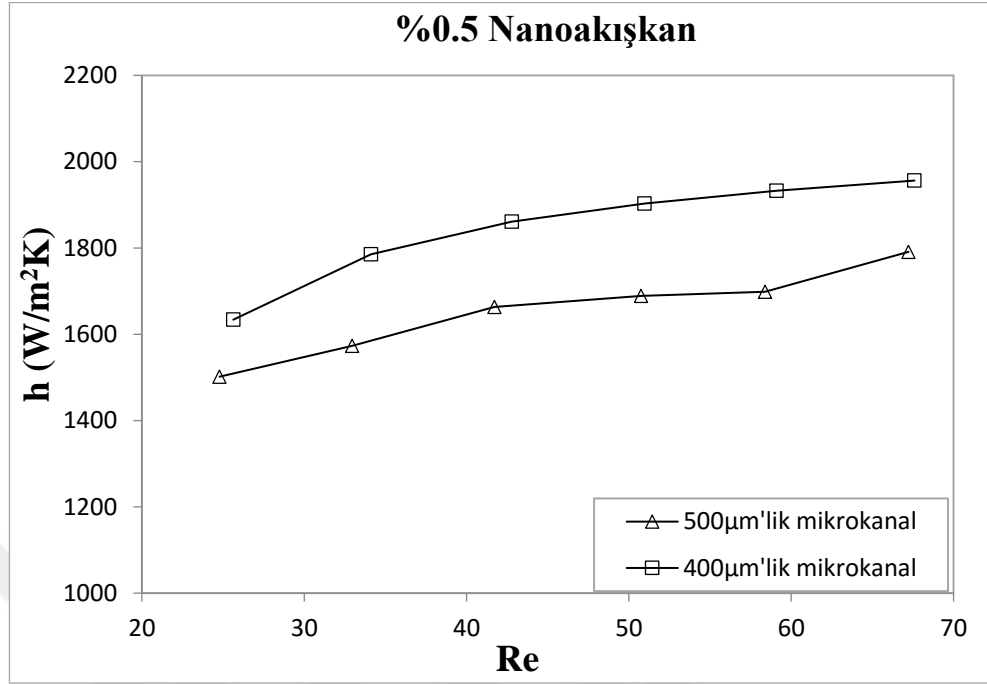




**Şekil 4.5.** Farklı kanal genişliklerinde Saf su için ısı taşınım katsayısının Re sayısı ile değişimi

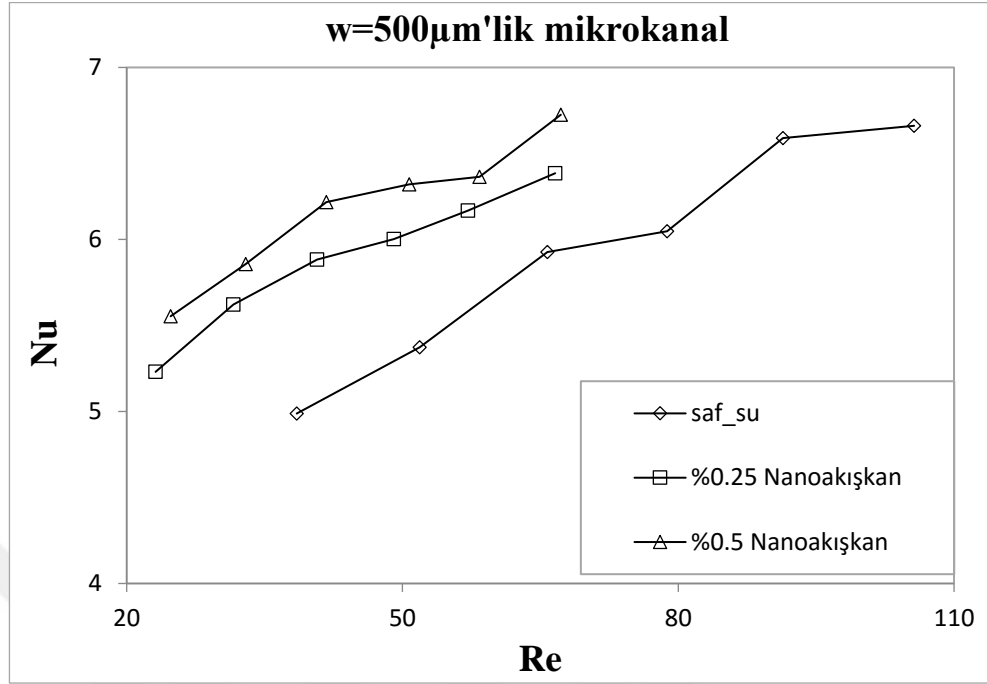


**Şekil 4.6.** Farklı kanal genişliklerinde %0,25 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Re sayısı ile değişimi

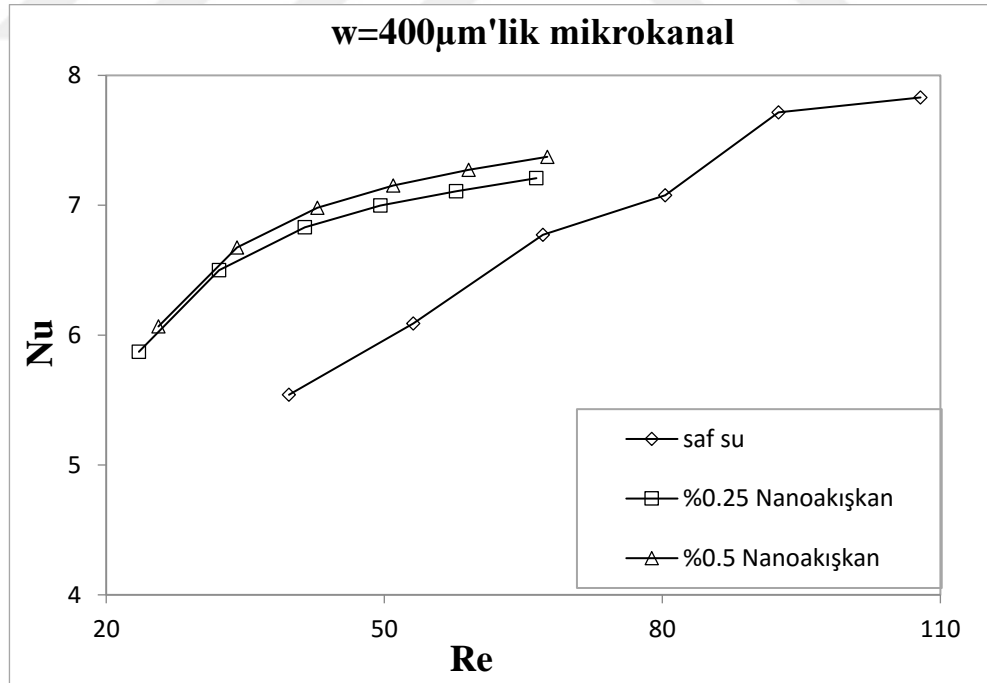


**Şekil 4.7.** Farklı kanal genişliklerinde %0,5 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Re sayısı ile değişimi

Deneysel bir parametre olarak seçilmiş olan mikrokanaal genişliğinin ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7’de sunulmuştur. Her bir şekil dikkatle incelendiği zaman kanal genişliği ile ısı transfer katsayısının bağlantılı iki büyüklük olduğu açıkça görülebilir. Deneysel çalışmada kullanılan bütün iş akışkanlarında kanal genişliğindeki azalma ısı transfer katsayısını arttırmıştır. Boyutsal olarak aynı olan test bölgeleri içerisine 500μm’lik mikrokanaallardan 25 adet yerleştirilebilmişken, 400 μm’lik mikrokanaallardan 31 adet yerleştirilebilmiştir. Kanal sayısındaki bu artış ısı transferi yüzey alanının artması anlamına gelmektedir. Isı transfer yüzey alanı ile ısı transfer hızının doğru orantılı olduğu düşünüldüğü zaman etkin ısı transfer yüzey alanının artması ısı transferini arttıracak beklenen bir durumdur. Diğer taraftan, deney sisteminde akışkan hızının değiştirilmesi ile farklı Reynolds sayıları elde edilebilmiştir. Test bölgesinde akış hızındaki artış viskoz alt tabakanın incelmeye dolayısıyla momentum transferinin artmasına neden olmuştur. Yani Reynolds sayısının artması ısı transferinin artmasına sebep olmuştur.

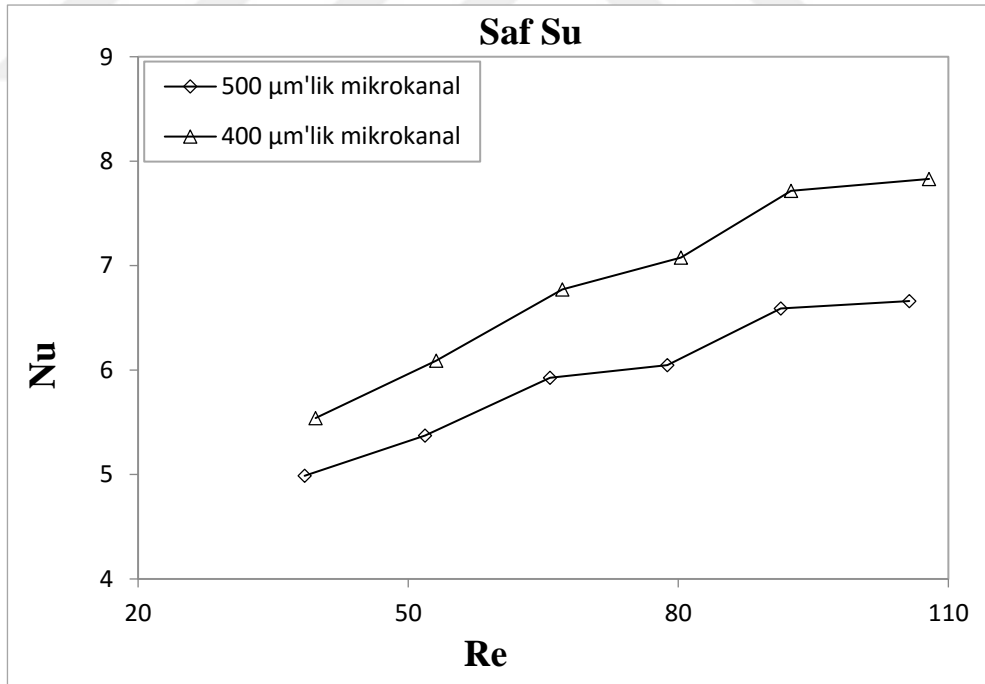


Şekil 4.8. 500 $\mu$ m kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için Nusselt sayısının değişimi

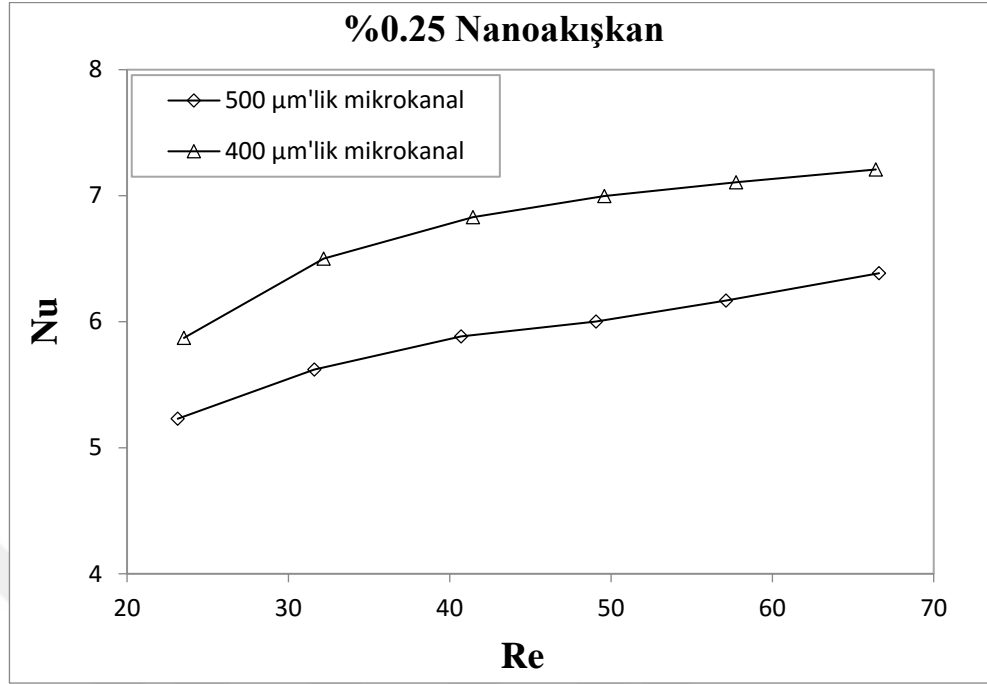


Şekil 4.9. 400 $\mu$ m kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için Nusselt sayısının değişimi

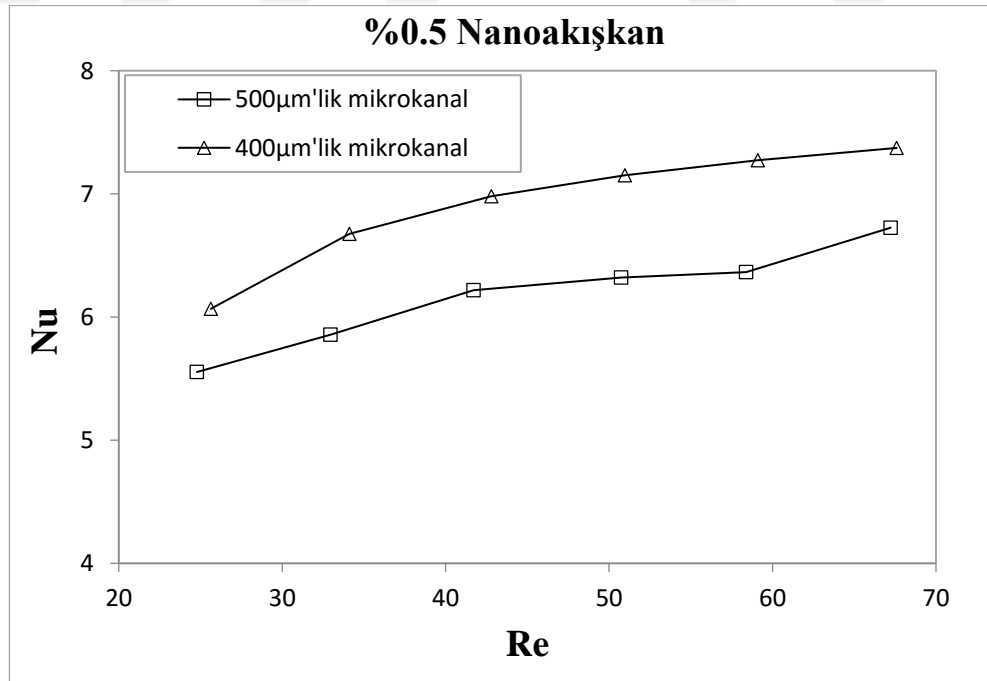
Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da farklı akışkanlar için Nusselt sayısının, Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Şekillerde sunulan Nusselt sayıları, doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin birlikte incelendiği toplam Nusselt sayısını ifade etmektedir. Şekillerde de görülebileceği gibi geleneksel akışkan olarak kullanılan saf suyun ısı transfer kabiliyeti diğer akışkanlara göre daha kötüdür. Saf su içerisine ısı transfer kabiliyeti iyi olan nanopartiküller özel yöntemler ile ilave edilerek toplam ısı transfer hızının artacağı şekillerden görülebilmektedir. Bütün Reynolds sayılarında saf su içerisindeki nanopartikül hacimsel konsantrasyonunun artışına karşılık Nusselt sayısı artmıştır. 500  $\mu\text{m}$  kanal genişliğine sahip mikrokanallarda %0,25 hacimsel oranda nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında yaklaşık %7,6 artış gözlenirken %0,5 hacimsel oranda yaklaşık %13,5 artış olmuştur. Diğer taraftan 400  $\mu\text{m}$  kanal genişliğine sahip mikrokanallarda ise benzer şekilde oranlar %0,25 hacimsel oranda %16,8 ve hacimsel %0,5 hacimsel oranda %21 artış elde edilmiştir.



**Şekil 4.10.** Farklı kanal genişliğinde saf su için Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi

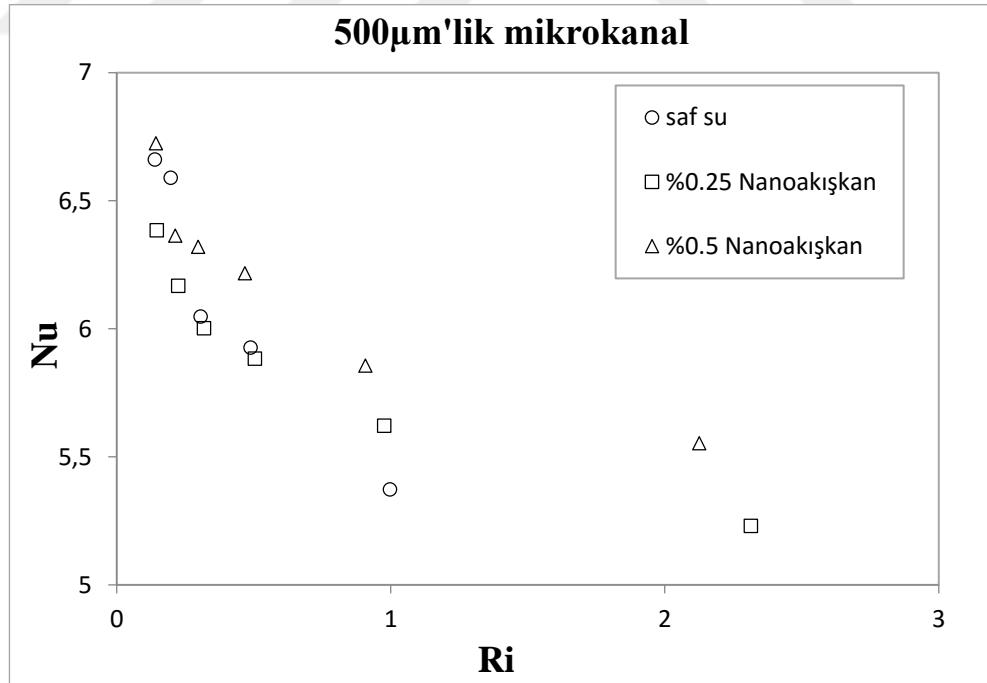


**Şekil 4.11.** Farklı kanal genişliğinde hacimsel %0,25 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi

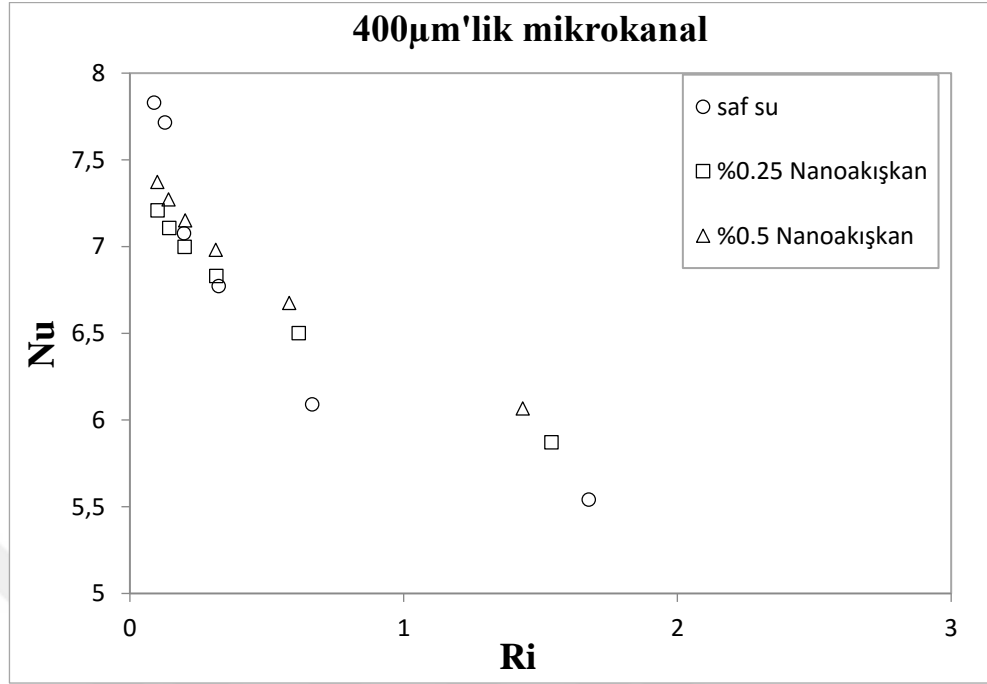


**Şekil 4.12.** Farklı kanal genişliğinde %0,5 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi

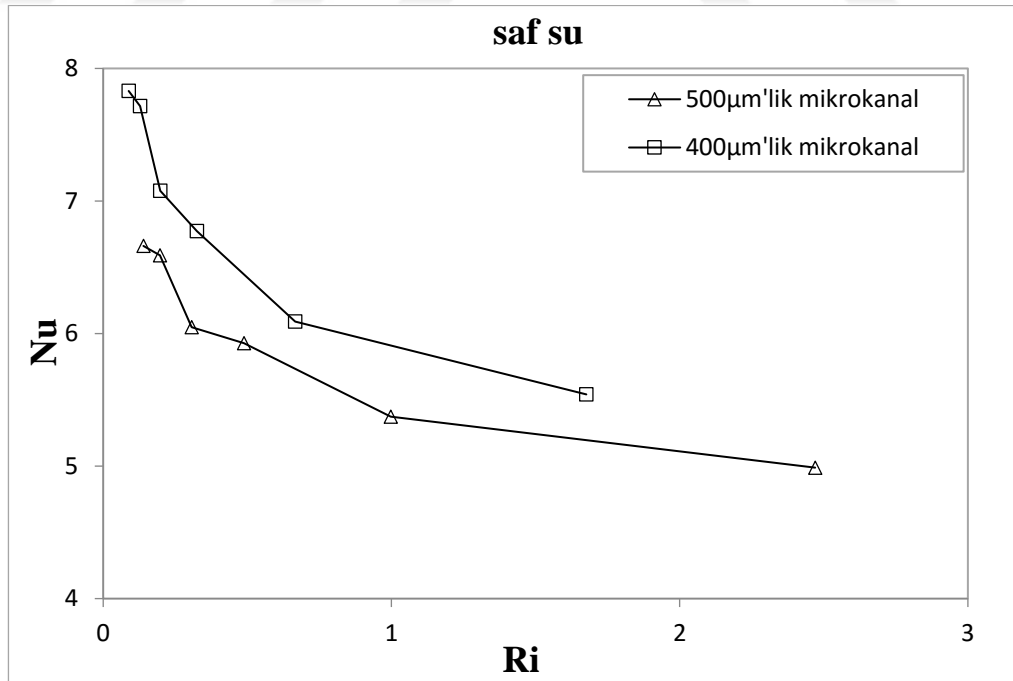
Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13’de farklı kanal genişliğinde her bir akışkan için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi sunulmuştur. Verilen şekillerde Nusselt sayısının, Reynolds sayısı ile değişimi bütün akışkanlar için aynı eğilimdedir. Kanal genişliğinin küçülmesi etkin ısı transfer yüzey alanını arttırmaktadır. Bu artış, ısı taşınım katsayısını dolayısıyla Nusselt sayısının artmasına sebep olmaktadır. Şekillerden de görüleceği üzere kanal genişliğindeki azalma, deneysel Nusselt sayısını belirgin bir şekilde arttırmıştır. Sunulan şekiller ele alındığında, hacimsel konsantrasyondaki artış ve kanal genişliğindeki azalış deneysel Nusselt sayısında ciddi bir artış meydana getirmiştir. Bunun yanısıra en yüksek Nusselt sayısı 7,4 olarak, 400µm kanal genişliğindeki mikrokanal diziliminde, hacimsel 0,5’lik SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanında belirlenmiştir. Ayrıca kanal genişliğindeki 100µm’lik küçülmeye karşılık Nusselt sayısı yaklaşık olarak %12 büyümüştür.



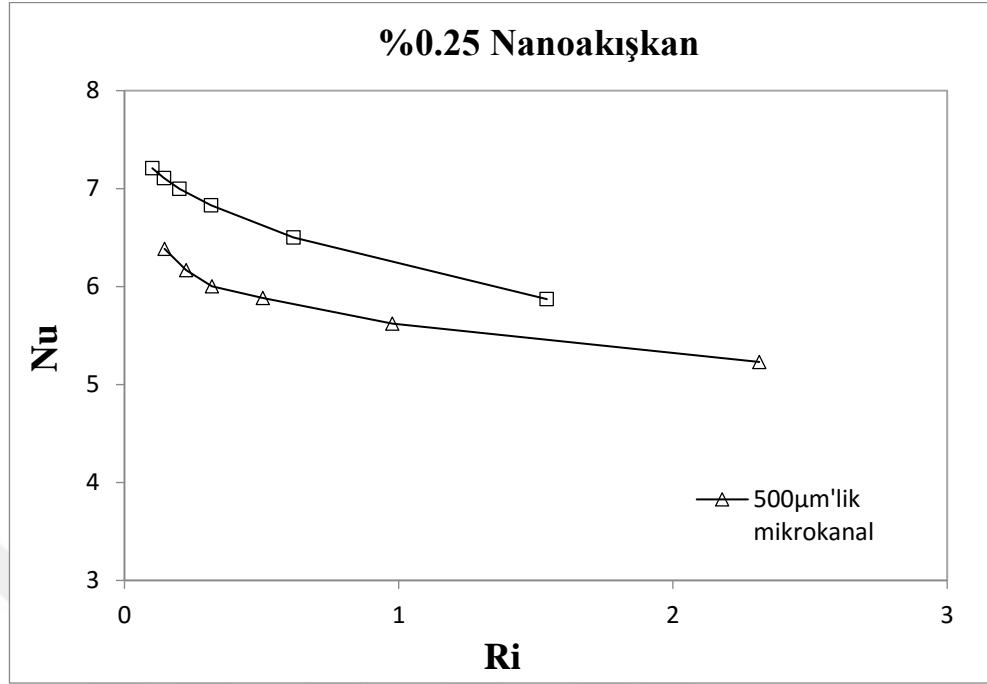
**Şekil 4.13.** 500µm kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



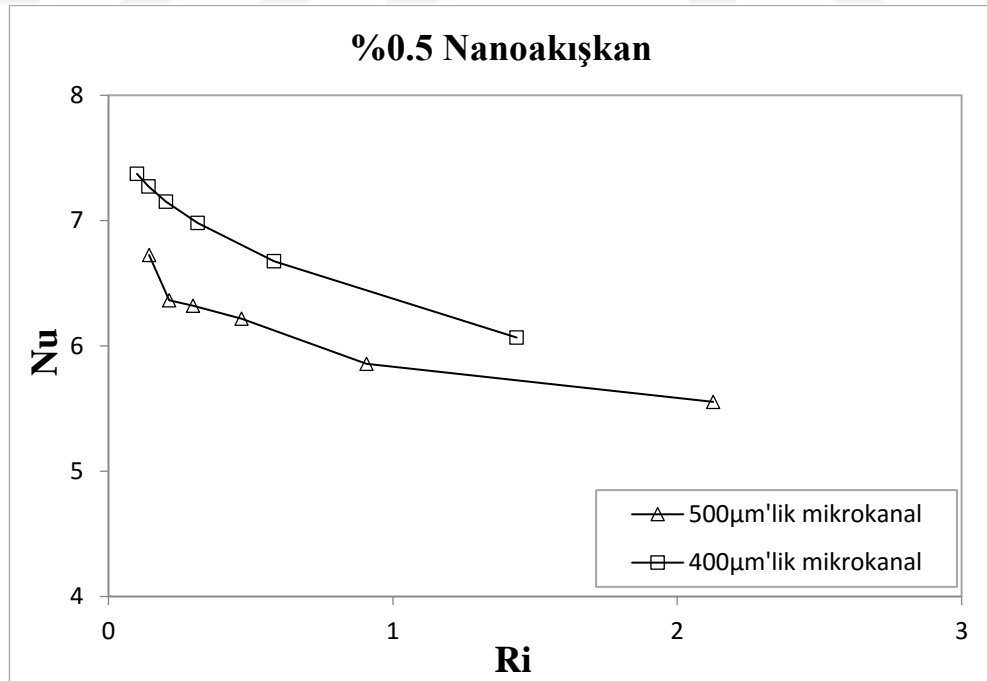
**Şekil 4.14.** 400 $\mu$ m kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



**Şekil 4.15.** Farklı kanal genişliğinde saf su için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



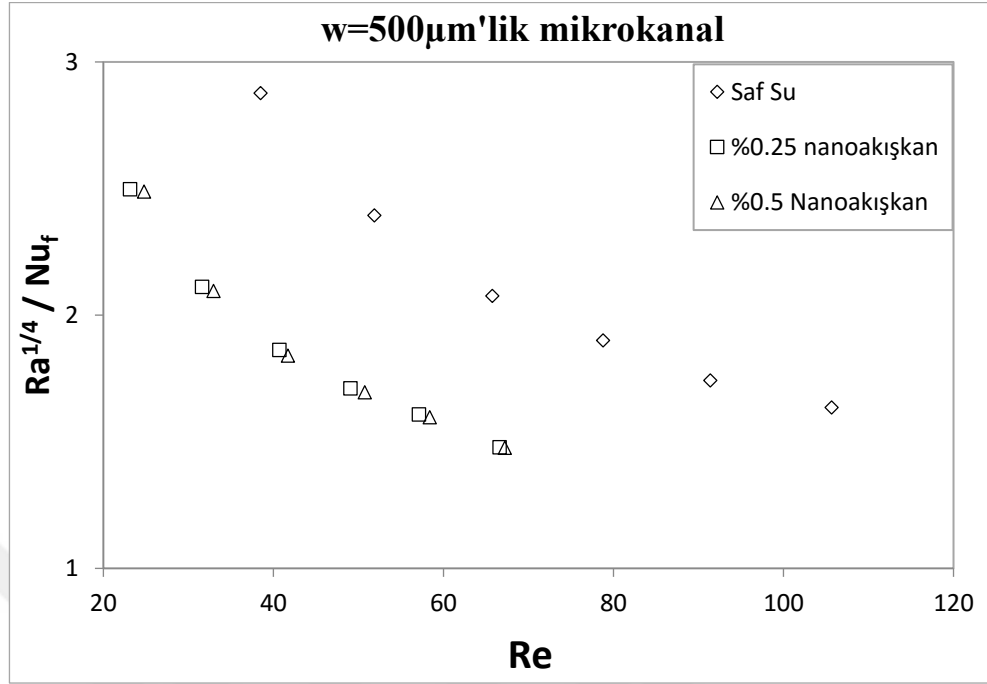
**Şekil 4.16.** Farklı kanal genişliğinde %0,25 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



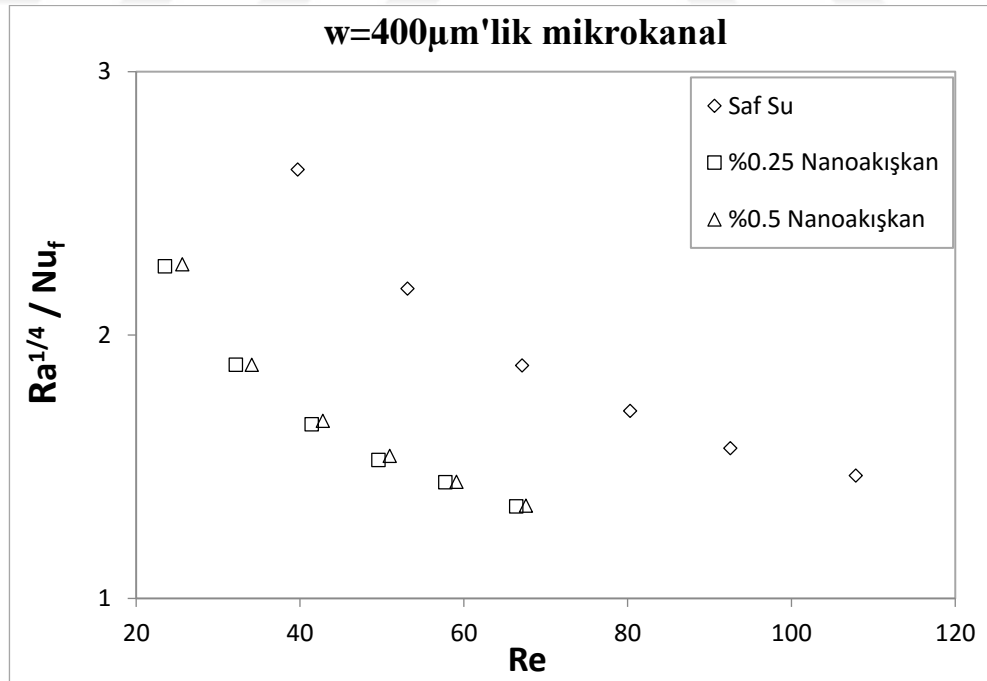
**Şekil 4.17.** Farklı kanal genişliğinde %0,5 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



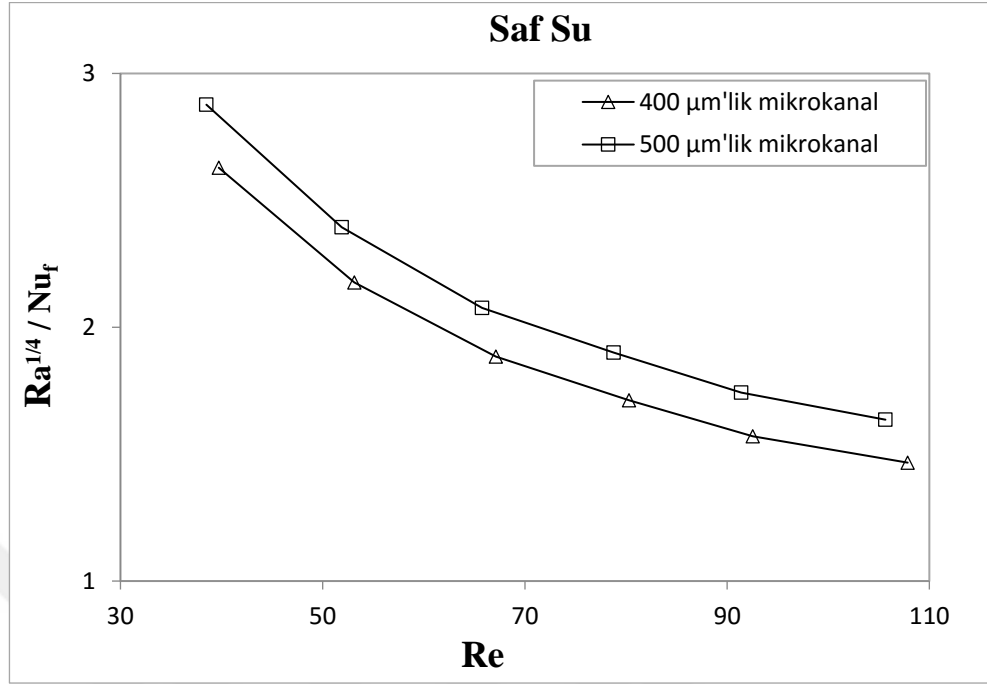
Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’da kanal genişliği sabit tutularak farklı akışkan türleri için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi verilmiştir. Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17’de ise kullanılan her bir akışkan için farklı kanal genişliklerinde Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi sunulmuştur. Richardson sayısı, ısı transfer mekanizmasının (doğal taşınım, zorlanmış taşınım ya da karma taşınım) belirlenmesinde yol gösterici bir büyüklüktür. Doğal taşınım şartlarının gerçekleşmesi için Richardson sayısının 1’den çok küçük, zorlanmış taşınım şartlarının gerçekleşmesi için 1’den çok büyük ve karma taşınım şartlarının gerçekleşmesi için 0,01 ile 10 arasında olması gerekmektedir. Kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanan Richardson sayısının, verilen bütün şekillerde karma taşınım sınırları içerisinde kaldığı açıkça görülebilmektedir. Şekillerde, Richardson sayısının artışı ile Nusselt sayısı azalmıştır bu da ısı transfer hızının azaldığını gösterir. Richardson sayısının artması, Grashof sayısındaki artışın Reynolds sayısındaki artıştan fazla olması anlamına gelmektedir. Bu durumda, iki büyüklüğün tanımlarından yola çıkarak kaldırma kuvvetlerinin atalet kuvvetlerinden daha baskın olduğu anlaşılmaktadır. Sabit Richardson sayısında en yüksek Nusselt sayısı değerine hacimsel %0,5 nanoakışkanında ve 400µm kanal genişliğinde ulaşılmıştır.



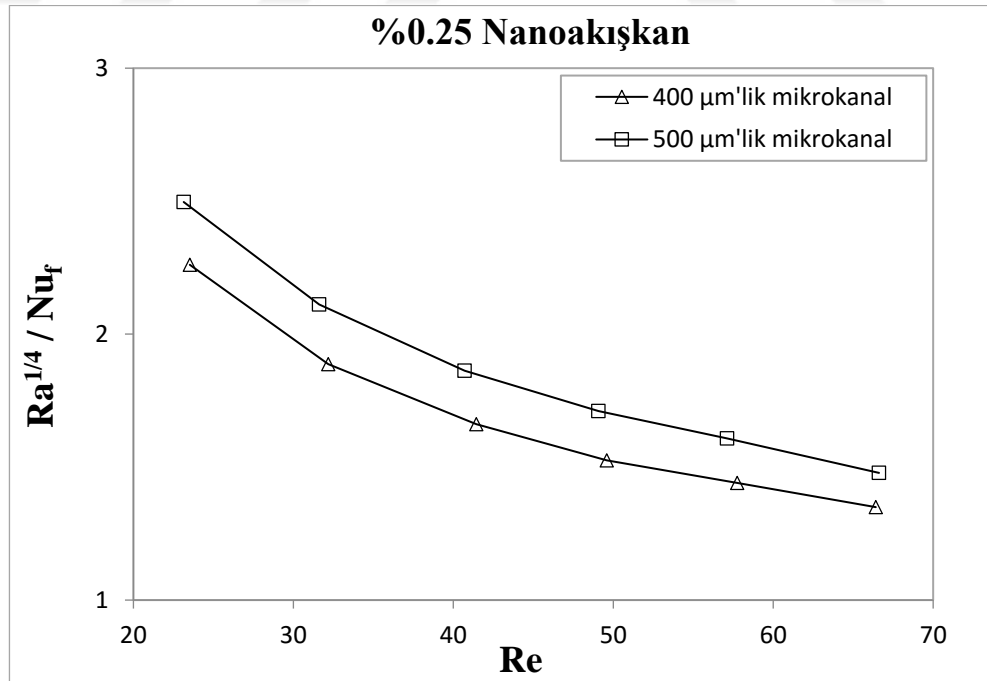
**Şekil 4.18.** 500 $\mu$ m kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi



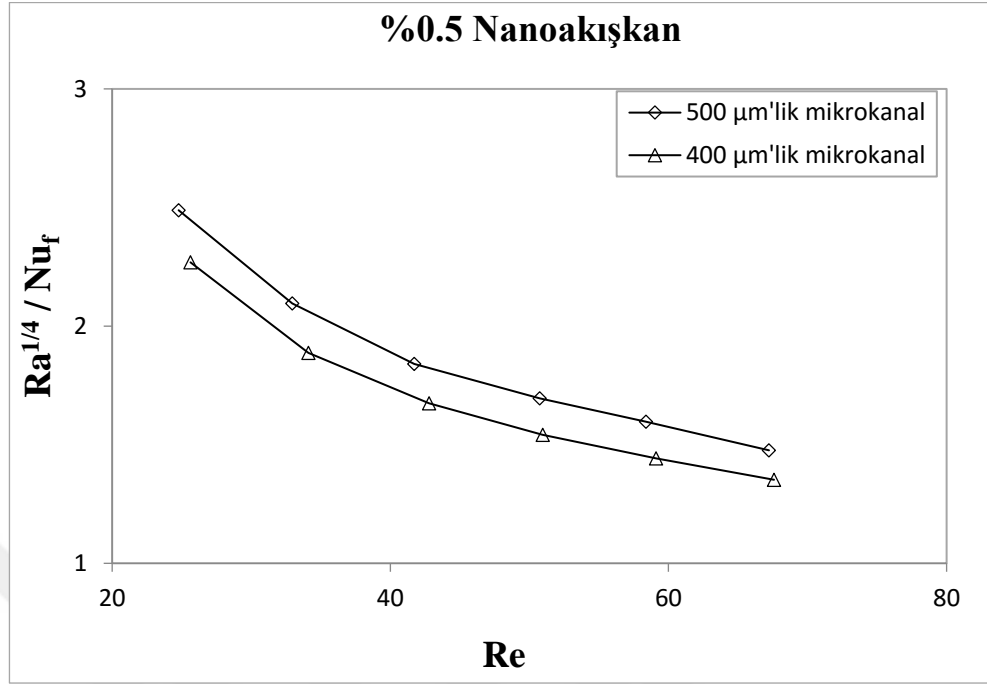
**Şekil 4.19.** 400 $\mu$ m kanal genişliğinde farklı iş akışkanları için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi



**Şekil 4.20.** Saf su için farklı kanal genişliklerinde  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi

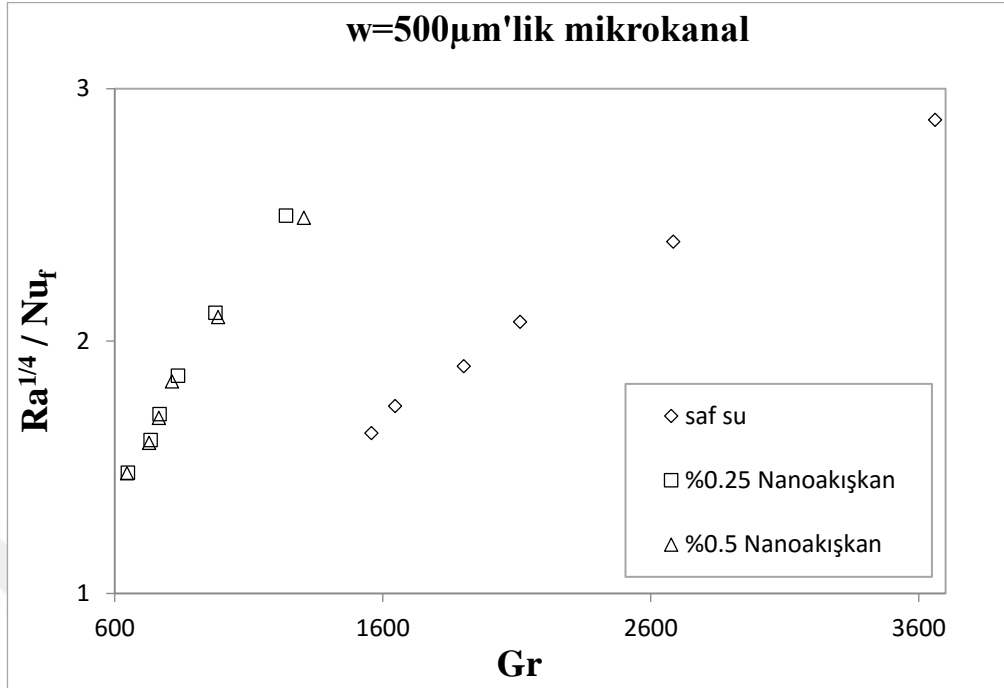


**Şekil 4.21.** %0.25  $SiO_2$ -saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi

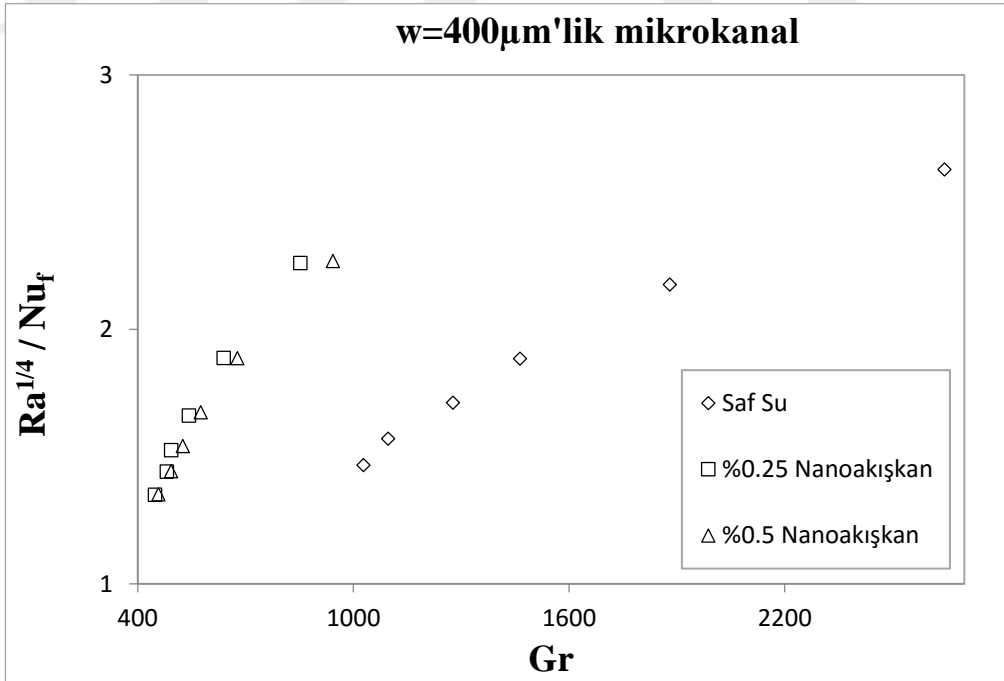


**Şekil 4.22.** %0.5 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi

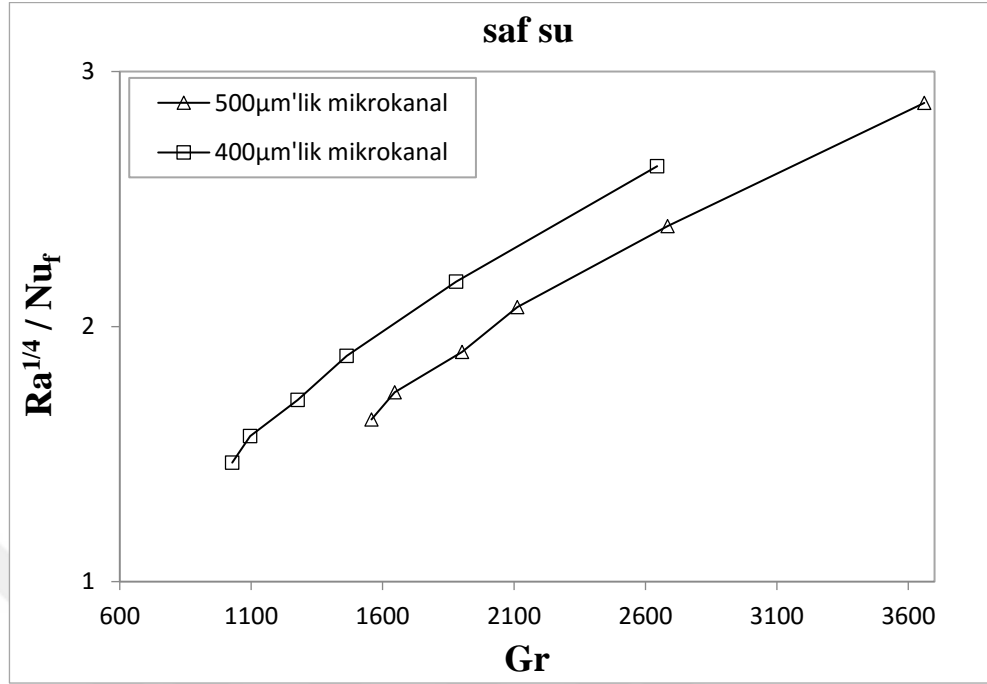
Şekil 4.18 ve 4.19’da farklı türdeki iş akışkanları için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Reynolds sayısı ile değişimi sunulmuşken, Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22’de sırası ile saf su, hacimsel %0,25 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı ve hacimsel %0,5 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  sayısının değişimi gösterilmiştir.  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinde,  $Ra^{1/4}$  terimi karma taşınımında transfer edilen ısının doğal taşınım ile iletilen kısmını belirtirken,  $Nu_f$  terimi ise zorlanmış taşınım etkinliğini ifade etmektedir. Bir ısı transferi mekanizmasında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin 1’e eşit olması doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin eşit olduğu anlamına gelmektedir. Yapılan deneysel çalışmada  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesi yaklaşık olarak 1 ila 3 aralığında değerler almıştır. Şekillerde görüldüğü gibi bütün akışkan türlerinde  $Ra^{1/4}/Nu_f$  sayısı azalma meylinindedir. Bu da, zorlanmış taşınım etkilerinin doğal taşınım göre daha baskın olduğu şeklinde yorumlanır. Bunun temel sebebi, Reynolds sayısının artması ile atalet kuvvetlerinin kaldırma kuvvetlerinden daha baskın hale gelmesidir.



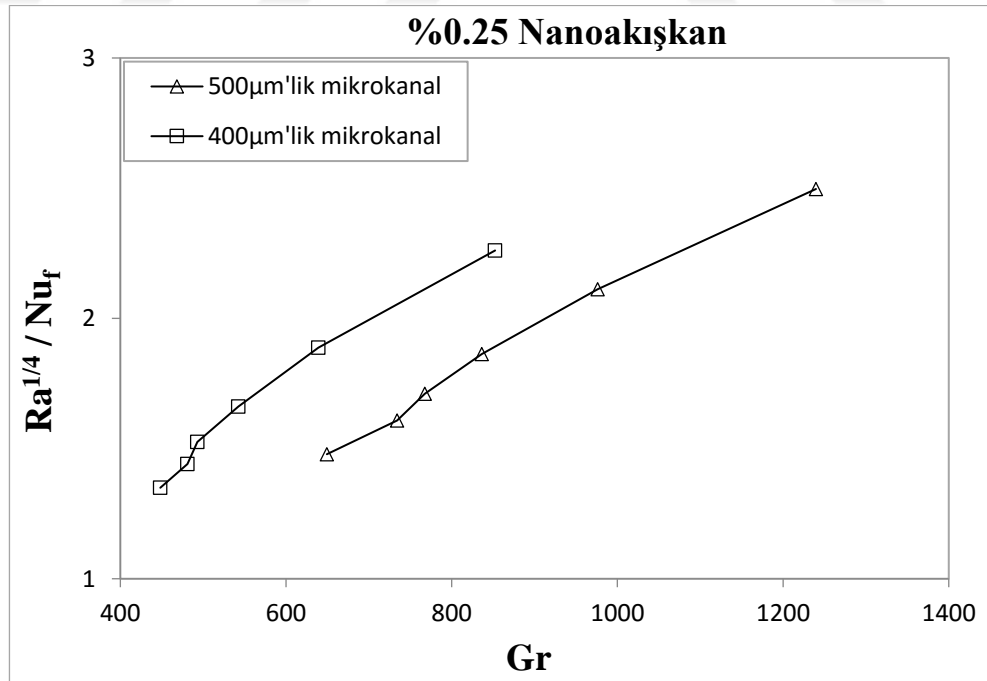
Şekil 4.23. 500 $\mu$ m kanal genişliğinde farklı akışkanlar için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin değişimi



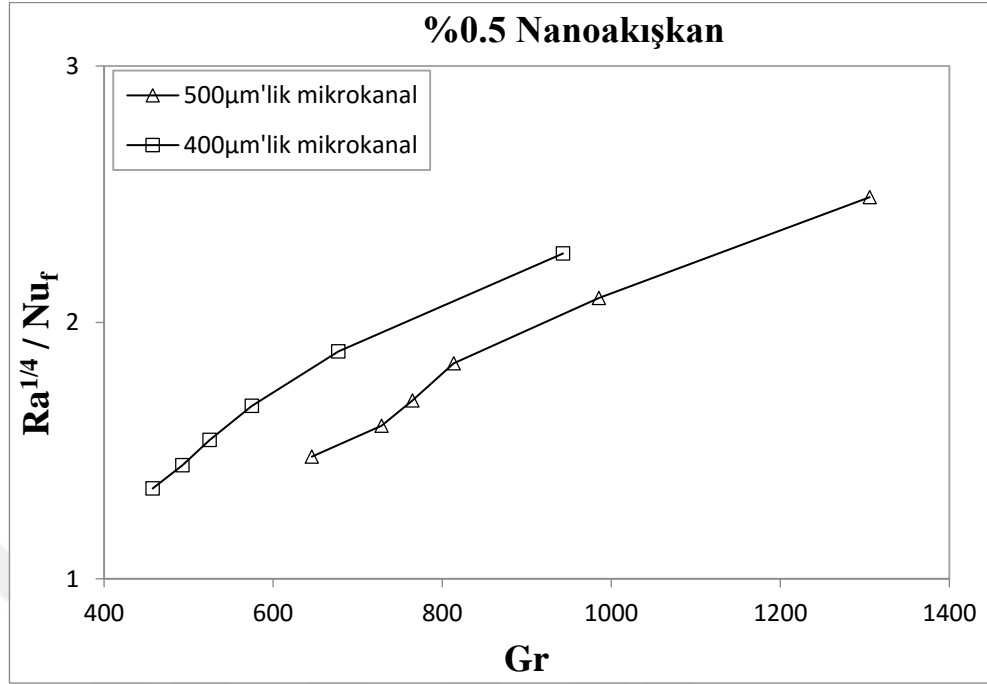
Şekil 4.24. 400 $\mu$ m kanal genişliğinde farklı akışkanlar için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin değişimi



**Şekil 4.25.** Saf su için farklı kanal genişliklerinde  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi



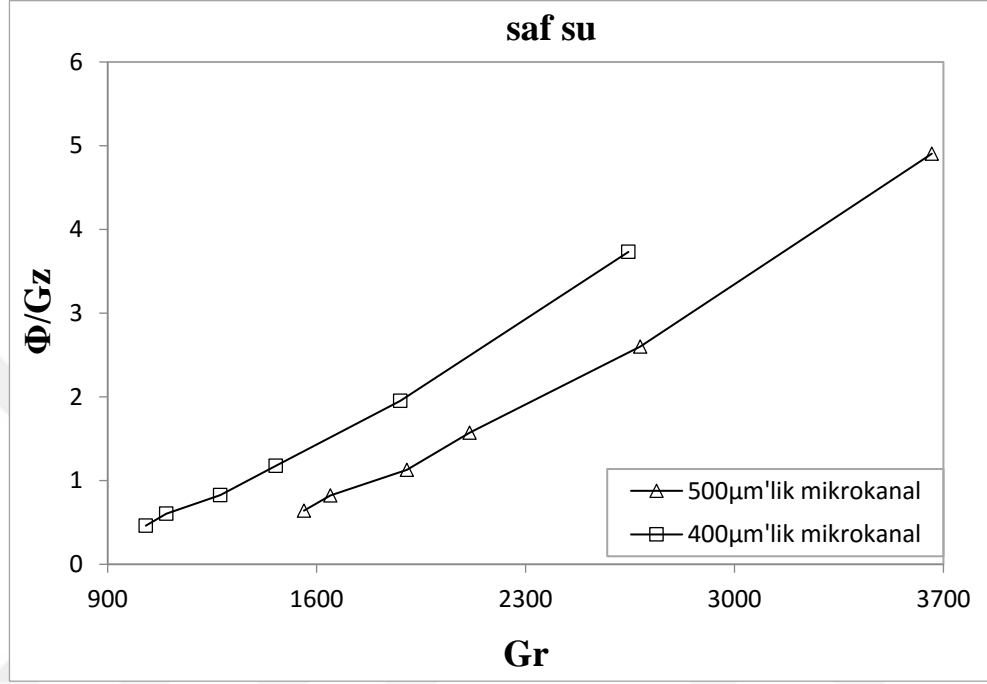
**Şekil 4.26.** %0.25 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi



**Şekil 4.27.** %0.5 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi

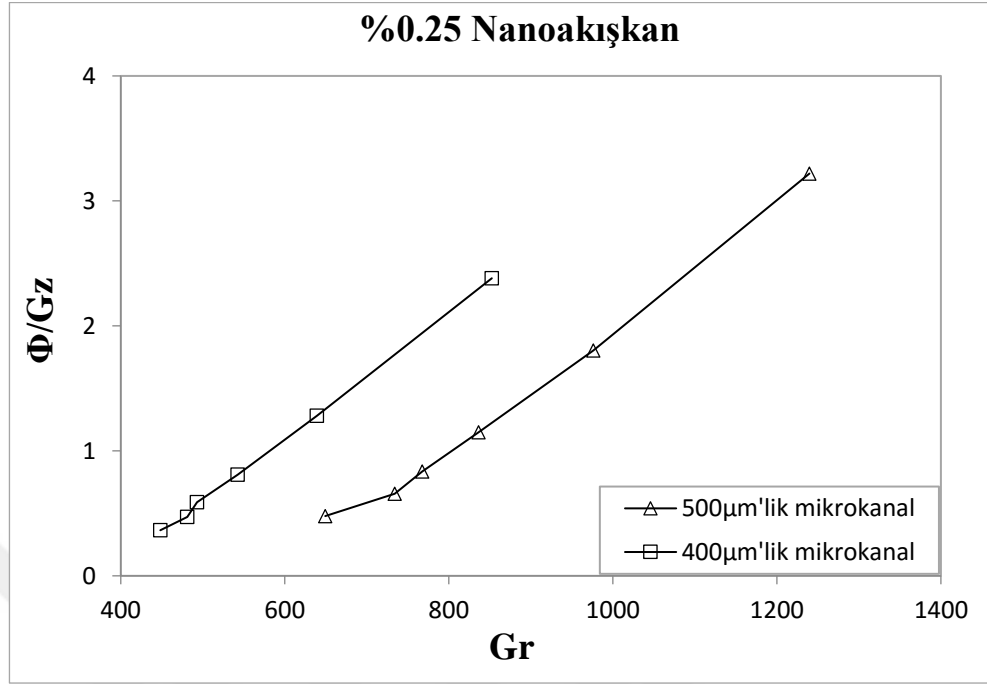
Grashof sayısı, kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır. Bu tanımdan yola çıkarak Grashof sayısının artması kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere göre etkinliğinin artması anlamına gelir. Dolayısıyla, doğal taşınımın zorlanmış taşınım oranı olarak bilinen  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin, Grashof sayısındaki artışa karşılık artması beklenen bir sonuçtur. Şekil 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 ve 4.27'da  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi verilmiştir. Isı transfer verileri incelendiği takdirde Grashof sayısındaki artışın  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesini arttırdığı görülmektedir. Temel akışkan içerisindeki partikül oranı  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesini arttıran unsurlardan birisidir. Deneysel çalışmada kullanılan 10nm boyutundaki SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin temel akışkan içerisine ilave edilmesi ile elde edilen nanoakışkanın viskozitesindeki artış, ısı iletkenliğindeki artışa oranla daha büyüktür. Bu durum, nanoakışkan Prandtl sayısının saf su Prandtl sayısından daha büyük olmasına sebep olur. Sabit bir Grashof sayısında, Prandtl sayısındaki artış Rayleigh sayısını dolayısıyla doğal taşınım etkilerini arttırmıştır. Ayrıca sunulan şekillerde bütün iş akışkanlarında sabit Grashof sayısı için, kanal genişliğinin azalması ısı taşınım katsayısını yani toplam Nusselt sayısını arttırmıştır. Nusselt sayısındaki bu artış doğal taşınım etkilerinin artmasından

kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, sabit Grashof sayısında  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesi kanal genişliğinin azalması ile artmaktadır.

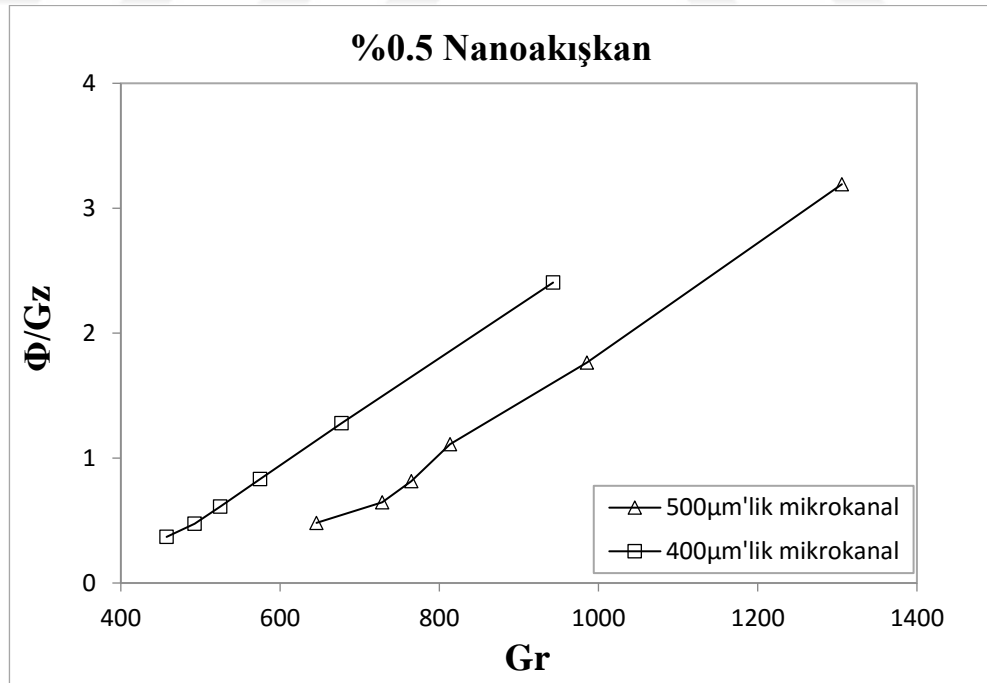


**Şekil 4.28.** Saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde  $\Phi/Gz$  ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi





**Şekil 4.29.** %0,25 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde  $\Phi/Gz$  ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi



**Şekil 4.30.** %0,5 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı için farklı kanal genişliklerinde  $\Phi/Gz$  ifadesinin Grashof sayısı ile değişimi

$\Phi/Gz$  doğal taşınımın toplam ısı transferine oranını ifade eden bir büyüklüktür, bu ifadenin, farklı kanal genişliklerinde Grashof sayısı ile değişimi bütün akışkanlar için Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da verilmiştir. Bir Grashof sayısına karşılık  $\Phi/Gz$  ifadesinin büyüklüğü, ısı transfer mekanizmasındaki doğal taşınım etkisini yorumlayabilmemize yardımcı olur. Verilen ısı transferi sonuçlarına göre aynı Grashof sayısında tüm akışkan türlerinde, kanal genişliğinin azalması doğal taşınım etkilerini arttırmıştır.  $\Phi/Gz$  değerinin artması karma taşınımında doğal taşınım etkilerini arttırdığı gibi sıfıra yaklaşması halinde ise doğal taşınım etkilerinden bahsetmek söz konusu değildir. Temel akışkan içerisine  $SiO_2$  partiküllerinin ilave edilmesi  $\Phi/Gz$  değerini bir miktar arttırmıştır. Bu durum Brownian hareketlerinden kaynaklanabilir. Hacimsel partikül konsantrasyonundaki artış Brownian etkilerini artırır, dolayısıyla doğal taşınım etkilerini de arttırmaktadır.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada paralel konumlandırılmış 25 adet 500 $\mu$ m ve 31 adet 400 $\mu$ m kanal genişliğindeki mikrokanal dizilimlerinde karma taşınım ile ısı transferi deneyleri yapılmıştır. İki farklı hacimsel konsantrasyondaki (%0,25 ve %0,5) SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı ve saf su kullanılarak, geleneksel iş akışkanına termal iletkenliği iyi olan nanopartikül ilavesinin ısı performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışma, 20-105 aralığındaki Reynolds sayıları için yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilmiş veriler değerlendirilerek aşağıda sonuç ve öneriler sıralanmıştır.

- Hazırlanan nanoakışkanlarda topaklanma ve çökelme gibi problemler görülmemiştir.
- Saf suya eklenen SiO<sub>2</sub> partiküllerinin akışkan ısı iletkenliğini arttırdığı belirlenmiştir. İlave edilen nano boyutlu partiküllerin karışım içerisindeki hacimsel konsantrasyonunun artışı ısı performansını olumlu yönde etkilediği saptanmıştır. Ayrıca, ölçüm sıcaklıkları aralığında (20-60°C) artan sıcaklık, bütün akışkanlar için ısı iletkenliğini arttırmıştır. En yüksek konsantrasyonda ısı iletkenlik sıcaklıktan daha belirgin bir şekilde etkilenmiştir.
- Dinamik viskozite değerleri küçükten başlayarak sırası ile saf su, %0.25 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı ve %0.5 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkanı şeklindedir. Bütün akışkanların dinamik viskoziteleri 20°C ila 60°C sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Deneysel çalışmada kullanılan bütün akışkanların viskozite eğrileri aynı eğilimdedir. Sıcaklık arttıkça, viskozite değerleri saf su ve nanoakışkanlarda azalmıştır.
- En yüksek ısı iletkenlik değeri %0,5 lik nanoakışkanda 60°C'de okunmuş olup, değeri 0,683 W/m.K'dir. Bu haliyle saf suya göre ısı iletkenlik yaklaşık %12 artmıştır.
- En düşük viskozite ise 60°C'de saf suda 4.37×10<sup>-4</sup>kg/m.s olarak ölçülmüştür. En yüksek viskozite değerlerine sahip %0,5'lik SiO<sub>2</sub> nanoakışkanında, bütün sıcaklıklarda saf suya kıyasla yaklaşık olarak %50'lik bir artış meydana gelmiştir.
- Saf su verileri Eubank-Proctor, Oliver, Brown-Thomas ve McAdams modelleri ile karşılaştırılarak genel anlamda uyum içerisinde oldukları görülmüştür.

- İki kanal genişliğinde dizayn edilmiş dikdörtgensel çoklu mikrokanallarda, her bir akışkan (saf su, %0,25 ve %0,5 SiO<sub>2</sub>-saf su nanoakışkan) için ve her bir mikrokanal dizilimi (500µm ve 400µm) için ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi incelenmiştir. En yüksek ısı transfer katsayısı 400µm kanal genişlikli mikrokanal diziliminde ve %0,5 hacimsel konsantrasyonlu su bazlı SiO<sub>2</sub> nanoakışkanında 1956 W/m<sup>2</sup>K olarak hesaplanmıştır.
- Farklı kanal genişliği ve farklı iş akışkanları için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi incelenmiştir. Sonuç olarak kanal genişliğinin azalması ve partikül yoğunluğunun artması ısı transferini arttırdığı ortaya konmuştur.
- Hacimsel partikül yoğunluğu ile ısı transferinde meydana gelen artışa Brownian hareketinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Kanal genişliğindeki azalışla ısı transfer hızındaki artışın sebebi ise, ısı transfer yüzey alanının büyümesi ve doğal taşınım etkilerinin kuvvetlenmesi olarak açıklanabilir.
- 500µm'lik mikrokanallarda elde edilen sonuçlara göre, Nusselt sayısı, %0,25 hacimsel oranında nanoakışkan kullanımında saf suya göre yaklaşık %8 artmıştır. Bu oran %0,5 hacimsel konsantrasyonda nanoakışkan kullanımı ile %13'e çıkmıştır.
- 400µm'lik mikrokanallarda ise bu oran benzer şekilde %0,25 hacimsel konsantrasyonlu nanoakışkan kullanımında yaklaşık olarak %17, %0,5 hacimsel konsantrasyonlu nanoakışkan kullanımında %21'dir.
- Yapılan deneylerde Richardson sayısı 0,1 ila 2,5 aralığında kalmıştır. Bu durum etkin ısı transfer mekanizmasının karma taşınım olmasını sağlamıştır. Nusselt sayısının, Richardson sayısı ile değişimi de detaylı olarak incelenmiştir. Kullanılan bütün akışkanlarda ve kanal genişliklerinde Richardson sayısı artarken Nusselt sayısı azalmıştır.
- Karma taşınım şartlarının sağlandığı ısı transfer mekanizmasında doğal ve zorlanmış taşınım etkilerini kıyaslamak için  $Ra^{1/4}/Nu_f$  ve  $\Phi/Gz$  ifadeleri kullanılmıştır.
- $Ra^{1/4}/Nu_f$  ifadesinin Reynolds sayısı ve Grashof sayısı ile değişimi detaylandırılmıştır. Reynolds sayısının artışı atalet kuvvetlerinin artışını tetiklediği için zorlanmış taşınım etkileri doğal taşınım etkilerinden daha baskın hale getirmiştir. Yine Aynı Reynolds sayısında 400µm kanal genişliğinde zorlanmış taşınım etkileri diğer

kanal dizilimine göre daha fazladır. Grashof sayısındaki artışın ise her iki kanal boyutunda da doğal taşınım etkilerini arttırmıştır.

- Doğal taşınım ile ısı transferinin toplam ısı transferine oranını ifade eden  $\Phi/Gz$  büyüklüğü, sabit Grashof sayısında hacimsel konsantrasyon artışıyla bir miktar artmıştır. Bunun sebebi Brownian hareketleri olarak düşünülmüştür. Diğer taraftan sabit Grashof sayısında kanal genişliği azaldıkça doğal taşınım etkileri artmıştır.
- Deneysel çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar gösteriyor ki, kanal genişliği ve kullanılan soğutucu akışkan çeşidi soğutma performansı için önemli temel iki unsurdur. Teknolojik imkanlar dahilinde kanal genişliğini azaltılarak soğutma performansının arttırılabileceği düşünülmektedir. Bu şekilde soğutucu boyutlarını daha da küçültmek mümkün olacaktır.

**KAYNAKLAR**

- Abareshi, M., Goharshadi, E.K., Zebarjad, S.M., Fadafan, H.K. and Youssefi, A., 2010. Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322 (24), 3895-3901.
- Abbasi, M. and Baniamerian, Z., 2014. Analytical Simulation of Flow and Heat Transfer of Two-Phase Nanofluid (Stratified Flow Regime). *International Journal of Chemical Engineering*, 2014.
- Aberoumand, S., Jafarimoghaddam, A., Moravej, M., Aberoumand, H. and Javaherdeh, K., 2016. Experimental study on the rheological behavior of silver-heat transfer oil nanofluid and suggesting two empirical based correlations for thermal conductivity and viscosity of oil based nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 101, 362-372.
- Agarwal, R., Verma, K., Agrawal, N.K., Duchaniya, R.K. and Singh, R., 2016. Synthesis, characterization, thermal conductivity and sensitivity of CuO nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1024-1036.
- Ahmadi, H., Rashidi, A., Nouralishahi, A. and Mohtasebi, S.S., 2013. Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 46, 142-147.
- Ahmed, H.E., Ahmed, M., Seder, I.M. and Salman, B., 2016. Experimental investigation for sequential triangular double-layered microchannel heat sink with nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 77, 104-115.
- 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.
- Akbarinia, A., Abdolzadeh, M. and Laur, R., 2011. Critical investigation of heat transfer enhancement using nanofluids in microchannels with slip and non-slip flow regimes. *Applied Thermal Engineering*, 31 (4), 556-565.
- Akoh, H., Tsukasaki, Y., Yatsuya, S. and Tasaki, A., 1978. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. *Journal of Crystal Growth*, 45, 495-500.
- Ali, M., El-Leathy, A. and Al-Sofyany, Z., 2014. The effect of nanofluid concentration on the cooling system of vehicles radiator. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 962510.
- Alipour, H., Karimipour, A., Safaei, M.R., Semiromi, D.T. and Akbari, O.A., 2017. Influence of T-semi attached rib on turbulent flow and heat transfer parameters of a silver-water nanofluid with different volume fractions in a three-dimensional trapezoidal microchannel. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 88, 60-76.
- Anbumeenakshi, C. and Thansekhar, M., 2017. On the effectiveness of a nanofluid cooled microchannel heat sink under non-uniform heating condition. *Applied Thermal Engineering*, 113, 1437-1443.

- Angayarkanni, S. and Philip, J., 2014. Effect of nanoparticles aggregation on thermal and electrical conductivities of nanofluids. *Journal of Nanofluids*, 3 (1), 17-25.
- Anonim, 2017. ENIAC World's First Electronic Computer 2017, [www.old-computers.com/history/detail.asp?n=61](http://www.old-computers.com/history/detail.asp?n=61), (10.08.2017).
- Anonim, 2017. [www.termopar.com.tr](http://www.termopar.com.tr), 2017. 2017, (15.06.2017).
- Anonymous, 2017. [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com), 2017. silicon dioxide properties, 2017, [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com), (10.01.2017).
- Anoop, K., Kabelac, S., Sundararajan, T. and Das, S.K., 2009a. Rheological and flow characteristics of nanofluids: influence of electroviscous effects and particle agglomeration. *Journal of Applied Physics*, 106 (3), 034909.
- Anoop, K., Sundararajan, T. and Das, S.K., 2009b. Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (9), 2189-2195.
- Assael, M., Metaxa, I., Arvanitidis, J., Christofilos, D. and Lioutas, C., 2005. Thermal conductivity enhancement in aqueous suspensions of carbon multi-walled and double-walled nanotubes in the presence of two different dispersants. *International Journal of Thermophysics*, 26 (3), 647-664.
- Avcı, M., 2008. Mikrokanallarda Akış ve Isı Transferi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- 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), 4331-4341.
- Batchelor, G., 1977. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of fluid mechanics*, 83 (1), 97-117.
- Beck, M.P., Yuan, Y., Warriar, P. and Teja, A.S., 2009. The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 11 (5), 1129-1136.
- Beck, M.P., Yuan, Y., Warriar, P. and Teja, A.S., 2010. The thermal conductivity of alumina nanofluids in water, ethylene glycol, and ethylene glycol+ water mixtures. *Journal of Nanoparticle Research*, 12 (4), 1469-1477.
- Brinkman, H., 1952. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20 (4), 571-571.
- Brown, C. and Gauvin, W., 1965. Combined free-and-forced convection: I. Heat transfer in aiding flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 43 (6), 306-312.
- Brown, C. and Gavvin, W., 1965. Combined free-and-forced convection: II. Heat transfer in opposing flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 43 (6), 313-318.
- Buonomo, B., Manca, O., Marinelli, L. and Nardini, S., 2015. Effect of temperature and sonication time on nanofluid thermal conductivity measurements by nano-flash method. *Applied Thermal Engineering*, 91, 181-190.
- Canay, A., 2007. Mikro Kanallarda Isı Transferi, Sakarya Üniversitesi.
- Çengel, Y.A., 2010. Isı ve Kütle Transferi 3.baskı. İzmir Güven Kitabevi.
- Cetin, M., 2010. Design and Experimental Investigation of a Microchannel Heat Exchanger, Middle East Technical University.

- Ceylan, A., Jastrzembski, K. and Shah, S.I., 2006. Enhanced solubility Ag-Cu nanoparticles and their thermal transport properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37 (7), 2033-2038.
- Chabi, A., Zarrinabadi, S., Peyghambarzadeh, S., Hashemabadi, S. and Salimi, M., 2017. Local convective heat transfer coefficient and friction factor of CuO/water nanofluid in a microchannel heat sink. *Heat and Mass Transfer*, 53 (2), 661-671.
- Chandrasekar, M., Suresh, S. and Bose, A.C., 2010. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34 (2), 210-216.
- Chavan, D. and Pise, A.T., 2014. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid as a coolant. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 6 (2), 021010.
- Chen, C.-H. and Ding, C.-Y., 2011. Study on the thermal behavior and cooling performance of a nanofluid-cooled microchannel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 50 (3), 378-384.
- Chevalier, J., Tillement, O. and Ayela, F., 2007. Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. *Applied Physics Letters*, 91 (23), 233103.
- Choi, S., Zhang, Z., Yu, W., Lockwood, F. and Grulke, E., 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., 2005. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*, 87 (15), 153107.
- Chong, D., Liu, J., Yan, J. and Zhou, Z., 2007. Experimental investigation of mixed convection in a rectangular duct with a heated plate in the middle of cross section. *Heat and Mass Transfer*, 43 (12), 1283.
- 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.
- Chopkar, M., Sudarshan, S., Das, P. and Manna, I., 2008. Effect of particle size on thermal conductivity of nanofluid. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39 (7), 1535-1542.
- Chou, F. and Hwang, G., 1986. Prandtl number effect on combined free and forced laminar convection in the thermal entrance region of a horizontal rectangular channel. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64 (5), 858-861.
- Chou, F.C., 1990. Laminar mixed convection in the thermal entrance region of horizontal rectangular channels with uniform heat input axially and uniform wall temperature circumferentially. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68 (4), 577-584.
- Chougule, S.S. and Sahu, S.K., 2014. Comparative study of cooling performance of automobile radiator using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water and carbon nanotube-water nanofluid. *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, 5 (1), 010901.
- Chu, J.-C., Teng, J.-T. and Greif, R., 2010. Experimental and numerical study on the flow characteristics in curved rectangular microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 30 (13), 1558-1566.



- Chung, T.H., Lee, L.L. and Starling, K.E., 1984. Applications of kinetic gas theories and multiparameter correlation for prediction of dilute gas viscosity and thermal conductivity. *Industrial & engineering chemistry fundamentals*, 23 (1), 8-13.
- Cingarapu, S., Singh, D., Timofeeva, E.V. and Moravek, M.R., 2014. Nanofluids with encapsulated tin nanoparticles for advanced heat transfer and thermal energy storage. *International Journal of Energy Research*, 38 (1), 51-59.
- Dang, T. and Teng, J.-t., 2011. The effects of configurations on the performance of microchannel counter-flow heat exchangers—An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 31 (17), 3946-3955.
- Das, S.K., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of heat transfer*, 125 (4), 567-574.
- De Bruijn, H., 1942. The viscosity of suspensions of spherical particles.(The fundamental  $\eta$ - $c$  and  $\phi$  relations). *Recueil des travaux chimiques des Pays-Bas*, 61 (12), 863-874.
- Delavari, V. and Hashemabadi, S.H., 2014. CFD simulation of heat transfer enhancement of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ethylene glycol nanofluids in a car radiator. *Applied Thermal Engineering*, 73 (1), 380-390.
- Depew, C. and August, S.E., 1971. Heat transfer due to combined free and forced convection in a horizontal and isothermal tube. *Journal of heat transfer*, 93 (4), 380-384.
- Dilek, E.F., 2009. Nanoakışkanların Hazırlanması ve Isıl iletkenliklerinin Belirlenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Ding, Y., Alias, H., Wen, D. and Williams, R.A., 2006. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (1), 240-250.
- 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), 2149-2158.
- 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), 085901.
- Dominic, A., Sarangan, J., Suresh, S. and Devahdhanush, V., 2017. An experimental study of heat transfer and pressure drop characteristics of divergent wavy minichannels using nanofluids. *Heat and Mass Transfer*, 53 (3), 959-971.
- Drew, D.A. and Passman, S.L., 2006. *Theory of multicomponent fluids*, 135. Springer Science & Business Media.
- Duangthongsuk, W. and Wongwises, S., 2009. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33 (4), 706-714.
- Eastman, J., Choi, U., Li, S., Thompson, L. and Lee, S., 1996. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 457.
- Eastman, J.A., Choi, S., Li, S., Yu, W. and Thompson, L., 2001. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 78 (6), 718-720.

- Ebrahimi, M., Farhadi, M., Sedighi, K. and Akbarzade, S., 2014. Experimental investigation of force convection heat transfer in a car radiator filled with SiO<sub>2</sub>-water nanofluid. *IJE Trans B: Appl*, 27 (2), 333-340.
- Eilers, v.H., 1941. Die viskosität von emulsionen hochviskoser stoffe als funktion der konzentration. *Colloid & Polymer Science*, 97 (3), 313-321.
- Einstein, A., 1906. Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. *Annalen der Physik*, 324 (2), 289-306.
- Elias, M., Mahbubul, I., Saidur, R., Sohel, M., Shahrul, I., Khaleduzzaman, S. and Sadeghipour, S., 2014. Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles suspended in car radiator coolant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 54, 48-53.
- Ergu, Ö.B., 2011. Dairesel ve Dikdörtgen mikro kanallarda Basınç Düşüşü ve Kütle Transferinin İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Esfe, M.H., Afrand, M., Karimipour, A., Yan, W.-M. and Sina, N., 2015a. An experimental study on thermal conductivity of MgO nanoparticles suspended in a binary mixture of water and ethylene glycol. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, 173-175.
- Esfe, M.H., Yan, W.-M., Akbari, M., Karimipour, A. and Hassani, M., 2015b. Experimental study on thermal conductivity of DWCNT-ZnO/water-EG nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 68, 248-251.
- Fazeli, S.A., Hashemi, S.M.H., Zirakzadeh, H. and Ashjaee, M., 2012. Experimental and numerical investigation of heat transfer in a miniature heat sink utilizing silica nanofluid. *Superlattices and Microstructures*, 51 (2), 247-264.
- Frankel, N. and Acrivos, A., 1967. On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres. *Chemical Engineering Science*, 22 (6), 847-853.
- Fullman, R., 1991. Measurement of particle sizes in opaque bodies. General Electric Research Laboratory.
- Garg, J., Poudel, B., Chiesa, M., Gordon, J., Ma, J., Wang, J., Ren, Z., Kang, Y., Ohtani, H. and Nanda, J., 2008. Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid. *Journal of Applied Physics*, 103 (7), 074301.
- Ghozatloo, A., Shariaty-Niasar, M. and Rashidi, A.M., 2013. Preparation of nanofluids from functionalized graphene by new alkaline method and study on the thermal conductivity and stability. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 89-94.
- Graham, A.L., 1981. On the viscosity of suspensions of solid spheres. *Applied Scientific Research*, 37 (3), 275-286.
- Harish, S., Ishikawa, K., Einarsson, E., Aikawa, S., Chiashi, S., Shiomi, J. and Maruyama, S., 2012a. Enhanced thermal conductivity of ethylene glycol with single-walled carbon nanotube inclusions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (13), 3885-3890.
- Harish, S., Ishikawa, K., Einarsson, E., Aikawa, S., Inoue, T., Zhao, P., Watanabe, M., Chiashi, S., Shiomi, J. and Maruyama, S., 2012b. Temperature dependent thermal conductivity increase of aqueous nanofluid with single walled carbon nanotube inclusion. *Materials Express*, 2 (3), 213-223.

- Hatami, M., Ganji, D.D. and Gorji-Bandpy, M., 2014. CFD simulation and optimization of ICEs exhaust heat recovery using different coolants and fin dimensions in heat exchanger. *Neural Computing and Applications*, 25 (7-8), 2079-2090.
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D. and Lu, H., 2007. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 (11), 2272-2281.
- Heris, S.Z., Shokrgozar, M., Poorpharhang, S., Shanbedi, M. and Noie, S., 2014. Experimental study of heat transfer of a car radiator with CuO/ethylene glycol-water as a coolant. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 35 (5), 677-684.
- Hojjat, M., Etemad, S.G., Bagheri, R. and Thibault, J., 2011. Convective heat transfer of non-Newtonian nanofluids through a uniformly heated circular tube. *International Journal of Thermal Sciences*, 50 (4), 525-531.
- Hong, T.-K., Yang, H.-S. and Choi, C., 2005. Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 97 (6), 064311.
- Hsieh, S.-S. and Lin, C.-Y., 2009. Convective heat transfer in liquid microchannels with hydrophobic and hydrophilic surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (1), 260-270.
- Huminic, G. and Huminic, A., 2012. The cooling performances evaluation of nanofluids in a compact heat exchanger. 0148-7191, SAE Technical Paper.
- Huminic, G. and Huminic, A., 2013. Numerical analysis of laminar flow heat transfer of nanofluids in a flattened tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 52-57.
- Hung, T.-C. and Yan, W.-M., 2012. Enhancement of thermal performance in double-layered microchannel heat sink with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (11), 3225-3238.
- Hung, T.-C., Yan, W.-M., Wang, X.-D. and Chang, C.-Y., 2012. Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (9), 2559-2570.
- Hussein, A.M., Bakar, R. and Kadrigama, K., 2014a. Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2, 50-61.
- Hussein, A.M., Bakar, R., Kadrigama, K. and Sharma, K., 2014b. Heat transfer augmentation of a car radiator using nanofluids. *Heat and Mass Transfer*, 50 (11), 1553-1561.
- Hussein, A.M., Bakar, R., Kadrigama, K. and Sharma, K., 2014c. Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 53, 195-202.
- Hwang, Y., Ahn, Y., Shin, H., Lee, C., Kim, G., Park, H. and Lee, J., 2006. Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. *Current Applied Physics*, 6 (6), 1068-1071.
- Hwang, Y.-j., Lee, J., Lee, C., Jung, Y., Cheong, S., Lee, C., Ku, B. and Jang, S., 2007. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. *Thermochimica Acta*, 455 (1), 70-74.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P. and Derbentli, T., , 2010. Isı ve kütle geçişinin temelleri. Literatür Yayıncılık.

- Islam, N., Gaitonde, U. and Sharma, G., 2001. Mixed convection heat transfer in the entrance region of horizontal annuli. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44 (11), 2107-2120.
- Jang, S.P. and Choi, S.U., 2006. Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 26 (17), 2457-2463.
- Jong, W., Kuo, T., Ho, S., Chiu, H. and Peng, S., 2007. Flows in rectangular microchannels driven by capillary force and gravity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34 (2), 186-196.
- 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), 466-472.
- Kandlikar, S.G., 2002a. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26 (2), 389-407.
- Kandlikar, S.G., 2002b. Two-phase flow patterns, pressure drop, and heat transfer during boiling in minichannel flow passages of compact evaporators. *Heat Transfer Engineering*, 23 (1), 5-23.
- Karimi, A., Sadatlu, M.A.A., Saberi, B., Shariatmadar, H. and Ashjaee, M., 2015. Experimental investigation on thermal conductivity of water based nickel ferrite nanofluids. *Advanced Powder Technology*, 26 (6), 1529-1536.
- Khedkar, R.S., Shrivastava, N., Sonawane, S.S. and Wasewar, K.L., 2016. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-ethylene glycol nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 73, 54-61.
- Khedkar, R.S., Sonawane, S.S. and Wasewar, K.L., 2012. Influence of CuO nanoparticles in enhancing the thermal conductivity of water and monoethylene glycol based nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39 (5), 665-669.
- Kılıc, İ.B., 2012. Bir Mikro Kanal Isı Alıcısında Gerçekleşen Isı Transferinin Sayısal Analizi, Fen bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi.
- 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.
- Kitano, T., Kataoka, T. and Shirota, T., 1981. An empirical equation of the relative viscosity of polymer melts filled with various inorganic fillers. *Rheologica Acta*, 20 (2), 207-209.
- Kole, M. and Dey, T., 2010a. Experimental investigation on the thermal conductivity and viscosity of engine coolant based alumina nanofluids, AIP Conference Proceedings. AIP, pp. 120-124.
- Kole, M. and Dey, T., 2010b. Thermal conductivity and viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid based on car engine coolant. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43 (31), 315501.
- Kole, M. and Dey, T., 2010c. Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34 (6), 677-683.
- Koo, J. and Kleinstreuer, C., 2005. Impact analysis of nanoparticle motion mechanisms on the thermal conductivity of nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32 (9), 1111-1118.

- 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.
- Kulkarni, D.P., Das, D.K. and Chukwu, G.A., 2006. Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension (nanofluid). *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 6 (4), 1150-1154.
- Kumar, P.M., Kumar, J. and Suresh, S., 2012. Review on nanofluid theoretical viscosity models. *IJEIR*, 1 (2), 182-188.
- 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), 452-463.
- Lee, J.-H., Hwang, K.S., Jang, S.P., Lee, B.H., Kim, J.H., Choi, S.U. and Choi, C.J., 2008. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (11), 2651-2656.
- 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), 433-438.
- Leong, K., Saidur, R., Kazi, S. and Mamun, A., 2010. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). *Applied Thermal Engineering*, 30 (17), 2685-2692.
- Li, C.H. and Peterson, G., 2006. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *Journal of Applied Physics*, 99 (8), 084314.
- Li, C.H. and Peterson, G., 2007. The effect of particle size on the effective thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 101 (4), 044312.
- Li, H., Wang, L., He, Y., Hu, Y., Zhu, J. and Jiang, B., 2015. Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 88, 363-368.
- Li, S. and Eastman, J., 1999. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *J. Heat Transf*, 121 (2), 280-9.
- Li, X., Zhu, D., Wang, X., Wang, N., Gao, J. and Li, H., 2008. Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids. *Thermochimica Acta*, 469 (1), 98-103.
- Li, X., Zou, C., Zhou, L. and Qi, A., 2016. Experimental study on the thermo-physical properties of diathermic oil based SiC nanofluids for high temperature applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 631-637.
- 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.
- Liu, H., Bai, M. and Qu, Y., 2013. The impact of oil-based diamond nanofluids on diesel engine performance, *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*. Springer, pp. 1313-1319.
- 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.

- Lundgren, T.S., 1972. Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres. *Journal of fluid mechanics*, 51 (2), 273-299.
- Lv, J., Zhou, L., Bai, M., Liu, J.W. and Xu, Z., 2010. Numerical simulation of the improvement to the heat transfer within the internal combustion engine by the application of nanofluids. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 17 (1).
- Maïga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N. and Roy, G., 2004. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. *Superlattices and Microstructures*, 35 (3), 543-557.
- Manay, E. and Sahin, B., 2017. Heat transfer and pressure drop of nanofluids in a microchannel heat sink. *Heat Transfer Engineering*, 38 (5), 510-522.
- Manay, E., 2014. Mikrokanallarda Nanoakışkanların Isı transferi ve Basınç Düşümü Karakteristiklerinin Araştırılması Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- 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), 055501.
- Masuda, H., Ebata, A. and Teramae, K., 1993. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles.
- Mehendale, S., Jacobi, A. and Shah, R., 2000. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design. *Applied Mechanics Reviews*, 53 (7), 175-194.
- Mintsa, H.A., Roy, G., Nguyen, C.T. and Doucet, D., 2009. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (2), 363-371.
- Mirmasoumi, S. and Behzadmehr, A., 2008. Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model. *Applied Thermal Engineering*, 28 (7), 717-727.
- Mohammadi, S.K., Etemad, S.G. and Thibault, J., 2009. Measurement of thermal properties of suspensions of nanoparticles in engine oil, *Technical Proceedings of the 2009 NSTI Nanotechnology Conference and Expo, NSTI-Nanotech32009*, pp. 74-77.
- Mohammed, H., Bhaskaran, G., Shuaib, N. and Abu-Mulaweh, H., 2011. Influence of nanofluids on parallel flow square microchannel heat exchanger performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38 (1), 1-9.
- Mohammed, H.A., 2009. The effect of different inlet geometries on laminar flow combined convection heat transfer inside a horizontal circular pipe. *Applied Thermal Engineering*, 29 (2), 581-590.
- Mokrani, O., Bourouga, B., Castelain, C. and Peerhossaini, H., 2009. Fluid flow and convective heat transfer in flat microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (5), 1337-1352.
- Mooney, M., 1951. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *Journal of colloid science*, 6 (2), 162-170.
- Murshed, S., Leong, K. and Yang, C., 2005. Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>—water based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 44 (4), 367-373.

- Murshed, S., Leong, K. and Yang, C., 2008a. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 47 (5), 560-568.
- Murshed, S., Leong, K. and Yang, C., 2008b. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids—a critical review. *Applied Thermal Engineering*, 28 (17), 2109-2125.
- Namburu, P.K., Das, D.K., Tanguturi, K.M. and Vajjha, R.S., 2009. Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties. *International Journal of Thermal Sciences*, 48 (2), 290-302.
- Naraki, M., Peyghambarzadeh, S., Hashemabadi, S. and Vermahmoudi, Y., 2013. Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator. *International Journal of Thermal Sciences*, 66, 82-90.
- Nasiri, A., Shariaty-Niasar, M., Rashidi, A., Amrollahi, A. and Khodafarin, R., 2011. Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35 (4), 717-723.
- Nguyen, C., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S. and Mintsa, H.A., 2008. Viscosity data for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? *International Journal of Thermal Sciences*, 47 (2), 103-111.
- Nguyen, C., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S. and Mintsa, H.A., 2007. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids—hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28 (6), 1492-1506.
- Nieh, H.-M., Teng, T.-P. and Yu, C.-C., 2014. Enhanced heat dissipation of a radiator using oxide nano-coolant. *International Journal of Thermal Sciences*, 77, 252-261.
- Nielsen, L.E., 1970. Generalized equation for the elastic moduli of composite materials. *Journal of Applied Physics*, 41 (11), 4626-4627.
- Oh, D.-W., Jain, A., Eaton, J.K., Goodson, K.E. and Lee, J.S., 2008. Thermal conductivity measurement and sedimentation detection of aluminum oxide nanofluids by using the  $3\omega$  method. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29 (5), 1456-1461.
- Pak, B.C. and Cho, Y.I., 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11 (2), 151-170.
- Pakdaman, M.F., Akhavan-Behabadi, M. and Razi, P., 2012. An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 40, 103-111.
- Parametthanuwat, T., Bhuwakietkumjohn, N., Rittidech, S. and Ding, Y., 2015. Experimental investigation on thermal properties of silver nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 56, 80-90.
- Pastoriza-Gallego, M., Casanova, C., Legido, J.a. and Piñeiro, M., 2011. CuO in water nanofluid: influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity. *Fluid Phase Equilibria*, 300 (1), 188-196.
- 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.
- Peyghambarzadeh, S., Hashemabadi, S., Hoseini, S. and Jamnani, M.S., 2011a. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38 (9), 1283-1290.
- Peyghambarzadeh, S., Hashemabadi, S., Jamnani, M.S. and Hoseini, S., 2011b. Improving the cooling performance of automobile radiator with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 31 (10), 1833-1838.
- Peyghambarzadeh, S., Hashemabadi, S., Naraki, M. and Vermahmoudi, Y., 2013. Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. *Applied Thermal Engineering*, 52 (1), 8-16.
- Philip, J., Shima, P. and Raj, B., 2008. Evidence for enhanced thermal conduction through percolating structures in nanofluids. *Nanotechnology*, 19 (30), 305706.
- Prasher, R., Phelan, P.E. and Bhattacharya, P., 2006a. Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid). *Nano letters*, 6 (7), 1529-1534.
- Prasher, R., Song, D., Wang, J. and Phelan, P., 2006b. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. *Applied Physics Letters*, 89 (13), 133108.
- 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), 084308.
- Raja, M., Vijayan, R., Suresh, S. and Vivekananthan, R., 2013. Effect of heat transfer enhancement and NO<sub>x</sub> emission using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid as coolant in CI engine.
- Sadegh, A., Kourosh, J., Amin, J. and Hossein, A., 2016. A complete experimental investigation on the rheological behavior of silver nanofluid. *Heat Transfer Asian Res.*
- Saitô, N., 1950. Concentration dependence of the viscosity of high polymer solutions. I. *Journal of the Physical Society of Japan*, 5 (1), 4-8.
- Saripella, S., Yu, W., Routbort, J. and France, D., 2007. Effects of nanofluid coolant in a class 8 truck engine. 0148-7191, SAE Technical Paper.
- Sarkar, J. and Tarodiya, R., 2013. Performance analysis of louvered fin tube automotive radiator using nanofluids as coolants. *International Journal of Nanomanufacturing*, 9 (1), 51-65.
- Shen, S., Xu, J., Zhou, J. and Chen, Y., 2006. Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface. *Energy Conversion and Management*, 47 (11), 1311-1325.
- Sidik, N.A.C., Yazid, M.N.A.W.M. and Mamat, R., 2017. Recent advancement of nanofluids in engine cooling system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 137-144.
- Simha, R., 1952. A treatment of the viscosity of concentrated suspensions. *Journal of Applied Physics*, 23 (9), 1020-1024.
- Singh, H., Randhawa, H.S., Singh, H. and Randhawa, H.S., 2015. Numerically Study on Heat Transfer Performance of Microchannels Heat Sink with Different Shape by using N-Octane. *International Journal*, 1, 63-67.



- Singh, P.K., Harikrishna, P., Sundararajan, T. and Das, S.K., 2012. Experimental and numerical investigation into the hydrodynamics of nanofluids in microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 42, 174-186.
- Sivakumar, A., Alagumurthi, N. and Senthilvelan, T., 2016. Experimental investigation of forced convective heat transfer performance in nanofluids of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water and CuO/water in a serpentine shaped micro channel heat sink. *Heat and Mass Transfer*, 52 (7), 1265-1274.
- Sun, C., 孙成珍, Bai, B., 白博峰, Lu, W.-Q., 卢文强, Liu, J. and 刘捷, 2013. Shear-rate dependent effective thermal conductivity of H<sub>2</sub>O+ SiO<sub>2</sub> nanofluids. *Physics of Fluids*, 25 (5), 052002.
- Sundar, L.S., Farooky, M.H., Sarada, S.N. and Singh, M., 2013a. Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 41, 41-46.
- Sundar, L.S., Sharma, K., Naik, M. and Singh, M.K., 2013b. Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 670-686.
- Tang, G., Li, Z., He, Y. and Tao, W., 2007. Experimental study of compressibility, roughness and rarefaction influences on microchannel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 (11), 2282-2295.
- Tang, G., Lu, Y., Zhang, S., Wang, F. and Tao, W., 2012. Experimental investigation of non-Newtonian liquid flow in microchannels. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 173, 21-29.
- Tawfik, M.M., 2017. Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239-1253.
- Teamah, M., Sorour, M. and Saleh, R.A., 2005. Mixed convection between two horizontal concentric cylinders when the cooled outer cylinder is rotating. *Alexandria Eng. J*, 44, 347-360.
- Teng, T.-P. and Yu, C.-C., 2013. Heat dissipation performance of MWCNTs nano-coolant for vehicle. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 22-30.
- 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), 2213-2218.
- Timofeeva, E.V., Yu, W., France, D.M., Singh, D. and Routbort, J.L., 2011. Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene glycol/H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 109 (1), 014914.
- Tokit, E.M., Mohammed, H.A. and Yusoff, M., 2012. Thermal performance of optimized interrupted microchannel heat sink (IMCHS) using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39 (10), 1595-1604.
- Tomcej, R. and Nandakumar, K., 1986. Mixed convection flow of a power-law fluid in horizontal ducts. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64 (5), 743-751.
- Tseng, W.J. and Lin, K.-C., 2003. Rheology and colloidal structure of aqueous TiO<sub>2</sub> nanoparticle suspensions. *Materials science and engineering: A*, 355 (1), 186-192.

- Turgut, A., Tavman, I., Chirtoc, M., Schuchmann, H., Sauter, C. and Tavman, S., 2009. Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO<sub>2</sub> nanofluids. *International Journal of Thermophysics*, 30 (4), 1213-1226.
- Tzeng, S.-C., Lin, C.-W. and Huang, K., 2005. Heat transfer enhancement of nanofluids in rotary blade coupling of four-wheel-drive vehicles. *Acta Mechanica*, 179 (1-2), 11-23.
- Usri, N., Azmi, W., Mamat, R., Hamid, K.A. and Najafi, G., 2015. Thermal Conductivity Enhancement of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid in Ethylene Glycol and Water Mixture. *Energy Procedia*, 79, 397-402.
- Vajjha, R.S., Das, D.K. and Namburu, P.K., 2010. Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31 (4), 613-621.
- Vajjha, R.S., Das, D.K. and Ray, D.R., 2015. Development of new correlations for the Nusselt number and the friction factor under turbulent flow of nanofluids in flat tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, 353-367.
- Vand, V., 1948. Viscosity of solutions and suspensions. I. Theory. *The Journal of Physical Chemistry*, 52 (2), 277-299.
- Vasheghani, M., 2012. Enhancement of The Thermal Conductivity And Viscosity of Aluminum Component– Engine Oil Nanofluids. *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*, 3 (4).
- Wang, X., Xu, X. and Choi, S.U., 1999. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 13 (4), 474-480.
- Wang, Y., Fisher, T., Davidson, J. and Jiang, L., 2002. Thermal conductivity of nanoparticle suspensions, 8th AIAA and ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference.
- 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.
- Wen, D. and Ding, Y., 2006. Natural convective heat transfer of suspensions of titanium dioxide nanoparticles (nanofluids). *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 5 (3), 220-227.
- White, F.M. and Corfield, I., 2006. *Viscous fluid flow*, 3. McGraw-Hill Higher Education Boston.
- Wu, H.-W. and Perng, S.-W., 1999. Effect of an oblique plate on the heat transfer enhancement of mixed convection over heated blocks in a horizontal channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42 (7), 1217-1235.
- 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.
- Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F. and Wu, Q., 2002b. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *Journal of Applied Physics*, 91 (7), 4568-4572.
- Xie, H.-q., Wang, J.-c., Xi, T.-g. and Liu, Y., 2002a. Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles. *International Journal of Thermophysics*, 23 (2), 571-580.

- Xing, M., Yu, J. and Wang, R., 2016. Experimental investigation and modelling on the thermal conductivity of CNTs based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 104, 404-411.
- Xuan, Y. and Li, Q., 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21 (1), 58-64.
- Yang, C., Peng, K., Nakayama, A. and Qiu, T., 2016. Forced convective transport of alumina–water nanofluid in micro-channels subject to constant heat flux. *Chemical Engineering Science*, 152, 311-322.
- Yang, Y., Zhang, Z.G., Grulke, E.A., Anderson, W.B. and Wu, G., 2005. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (6), 1107-1116.
- Yin, X., Cao, F., Jin, L., Hu, B., Shu, P. and Wang, X., 2016. Numerical and experimental investigations of electronic evaporative cooling performance with a coiled channel. *Applied Thermal Engineering*, 94, 256-265.
- Yoo, D.-H., Hong, K. and Yang, H.-S., 2007. Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids. *Thermochimica Acta*, 455 (1), 66-69.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L. and Li, Y., 2009. Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid. *Thermochimica Acta*, 491 (1), 92-96.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L. and Li, Y., 2010. Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids prepared via phase-transfer method. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 355 (1), 109-113.
- Yu, W., Xie, H., Li, Y. and Chen, L., 2011. Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of aluminum nitride nanofluid. *Particuology*, 9 (2), 187-191.
- Yuan, X., Tao, Z., Li, H. and Tian, Y., 2016. Experimental investigation of surface roughness effects on flow behavior and heat transfer characteristics for circular microchannels. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29 (6), 1575-1581.
- Yunus A. Çengel and Ghajar, A.J., 2015. *Cooling of Electronic Equipment. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5th.
- Zanchini, E., 2008. Mixed convection with variable viscosity in a vertical annulus with uniform wall temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (1), 30-40.
- Zhang, K.-j., Wang, D., Hou, F.-j., Jiang, W.-h., Wang, F.-r., LI, J., Liu, G.-j. and Zhang, W.-x., 2007a. Characteristic and experiment study of HDD engine coolants. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 1, 017.
- Zhang, X., Gu, H. and Fujii, M., 2007b. Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31 (6), 593-599.
- Zhong, X., Yu, X.-l., Wu, J. and Jiang, P.-z., 2010. Experimental investigation on alumina nanofluids in vehicle heat exchanger [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 4, 024.
- Zhu, D., Li, X., Wang, N., Wang, X., Gao, J. and Li, H., 2009. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluids. *Current Applied Physics*, 9 (1), 131-139.

Zhu, H., Li, C., Wu, D., Zhang, C. and Yin, Y., 2010. Preparation, characterization, viscosity and thermal conductivity of CaCO<sub>3</sub> aqueous nanofluids. *Science China Technological Sciences*, 53 (2), 360-368.



## ÖZGEÇMİŞ

30 Ocak 1990 tarihinde Erzurum merkez de dünyaya geldi. İlköğrenimini Tatbikat ilkokulunda, orta öğrenimini Erzurum Gazi Ahmet Muhtar Paşa ortaokulunda ve lise öğrenimini ise Erzurum Mecidiye Anadolu Lisesinde tamamladı. 2012 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden ve 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2013 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2015 Ocak ayından beri Kafkas Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.