

ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA
TAŞINIMLA ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Eyüphan MANAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Erzurum

2017

Her hakkı saklıdır

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

**MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA TAŞINIMLA ISI
TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Yrd. Doç. Dr. Eyüphan MANAY danışmanlığında, Emre MANDEV tarafından hazırlanan bu çalışma 31/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak **oy birliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan:	Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI	<i>İmza</i>
Üye:	Yrd. Doç. Dr. Eyüphan MANAY	<i>İmza</i>
Üye:	Prof. Dr. Bayram ŞAHİN	<i>İmza</i>

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

ETÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA TAŞINIMLA ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

31/ 05/ 2017

.....
Emre MANDEV

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİKROKANALLARDA NANOAKIŞKANLARIN KARMA TAŞINIMLA ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Emre MANDEV

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Eyüphan MANAY

Son yıllarda endüstrinin her alanında kullanılan mekanik veya elektronik cihazların tasarımında, mini ve mikro boyutlu tasarımlara olan eğilim artmıştır. Aynı zamanda elektronik ve mekanik sistemlerin performanslarını yükseltmek için bu cihazların güç tüketimleri ve dolayısıyla soğutma yükleri de arttırılmıştır. Artan soğutma yükleri ve minyatürleşmenin sonucunda oluşan bu küçük hacimlerde çalışmak ancak güvenilir ısı alıcılar ile mümkün olabilir. Mikrokanallı ısı değiştiriciler, yüksek yüzey alanı/hacim oranları sebebiyle küçük hacimlerde az yer kaplamaktadırlar ve yüksek miktarda ısı çekebilmektedirler. Bunun yanında ısı alıcıların boyutlarını minimize etmek veya ısı alıcıların performansını arttırmak, yüksek ısıl performanslı nanoakışkanların kullanımıyla da gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada mikrokanallarda nanoakışkanların karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada iş akışkanı olarak saf su ve saf su bazlı SiO₂ nanoakışkanı kullanılmış, nanoakışkan hacimsel partikül oranları %0.2 ve %0.4 olarak seçilmiştir. Kullanılan akışkanlarının 20-60°C sıcaklık aralığında ısı iletkenlik ve viskozite karakterizasyonları yapılmış aynı zamanda nanoakışkanların SEM görüntüleri de alınmıştır. Mikrokanalın hidrolik çapı 500 µm'dir. Deneyler boyunca karma taşınım mekanizmasında çalışabilmek amacıyla Reynolds Sayısı değeri 5-55 aralığında tutulmuş ve test bölgesi 0, 30, 60 ve 90°'lik açılar ile konumlandırılmıştır.

2017, 181 sayfa

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

ABSTRACT

MASTER THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF NANOFLUIDS IN MICROCHANNELS BY MIXED CONVECTION

Emre MANDEV

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Eyüphan MANAY

In recent years, inclination towards mini and micro sized design has increased in mechanic or electronic device designs that are used in every field of the industry. Meanwhile, power consumption hence the cooling load of these devices has also been increased in order to meet the increased performance requirements in electronic and mechanic systems. Working in small space resulting from increased cooling loads and miniaturization is only possible with reliable heat sinks. Microchannel heat sinks occupy small spaces in narrow areas and absorb high amounts of heat because of their high surface area/volume ratios. Minimizing heat sink sizes or increasing heat sink performances can also be achieved by using high thermal performance nanofluids.

In this study, heat transfer characteristics of nanofluids in microchannels by mixed convection were experimentally evaluated. Pure water and pure water based SiO₂ nanofluid were used as work fluid and nanofluid volumetrical particle ratios were selected as 0.2% and 0.4% in the study. Thermal conductivity and viscosity characterizations of work fluids were done in range of 20-60°C and also SEM visuals of the nanofluids were taken. Hydraulic diameter of microchannel was 500 µm. In order to work under mixed convective conditions throughout the experiments, Reynolds Number values were held in the range of 5-55 and test section was positioned in 0, 30, 60 and 90° angles.

2017, 181 pages

Keywords: SiO₂, Microchannel, Heat Transfer, Mixed Convection

TEŞEKKÜR

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

Her kapısını çaldığımda elinden geleni yapan Öğr. Gör. Kadir GELİŞ'e ve Atatürk Üniversitesi Enerji Laboratuvarı ekibine desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

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

Tez çalışmamın her aşamasında bana destek olan sevgili eşim Yeşim Zeynep'e, sevgi ve desteklerini esirgemeyen anneme ve babama ve de duaları ile yanımda olan kıymetli büyüklerime şükranlarımı sunarım.

Emre MANDEV

2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Isı Transferi.....	3
1.1.1. Isı transferi mekanizmaları.....	3
1.1.2. Isı transferi artırma yöntemleri.....	11
1.2. Nanoteknoloji, Nanomateryaller ve Nanoakışkanlar.....	13
1.2.1. Nanomateryallerin sınıflandırılması.....	15
1.2.2. Nanoakışkanlar.....	16
1.3. MEMS ve Mikrokanallar.....	20
1.3.1. MEMS ve mikrokanal uygulamaları.....	20
1.3.2. Mikrokanal tanımı ve Knudsen sayısı.....	22
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Karma Taşınım.....	24
2.2. Nanoakışkanlar.....	28
2.2.1. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri.....	29
2.2.2. Nanoakışkanların ısı transferi.....	56
2.3. Mikrokanallar ve Mikrotüplerde Akış ve Taşınım ile Isı Transferi.....	61
2.4. Mikrokanallarda Nanoakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü.....	70
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	76
3.1. Deneysel Materyal.....	78
3.1.1. Hassas terazi.....	78
3.1.2. Ultrasonik homojenizatör.....	79

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.1.3. Viskozimetre	80
3.1.4. Isıl iletkenlik ölçer.....	81
3.1.5. Akışkan besleme haznesi	82
3.1.6. Pompa.....	83
3.1.7. Debimetre	84
3.1.8. Serpantin ve sirkülatörlü su banyosu	85
3.1.9. Mikro filtre	86
3.1.10. Güç kaynağı ve analizörü.....	86
3.1.11. Veri okuma kartı.....	88
3.1.12. Isıl çiftler	89
3.2. Test Bölgesi.....	92
3.3. Hesaplamalar ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi	93
3.3.1. Nanoakışkan hazırlanması ile ilgili hesaplamalar	93
3.3.2. Isı transferi verilerinin değerlendirilmesi	95
3.3.3. Belirsizlik analizi.....	97
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	106
4.1. Isı Transfer Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması	106
4.2. Karma Taşınım Bulguları.....	109
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	133
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ	165

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1. 1. Isı transferi mekanizmaları I (Anonim, www.fizikbilimi.gen.tr, 01.09.2016).....	4
Şekil 1. 2. Isı transferi mekanizmaları II (Anonim, www.fizikbilim.gen.tr, 01.09.2016)	4
Şekil 1.3. Bir maddenin farklı fazlarda ısı iletim mekanizmaları (Çengel 2014)	5
Şekil 1. 4. Akışkan hareketine göre taşınım ile ısı transferi (Anonim, happy8earth.com, 01.09.2016).....	7
Şekil 1. 5. Doğal taşınım ile ısı transferi (Anonim, tr.wikipedia.org, 01.09.2016).....	8
Şekil 1. 6. Doğal ve zorlanmış taşınım (Anonim, www.cardle-cfd.com, 01.09.2016)	9
Şekil 1. 7. Nanomateryallerin başlıca kullanım alanları (Al-Kayiem vd. 2013).....	14
Şekil 1. 8. Nanomateryallerin sınıflandırılması ve bazı örnekler (Al-Kayiem vd. 2013)	15
Şekil 1. 9. Nanoakışkanlar ile mikroakışkanların karşılaştırılması (Sahin vd. 2006)	17
Şekil 1. 10. Nanoakışkan teknolojisinde kilit araştırma sahaları (Taha-Tijerina vd. 2016).....	18
Şekil 1. 11. Knudsen sayısı aralığına göre akış modelleri (Avcı 2008)	23
Şekil 2. 1. Nanoakışkanlar ile ilgili çalışmaların yıllara göre dağılımı (wcs.webofknowledge.com, 01.11.2016).....	28
Şekil 2. 2. Efektif ısıl iletkenliklerin hacimsel partikül oranı ile değişimi (Murshed vd. 2008)	32
Şekil 2. 3. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklıkla değişimi (Mahbulbul 2012)	41
Şekil 2. 4. Yüksek iletkenlik yolu (Özerinç 2010).....	52
Şekil 2. 5. Nanopartikül etrafında oluşan katmanlı yapı (Özerinç 2010).....	54
Şekil 2. 6. Nanoakışkanların türbülanslı akış şartlarında konvektif ısı transferi (Pang vd. 2015).....	60
Şekil 2. 7. Deneysel bir çalışmada kullanılan mikrokanal geometrileri (Agarwal vd. 2010) .	65
Şekil 3. 1. Mikrokanal deney düzeneği	76
Şekil 3. 2. Hassas terazi (www.axis.pl, 01.11.2016).....	78
Şekil 3. 3. Ultrasonik homojenizatör.....	79
Şekil 3. 4. Viskozimetre	80
Şekil 3. 5. Isıl iletkenlik ölçer	81
Şekil 3. 6. Akışkan besleme haznesi	82

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3. 7. Pompa.....	83
Şekil 3. 8. Debimetre (w3.siemens.com, 01.11.2016)	84
Şekil 3. 9. Serpantin	85
Şekil 3. 10. Sirkülatörlü su banyosu (www.witeg.de, 01.11.2016).....	85
Şekil 3. 11. Mikro filtre.....	86
Şekil 3. 12. Güç kaynağı	87
Şekil 3. 13. Veri okuma kartı	88
Şekil 3. 14. Isıl çiftlerin ölçüm aralıkları (www.termopar.com.tr, 01.12.2016)	89
Şekil 3. 15. Test bölgesi göreseli (perspektif).....	92
Şekil 3. 16. Test bölgesi görseli (kesit ve ön Görünüş).....	93
Şekil 3. 17. Farklı akışkanlar için ısıl iletkenliğin sıcaklıkla değişimi	101
Şekil 3. 18. Farklı sıcaklıklarda ısıl iletkenliğin hacimsel partikül oranı ile değişimi.....	101
Şekil 3. 19. Farklı akışkanlar için viskozitenin sıcaklıkla değişimi	103
Şekil 3. 20. Farklı sıcaklıklarda viskozitenin hacimsel partikül oranı ile değişimi	104
Şekil 3. 21. %0.2 hacimsel oranda SiO ₂ -Su nanoakışkanı için örnek SEM görüntüsü.....	104
Şekil 4. 1. 0° kanal eğiminde saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması... 107	
Şekil 4. 2. 30° kanal eğiminde saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması. 107	
Şekil 4. 3. 60° kanal eğiminde saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması. 108	
Şekil 4. 4. 90° kanal eğiminde saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması. 108	
Şekil 4. 5. Farklı akışkanlar için 0° kanal eğiminde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi	110
Şekil 4. 6. Farklı akışkanlar için 30° kanal eğiminde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi	111
Şekil 4. 7. Farklı akışkanlar için 60° kanal eğiminde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi	111
Şekil 4. 8. Farklı akışkanlar için 90° kanal eğiminde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi	112

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4. 9. Farklı kanal eğimlerinde saf su için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi	113
Şekil 4. 10. Farklı kanal eğimlerinde %0.2'lik hacimsel oranda SiO ₂ -saf su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi	113
Şekil 4. 11. Farklı kanal eğimlerinde %0.4'lik hacimsel oranda SiO ₂ -saf su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi	114
Şekil 4. 12. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	115
Şekil 4. 13. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	115
Şekil 4. 14. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	116
Şekil 4. 15. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	116
Şekil 4. 16. Farklı kanal eğimlerinde saf su için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	117
Şekil 4. 17. Farklı kanal eğimlerinde %0.2'lik hacimsel oranda SiO ₂ nanoakışkanı için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	118
Şekil 4. 18. Farklı kanal eğimlerinde %0.4'lük hacimsel oranda SiO ₂ nanoakışkanı için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	118
Şekil 4. 19. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi	119
Şekil 4. 20. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi	120
Şekil 4. 21. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi	120

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4. 22. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi	121
Şekil 4. 23. Farklı kanal eğimlerinde saf su için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi	121
Şekil 4. 24. Farklı kanal eğimlerinde %0.2'lik hacimsel oranda SiO ₂ nanoakışkanı için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi.....	122
Şekil 4. 25. Farklı kanal eğimlerinde %0.4'lük hacimsel oranda SiO ₂ nanoakışkanı için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi.....	122
Şekil 4. 26. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Reynolds sayısı ile değişimi	123
Şekil 4. 27. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Reynolds sayısı ile değişimi	124
Şekil 4. 28. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Reynolds sayısı ile değişimi	124
Şekil 4. 29. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Reynolds sayısı ile değişimi	125
Şekil 4. 30. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Grashof sayısı ile değişimi	126
Şekil 4. 31. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Grashof sayısı ile değişimi	126
Şekil 4. 32. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Grashof sayısı ile değişimi	127
Şekil 4. 33. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Grashof sayısı ile değişimi	127
Şekil 4. 34. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında Φ/Gz 'in Grashof sayısı ile değişimi	128
Şekil 4. 35. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında Φ/Gz 'in Grashof sayısı ile değişimi ...	129
Şekil 4. 36. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında Φ/Gz 'in Grashof sayısı ile değişimi ...	129

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

Şekil 4. 37. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında Φ/Gz 'in Grashof sayısıyla değişimi ...	130
Şekil 4. 38. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında Ω değerinin Reynolds sayısıyla değişimi	131
Şekil 4. 39. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında Ω değerinin Reynolds sayısıyla değişimi	131
Şekil 4. 40. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında Ω değerinin Reynolds sayısıyla değişimi	132
Şekil 4. 41. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında Ω değerinin Reynolds sayısıyla değişimi	132

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1. 1. Isı Transferi arttırmada aktif ve pasif yöntemler	12
Çizelge 1. 2. Sektörlere göre MEMS ürünleri (Avcı 2008)	21
Çizelge 2. 1. Karma taşınım ile ısı transferi özet çizelgesi (sayısal çalışmalar)	27
Çizelge 2. 2. Klasik ısı transferi akışkanları ve bazı katı malzemeler için ısı iletkenlikler (Jaime vd. 2016).....	30
Çizelge 2. 3. Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri için birkaç örnek (Li vd. 2009).....	33
Çizelge 2. 4. Nanoakışkanların ısı iletkenlik özet çizelgesi (Angayarkanni ve Philip 2015) .	35
Çizelge 2. 5. Nanoakışkan viskozitesi özet çizelgesi (Azmi vd. 2016)	39
Çizelge 2. 6. Su ve EG bazlı nanoakışkanların deneysel bağıl viskoziteleri (Kakaç ve Pramuanjaroenkij 2016)	40
Çizelge 2. 7. Isıl iletkenlik modelleri özet çizelgesi (Angayarkanni ve Philip 2015).....	42
Çizelge 2. 8. Nanoakışkanların viskozite modelleri sayısal çalışmalar (Azmi vd. 2016).....	47
Çizelge 2. 9. Yarı deneysel viskozite modellerine örnekler (Azmi vd. 2016)	49
Çizelge 2. 10. $Re=100$ 'de ve %1 hacimsel oranda nanopartiküllerin saf su içerisinde basınç düşümü ve ortalama Nusselt sayıları (Kalteh, 2013)	58
Çizelge 2. 11. Su bazlı nanoakışkanların ısı transferi özet çizelgesi (Azmi 2016)	59
Çizelge 2. 12. Mikrotüpler için deneysel ve sayısal çalışmalar özet çizelgesi (Salman vd. 2013).....	62
Çizelge 2. 13. Mikrokanallar için deneysel ve sayısal çalışmalar özet çizelgesi (Salman vd. 2013).....	66
Çizelge 2. 14. Nanoakışkan ve Mikrokanal etken çiftinin ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri özet tablosu (Hussien vd. 2016)	71
Çizelge 3. 1. THB-100 teknik özellikler tablosu.....	81
Çizelge 3. 2. Isıl çiftlerin kalibrasyon denklemleri	90
Çizelge 3. 3. Belirsizlik analizi sonuçları.....	98
Çizelge 3. 4: Hazırlanacak nanoakışkanlar için gerekli partikül ve temel akışkan miktarları (2500 mL nanoakışkan için).....	99
Çizelge 3. 5: SiO_2 nanopartiküllerinin özellikleri (www.sigmaaldrich.com)	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m.K)
Q	Isı miktarı (W)
A	Isı transferi yüzey alanı (m ²)
T	Sıcaklık (°C)
h	Isı taşınım katsayısı (W/m ² .K)
x	Bağımsız değişken
G	Toplam ışıınım enerjisi (W)
R	Yansıtılan ışıınım enerjisi (W)
F	Geçirilen ışıınım enerjisi (W)
Y	Yutulan ışıınım enerjisi (W)
σ	Stepfan-Boltzmann sabiti (W/m ² .K ⁴)
λ	Ortalama serbest yol (m)
D	Çap (m)
ρ_r	ışıınım yansıtma oranı
α_r	ışıınım yutma oranı
τ_r	ışıınım geçirme oranı
V	Gerilim (V)
I	Akım (A)
U	Ortalama Hız (m/s)
β	Hacimsel genleşme katsayısı (1/K)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
μ	Dinamik viskozite (kg/m.s)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
ϕ	Hacimsel partikül oranı
Φ	Doğal taşınım parametresi
Ω	Zorlanmış taşınım parametresi

Alt İndisler

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

Kısaltmalar

MEMS	Mikro elektro-mekanik sistemler
Re	Reynolds sayısı
Gr	Grashof sayısı
Nu	Nusselt sayısı
Ri	Richardson sayısı
Gz	Graetz sayısı
Ra	Rayleigh sayısı
Cm	Nanoakışkan kütle oranı

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, yeni buluşlar, hayatımızı kolaylaştıran veya olmazsa olmazımız olan cihazlar, aslına bakılırsa bunların hepsinin varlığı insanoğlunun hayal veya hedefleri ile mümkün olmuştur. Her alanda olduğu gibi üretim teknolojisinde de insanoğlu sınırları araştırmak ve zorlamak istemiş, üretim boyutları ve zaman parametrelerinin üzerinde durmuştur.

Richard Feynman 1950'li yıllarda Nanoteknoloji kavramının oluşmasına büyük katkı sağlamış vizyonu ile araştırmacılara ilham kaynağı olmuş ve onları bu noktada çalışmaya yöneltmiştir. Feynman 1959 yılında "There is Plenty of Room at the Bottom" adlı konuşmasında günümüz teknolojilerinin fotoğrafını çekmiş ve bu teknolojiler ile ilgili günümüzde birçoğu gerçekleştirilmiş olan hayallerini paylaşmıştır. 1980'lerde ise "Scanning Tunneling Microscope" (STM) adlı mikroskopların geliştirilmesiyle mikro boyutlu üretimlerin temelleri atılmıştır (Tabelling 2005, Avcı 2008).

1980'li yıllardaki bu teknolojik gelişmeler "MEMS" olarak adlandırılan mikro elektro-mekanik sistemler adında yeni disiplinler arası bir bilim dalının oluşmasına neden olmuştur. Başlangıçta mekanik, akış, elektromekanik sistemlerin mikro boyutlarda üretimlerine başlanmışsa da ilerleyen süreçte mikrofabrikasyon ve nanoteknolojide yaşanan gelişmelerle tıbbi, kimyasal, biyolojik ve biyomedikal sistemlerin üretimi ve geliştirilmesi de MEMS'lerin çalışma alanı içerisine dahil olmuştur. MEMS'lere entegre olarak çalışan ve bizim çalışmamız ile doğrudan alakalı olan diğer bir kavram ise "Microfluidic Systems" olarak adlandırılan ve akışkan akışı içeren mikroakışlı sistemlerdir. Tıp, kimya, biyomedikal, mekanik, elektronik ve elektromekanik gibi geniş bir uygulama alanına sahip olan mikro elektro-mekanik sistemlere entegre mikroakışlı sistemler, sistem içerisinde ısı transferine (özellikle soğutma), akışkan iletimine olanak sağlarlar.

MEMS'lerin teknolojik gelişimim mikroakışlı sistemlerin gelişimine doğrudan bağlıdır. Mikroakışlı sistemlerin ısı transferi ve akış karakteristikleri ile ilgili hali hazırda pek çok araştırma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Küçük hacimlerde ısı transferini etkin biçimde gerçekleştirmek yüksek Yüzey Alanı/Hacim oranına sahip mikrokanallar veya

mikrofin tüpler vasıtasıyla yapılabilmektedir. Fakat günümüz teknolojisinin getirdiği yüksek performans cihazları, MEMS alanında da etkilerini göstermeye başlamıştır. Yüksek performanslı cihazların enerji ihtiyaçları artmış, bu da beraberinde cihazların soğutma yüklerini arttırmıştır. Sonuç olarak mikroakışlı sistemlerin ısı transferi performanslarının geliştirilmesi elzem bir hal almıştır.

Bir sistemin termal performansının geliştirilmesi konusunda iki temel yöntemden bahsetmek mümkündür. Bunlar aktif ve pasif yöntemlerdir. Aktif yöntemler dış bir enerji ile sistemin manipülasyonu temeline dayanmaktadır. Pasif yöntemlerde ise genel olarak sisteme iç elemanları eklenmesi, geometrik değişiklikler ve sistem elemanlarının performansını arttıracak dış enerji gerektirmeyecek işlemlerdir. Pasif yöntemler arasında son dönemde adından sıklıkla söz ettiren ‘‘Nanoakışkan’’ kullanımı ısı transferi iyileştirme çalışmalarında önemli bir alternatiftir.

İlk olarak Choi tarafından ortaya atılan nanoakışkan kavramı nano boyuttaki partiküller temel akışkan içine karıştırılarak ısı özellikleri iyileştirilmiştir. Elde edilen bu yeni tip akışkanların ısı özellikleri ve ısı transferi uygulamalarındaki performansları incelenmeye başlanmıştır. Isıl iletkenlikleri yüksek, nano boyuttaki katı partiküllerin (bakır, gümüş, alüminyum vs.) klasik ısı transferi akışkanının içine katılmasıyla elde edilen yeni ısı transferi akışkanına ‘‘nanoakışkan’’ denmiştir. Nanoakışkanların basınç düşümünde yok denecek kadar az artışa neden olduklarından pratik uygulamalara uygun olabilecekleri düşünülmüştür. Çok küçük tane boyutlarındaki partiküller (Nanometre Seviyesinde) akışkan içerisinde çok iyi karıştırıldığında, ortaya çıkan akışkan katı-sıvı karışımdan çok, tek fazlı akışkan gibi davranmıştır (Daunghongsuk ve Wongwies 2005; Geliş 2013).

Yüksek yüzey alanı-hacim oranlarından dolayı küçük hacimlerden yüksek miktarda ısının uzaklaştırılması için önemli bir potansiyele sahip olan mikrokanalların, termal iletkenliği ve termofiziksel özellikleri yetersiz olan klasik ısı transferi akışkanları yerine termal özellikleri iyileştirilmiş nanoakışkanlar ile birlikte kullanılmaları yüksek verime sahip ısı değiştiricilerinin tasarlanmasına olanak tanıyacaktır. Ayrıca bu durum da mikro elektro-mekanik sistemlerin (MEMS) başlıca ilgi ve uygulama alanlarından biri olan elektronik bileşenlerin soğutulması alanında da önemli gelişmelere ön ayak olacaktır(Manay 2014).

Bu çalışmada nanoakışkan kullanılan mikrokanallarda, karma taşınım metodu ile gerçekleşen ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Test bölgesindeki mikrokanalın çapı 500 µm olarak seçilmiştir. İş akışkanı olarak saf su ve iki farklı hacimsel oranda (%0.2 ve %0.4) saf su bazlı SiO₂ nanoakışkanı kullanılmıştır. Çalışma boyunca Reynolds sayısı değeri 5-45 aralığında tutulmuş ve kanal 0, 30, 60 ve 90°'lik açılarla konumlandırılmıştır. Belirlenen parametrelerin ısı transferine etkileri incelenmiştir. Düşük Reynolds sayılarında yani karma taşınım şartlarında deneysel verilerin toplanması ve karşılaştırılmasındaki zorluklar nedeniyle bu konudaki deneysel çalışma niceliği oldukça azdır. Bu çalışmada mikrokanallarda nanoakışkanların karma taşınım ile ısı transferi performansı incelemek ve neredeyse tamamen sayısal çalışmalardan oluşan mikrokanallarda karma taşınım literatürüne katkı sağlamak amaçlanmaktadır.

1.1. Isı Transferi

Isı kavramı sıcaklık farkından ötürü bir sistemden diğerine transfer edilen enerji olarak tanımlanır. Isı kavramının tek başına bir anlamı olmamakta ve yalnızca iki ortam arasında transfer edilirken anlam kazanmaktadır. Elektrik akımını oluşturan gerilim, kütle transferini meydana getiren konsantrasyon farkı gibi ısı enerjisinin transfer edilmesini sağlayan potansiyel de sıcaklık farkıdır. Buradan hareketle, aralarında sıcaklık farkı bulunan temas halinde veya birbirini görem ortamlar arasında ısı enerjisinin aktarımı ısı transferi olarak adlandırılır. Isı transferi yönü daima yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğrudur. Bir insanın ısı transferini gözlemleyebileceği ilk ve en yakınındaki kaynak aslında kendi vücududur. İnsan vücudu mevcut sıcaklığını daima 36.8°C civarında tutmak için çevre ile ısı transferi etkileşimlerinde bulunur. Isı transferi konusu, yaşam alanları düşünüldüğünde elektrikli ev aletleri, bilgisayarlar, iklimlendirme sistemleri, ocaklar, kombiler, mühendislik alanları açısından düşünüldüğünde ise türbinler, motorlar, güneş panelleri, enerji santralleri gibi pek çok noktada karşımıza çıkan geniş bir konudur.

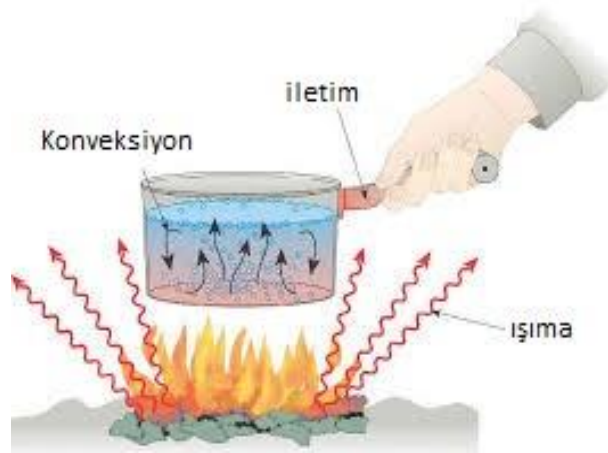
1.1.1. Isı transferi mekanizmaları

Isı üç farklı yolla aktarılabilir: iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışınım (radyasyon). Isı transferinin bütün türleri bir sıcaklık farkı gerektirir ve hepsi de yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktakine doğrudur.

İletim, parçacıklar arası etkileşimin sonucu olarak enerjinin bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklarından bitişiklerindeki daha düşük enerjili olanlara aktarılmasıdır. Taşınım, bir katı yüzey ve bitişikindeki hareket halinde olan sıvı veya gaz akışkan arasındaki ısı aktarılması biçimidir ve iletim ile akışkan hareketinin bileşik etkilerini içerir. Işınım, atom veya moleküllerin elektronik düzenlerindeki değişimin bir sonucu olarak, maddeden elektromanyetik dalga veya fotonlar şeklinde yayılan enerjidir (Çengel 2014).



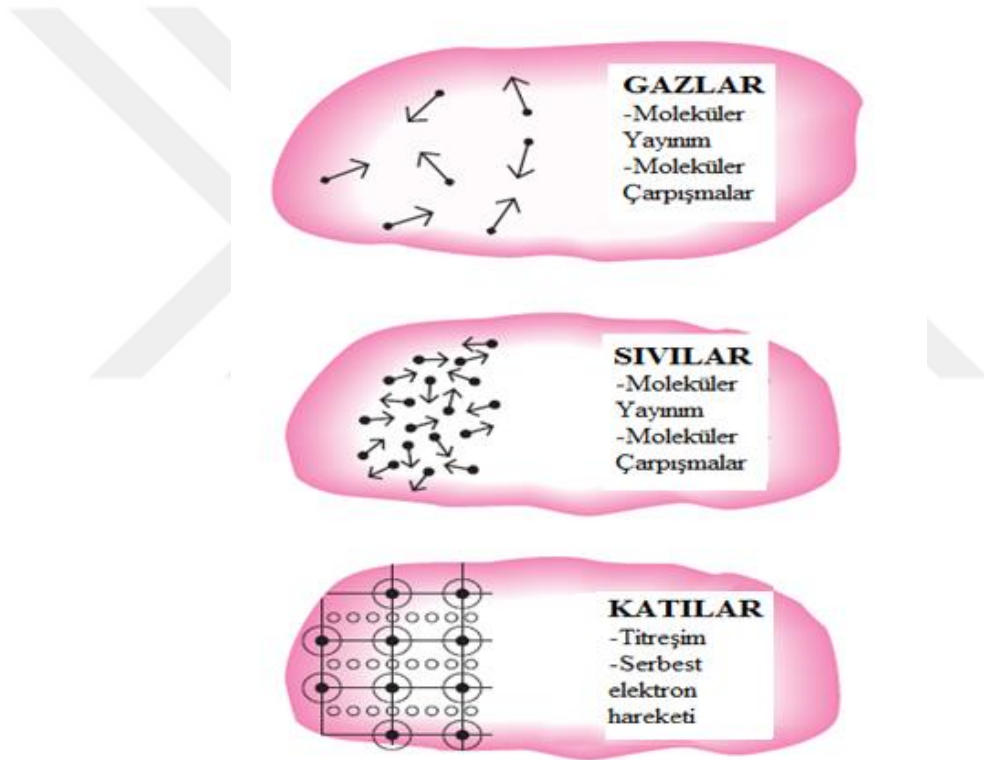
Şekil 1. 1. Isı transferi mekanizmaları I (Anonim, www.fizikbilimi.gen.tr, 01.09.2016)



Şekil 1. 2. Isı transferi mekanizmaları II (Anonim, www.fizikbilim.gen.tr, 01.09.2016)

1.1.1.1. İletim ile ısı transferi

İletim, parçacıklar arası etkileşimin sonucu olarak enerjinin bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklarından bitişiklerindeki daha düşük enerjili olanlara aktarılmasıdır. Bu ısı transferi mekanizmasında ısı enerjisinin aktarımı atom ve moleküller ile gerçekleşir. İletimle ısı transferi maddenin katı, sıvı ve gaz hallerinde görülebilir. Fakat bu hallerin atomik veya moleküler açıdan farklı olmaları ısı iletiminin şeklini de değiştirmektedir. İletim ile ısı transferi katı atom veya moleküllerinde titreşim ile gaz ve sıvı moleküllerinde ise moleküler yayılma ve çarpışmalar ile gerçekleşmektedir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Bir maddenin farklı fazlarda ısı iletim mekanizmaları (Çengel 2014)

İletim ile ısı transferi parametreleri; sıcaklık farkı, ısı transferi yüzey alanı, geometrik parametre ve bir malzeme özelliği olan k ısıl iletkenlik katsayısı olarak sıralanabilir. Burada tanımlanan ısıl iletkenlik, malzemenin ısıyı iletme kabiliyetini temsil etmektedir. Başka bir deyişle malzemenin ısıl iletkenliği, birim sıcaklık farkında, birim alan ve kalınlıkta gerçekleşen

ısı transferi miktarı olarak tanımlanabilir. Yukarıda bahsedilen parametreleri kapsayan ısı iletim kanunu 1822’de Fourier tarafından diferansiyel şekilde ifade edilmiştir.

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

Fourier yasası olarak bilinen bu denklem bir yöndeki iletim ile ısı transferi hızının o yöndeki sıcaklık gradyanı ile doğru orantılı olduğunu gösterir. Fourier ısı iletim yasası kararlı hal durumda bir boyutta ısı iletimi için kullanılır. Eşitlik 1.1’ de dT/dx , x yönündeki sıcaklık gradyanı, A ısı geçiş yüzey alanı ve k ise ilgili ortamın ısı iletim katsayısıdır.

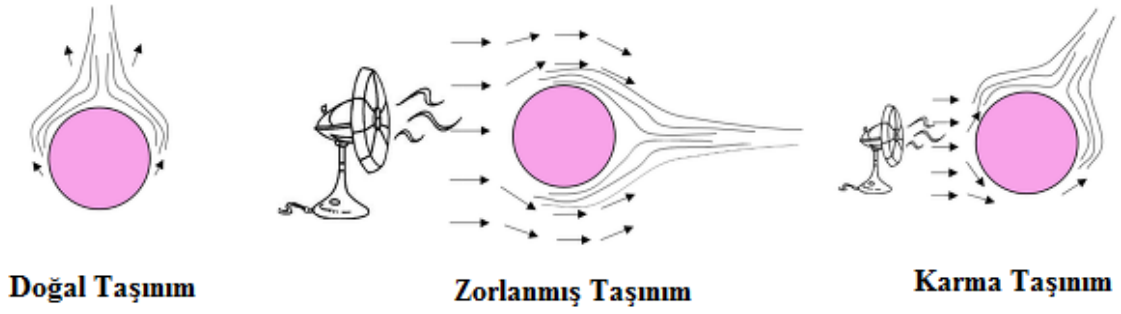
1.1.1.2. Taşınım ile ısı transferi

Taşınım ile ısı transferi, aralarında sıcaklık farkı bulunan durgun bir ortam ile (katı yüzey) hareketli akışkan arasında meydana gelen ısı transferi türüdür. Ortamlardan birinin hareketli olması önemlidir. Aksi takdirde iletim mekanizmasından bahsetmek gerekir. Isı taşınım mekanizmasında hareketli akışkan molekülleri yüzey ile temasları sonucu aldıkları enerjiyi akışkan boyunca aktarırlar. Isı taşınımında ısı transferi hızı, ortamlar arasındaki sıcaklık farkı, ısı transferi yüzey alanı ve ısı taşınım katsayısı ile doğru orantılıdır. Isı taşınımı Newton Soğuma yasası ile ifade edilir. Eşitlik 1.2’ de verilen Newtonun Soğutma Yasası’nda h ısı taşınım katsayısı, A ısı transferi yüzey alanı, T_s yüzey sıcaklığı ve T_∞ ortam sıcaklığıdır.

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

Taşınım ile ısı transferinde önemli olan akışkanın nasıl tahrik edildiğidir. Yapılan bu çalışmanın konusu olan taşınım ile ısı transferi akışkan hareketinin sağlanışına göre üç yolla gerçekleşir;

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



Şekil 1. 4. Akışkan hareketine göre taşınım ile ısı transferi (Anonim, happy8earth.com, 01.09.2016)

Doğal taşınımında akışkan hareketi akışkan içindeki kaldırma kuvvetleri ile oluşur. Kaldırma kuvveti akışkan içindeki yoğunluk gradyanı ve yoğunlukla orantılı bir gövde kuvvetinin birlikte olduğu durumda oluşur. Gövde kuvveti genellikle yerçekimi kuvvetidir. Bir akışkan içinde yoğunluk gradyanını ortaya çıkarabilecek farklı durumlar olmakla birlikte en genel olanı bir sıcaklık gradyanına bağlı yoğunluk farklılığıdır. Gazların ve sıvıların yoğunluklarının sıcaklığa bağlı olduğu bilinmektedir. Yoğunluk genellikle artan sıcaklıkla birlikte, akışkanın genişlemesinden dolayı azalır.

Doğal taşınım ile ısı transferinde akışa sebebiyet veren bir dış etki olmaması akış hızlarının zorlanmış taşınım ile ısı transferine göre düşük olmasına neden olur. Bu nedenle genellikle zorlanmış taşınım ile ısı transferi, doğal taşınım ile ısı geçişinden oldukça hızlı gerçekleşir. Doğal taşınımın olabilirliğinin anlaşılması için şu orandan yararlanılır;

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

Bu oranda Gr_L ; Grashof sayısıdır. Grashof sayısı, akışkan üzerine etkiyen kaldırma kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranının bir göstergesidir. Re_L ise bir akışkan parçacığı üzerine etkiyen atalet kuvvetlerinin sürtünme kuvvetlerine oranını belirtir. Eğer Gr_L ile Re_L arasında bu ilişki sağlanırsa, akışta zorlanmış taşınımın etkileri göz ardı edilebilir.

Doğal taşınımın etkili olduğu birçok uygulama vardır. Doğal taşınım çeşitli elektronik cihazlardan olan ısı geçişini etkilediği kadar borulardan ve dağıtım hatlarından olan ısı geçişini de etkiler. Elektrikli ısıtıcılardan veya radyatörlerden oda havasına aktarılan ısı veya bir soğutma ünitesinin yoğuşturucu serpantininden çevreye verilen ısı, hep doğal taşınımın etkisiyle olur.



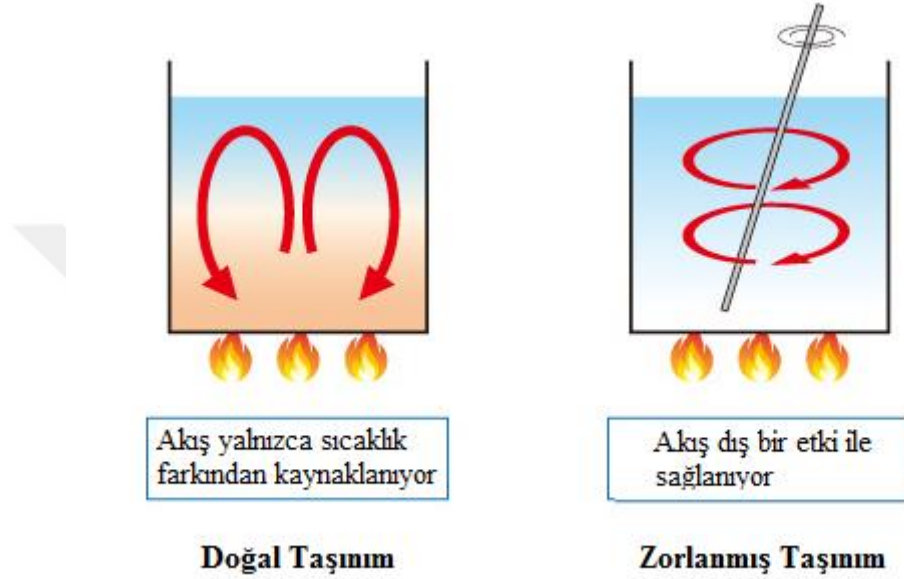
Şekil 1. 5. Doğal taşınım ile ısı transferi (Anonim, tr.wikipedia.org, 01.0912016)

Zorlanmış taşınımında, akışkanın yüzey üzerindeki hareketi, akışkan içindeki sıcaklık gradyanlarından kaynaklanan ağırlık kuvvetlerinden (doğal taşınım) kaynaklanmaz. Fan, pompa gibi dış etmenlerce sağlanır. Zorlanmış taşınım ile ısı transferinde doğal taşınım etkilerinin göz ardı edildiği Gr_L-Re_L ilişkisi aşağıda verilmiştir.

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

Fanlı hava ısıtıcıları ve serinleticileri, zorlanmış hava (veya su) soğutmalı yoğuşturucu veya buharlaştırıcılar, sıvı hareketinin bir pompa ile sağlandığı ısı değiştiricileri, ısı geçişinin esas olarak zorlanmış taşınım ile olduğu cihazlara ait örneklerdir.

Zorlanmış ısı taşınımında iki ayrı akış söz konusudur. 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 (Yavaş 2007).



Şekil 1. 6. Doğal ve zorlanmış taşınım (Anonim, www.cardle-cfd.com, 01.09.2016)

Taşınım ile ısı transferinden bahsedilirken, çoğunlukla doğal taşınım etkileri ihmal edilir. Ancak bu bir kabuldür. Kararsız bir sıcaklık gradyanından bahsedildiğinde orada muhakkak bir doğal taşınım etkisi gözlenecektir. Özellikle düşük Reynolds sayılarında doğal taşınımı ihmal etmek büyük hataya neden olmaktadır. Taşınım ile ısı transferinde ihmal edilemez boyutlarda bir doğal taşınım etkisinin gözlemleneceği oran aşağıda verilmiştir;

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

Bu sınırlar arasında zorlanmış ve doğal taşınım etkilerinin birlikte gözlemlendiği karma taşınımından bahsedilebilir. Zorlanmış akışta kaldırma kuvvetinin ısı geçişi üzerindeki etkisi, bu

kuvvetin yönü ile akış yönü arasındaki farktan büyük ölçüde etkilenir. Zorlanmış akış yönü ile kaldırma kuvvetinin yönü birbirlerine göre üç farklı pozisyonda olabilir ve bunlar aşağıda verilmiştir.

- 1- Aynı yönlü (destekleyen akış),
- 2- Karşı yönlü (engelleyen akış),
- 3- Dik yönlü (çapraz akış) hareket durumlarıdır.

Örneğin, ısıtılmış dikey bir levha boyunca yukarı doğru zorlanmış akışlar kaldırma kuvvetleri ile aynı yönlü olduğu için destekleyen akış, aşağı doğru zorlanmış akışlar ise kaldırma kuvvetleri ile zıt yönlü olduğu için engelleyen akış durumlarına karşılık gelir. Çapraz akış örnekleri olarak ise ısıtılmış bir silindir, küre veya yatay bir levha üzerinde yatay akış verilebilir. Destekleyici ve çapraz akışlarda kaldırma kuvveti, sadece zorlanmış taşınım olması durumundaki ısı geçişini artırıcı etki yapar. Engelleyen akışlarda ise ısı geçişini azaltıcı yönde etkilidir.

Zorlanmış ve doğal taşınımın bir arada olduğu durumla ilgili çalışmalara 1970'li yılların sonları ve 1980'li yılların ortalarından itibaren oldukça önem verilmiştir. Ve bu çalışmaların genel sonucu olarak, laminer zorlanmış taşınım akışlarında kaldırma etkilerinin ısı geçişini önemli ölçüde artırabileceği, ancak zorlanmış taşınımın türbülanslı olması durumunda bu artışın göz ardı edilebileceği söylenebilmektedir (Incropera ve Dewitt 2010).

1.1.1.3. Işınım ile ısı transferi

Işınım ile ısı transferi, ısı transferinin elektro manyetik dalgalarla gerçekleşen formudur. Ortam veya maddesel bir hareket gerektirmeyen bu ısı transferi mekanizması aynı zamanda gezegenimizdeki yaşamın da kaynağıdır. Bir cismin uzaya yaydığı toplam ısı enerjisi (G) başka bir cisme rastladığında üç farklı olay söz konusu olabilir. Bunlardan ilki; enerjinin bir kısmının (R) cismin yüzeyinden yansması, ikincisi enerjinin bir kısmının (T) cisim içerisinden geçerek diğer uzaklaşması, üçüncüsü ise enerjinin bir kısmının (Y) cisim tarafından yutulmasıdır. Bu durumda;

$$G = R + F + Y \quad (1.6)$$

yazılabilir. Bu denklemde bütün terimler G'ye bölüldüğünde;

$\rho_r = \frac{R}{G}$: ışınım yansıtma oranı, yansıtılan ışınımın gelen ışınımına oranı

$\alpha_r = \frac{R}{G}$: ışınım yutma oranı, yutulan ışınımın gelen ışınımına oranı

$\tau_r = \frac{R}{G}$: ışınım geçirme oranı, geçirilen ışınımın gelen ışınımına oranı

olmak üzere,

$$\rho_r + \alpha_r + \tau_r = 1 \quad (1.7)$$

bağıntısı elde edilir. Burada ρ_r , malzemenin yüzey pürüzlülüğüne ve cinsine bağlıken, α_r ve τ_r cismin fiziksel özellikleri ile alakalıdır. Işınım ile ısı transferi cismin yüzey alanına, yayıcılığına ve yüzey sıcaklığına bağlıdır ve aşağıda eşitlik 1.8'de gösterilen Stefan-Boltzmann yasası ile ifade edilir. Burada σ Stefan-Boltzmann sabitidir ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) (Çengel 2014).

$$Q = \sigma A T_s^4 \quad (1.8)$$

1.1.2. Isı transferi artırma yöntemleri

Günümüzde hayatın her alanında artan enerji ihtiyacı sebebiyle enerjinin daha etkili ve verimli bir şekilde kullanılmasına yönelik birçok çalışma yürütülmektedir. Hatta enerjinin daha etkili ve verimli kullanılması konusuna alternatif bir enerji kaynağı olarak yaklaşmak pek de yanlış olmayacaktır. Bu noktadan bakıldığında literatürde, endüstri ve teknolojinin hemen hemen her alanında kullanılan ısı değiştiriciler veya ısı alıcıların termal performansını arttırmaya yönelik pek çok çalışmaya rastlamak mümkündür. Isı transferini iyileştirmeye yönelik bu çalışmalar genel olarak aktif, pasif ve karma yöntemler başlıkları altında toplanabilir.

Basitçe ifade etmek gerekirse aktif yöntemler, dış bir etki gerektiren, ısı transfer edilen akışkana veya ortama ilave dış enerji verilerek ısı transferinde iyileşme elde edilen yöntemlerdir. Bu yöntemlere örnek olarak, yüzeyin titreştirilmesi, akışkanın titreştirilmesi, akışın mekanik olarak karıştırılması, yüzeyin döndürülmesi, enjeksiyon ve akış ortamına elektrostatik etkiler uygulanması verilebilir. Pasif yöntemlerde durum biraz daha farklıdır. Pasif yöntemlerde sistemlere doğrudan bir dış enerji girişi gerçekleştirilmez. Bu yöntemlere örnekler ise şu şekilde verilebilir; işlenmiş yüzeyler, pürüzlendirilmiş yüzeyler, genişletilmiş yüzeyler, dönmeli akış elemanları ve akış alanı içerisine yerleştirilmiş türbülötörler. Karma yöntemlerde ise aktif ve pasif yöntemlerin birlikte kullanılması söz konusudur.

Pasif yöntemler bir dış etki gerektirmemesi açısından bakıldığında avantajlı gibi gözükse dahi ısı transferi miktarında önemli artış sağlamalarının yanında akış alanında yüksek miktarda basınç düşümüne sebebiyet verebilirler. Doğrudan bir dış etki gerektirmeyen bu yöntemlerde, akış alanında oluşan basınç düşümünü yenmek için sistemde kullanılan pompa vb. elemanların enerji ihtiyaçları arttırılmaktadır (Çomaklı vd. 2007). Çizelge 1.1’de aktif ve pasif yöntemler ile ısı transferi arttırma yolları verilmiştir.

Çizelge 1. 1. Isı Transferi arttırmada aktif ve pasif yöntemler

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

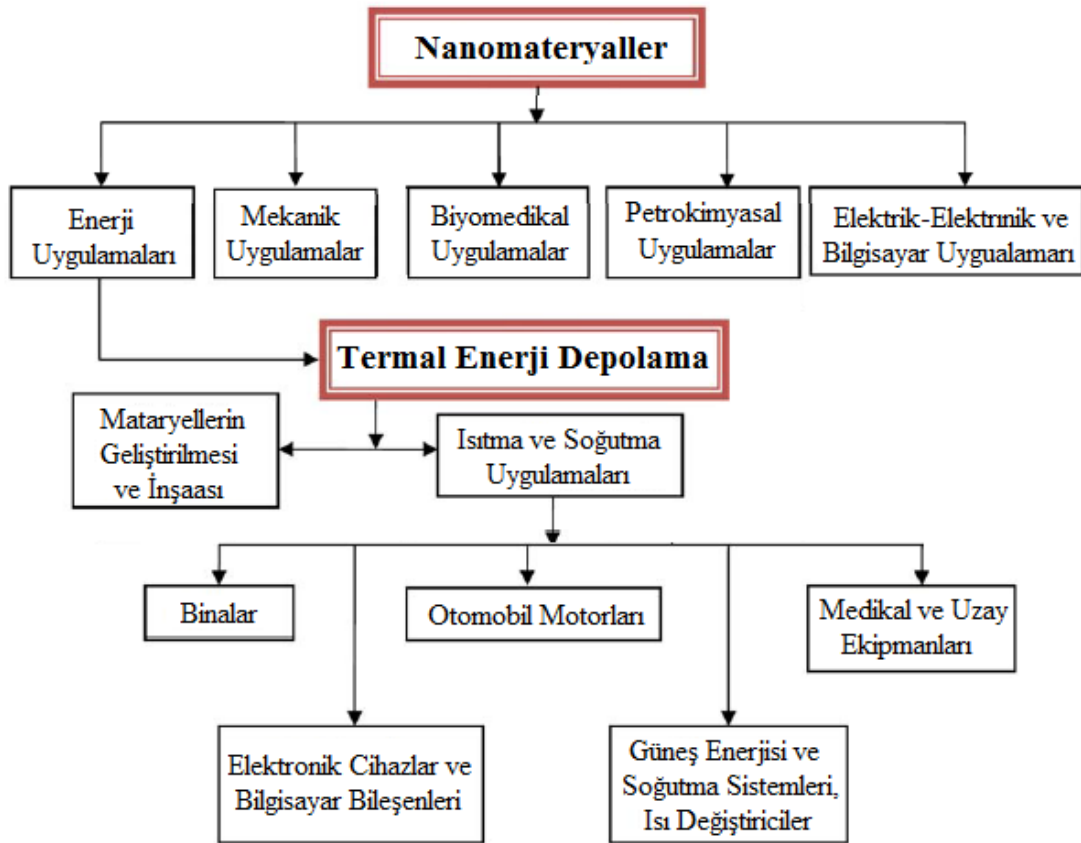
Termal sistemlerde klasik iş akışkanları olarak adlandırdığımız su, etilen glikol, motor yağı gibi akışkanlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın kullanıma sahip bu akışkanların termal performanslarının artırılmasını hedeflemek olağandır. Çünkü mevcut sistemlerde veya tasarımlarda termal performansları yüksek akışkanların kullanılması sistemlerin ısı transferi alanında küçülmeye gidilebilmesi anlamına gelmektedir. Bu da termal sistemlerin daha az yer kaplamalarına ve daha az malzeme kullanılması dolayısıyla üretim maliyetlerinde azalmaya olanak sağlamaktadır. Pasif ısı transferi artırma yöntemleri arasında yer alan katkı maddelerinin kullanımı yöntemi, klasik iş akışkanlarının ısıl iletkenliğini ve ısı transferi karakteristiğini iyileştirmek için sıklıkla kullanılmıştır.

Günümüzde sıklıkla kullanılan bu yöntemin bir yaklaşımı olan, temel akışkan içerisine ısıl iletkenlikleri temel akışkandan büyük katı parçacıkların süspansiyon edilmesi, ilk olarak 1900'lü yıllarda ortaya atılmıştır. O günlerin teknolojik ve endüstriyel şartları göz önüne alındığında bu katı parçacıkların boyutları ancak milimetre veya mikrometre olarak belirlenebilmiştir. Ancak teorik olarak sağlam temellere dayanan bu yaklaşım maalesef pratikte sonuç vermemiştir. Bunun sebebi olarak ise milimetre veya mikrometre boyutlarında partiküller ile hazırlanan süspansiyonların istenilen kararlılıkta olmaması gösterilmiştir. Ayrıca bu süspansiyonlar, çökme, tortulaşma aşınma gibi problemler oluşturmuş ve bunun yanında büyük basınç düşümlerine sebebiyet vermiştir. Bu sebeplerle endüstriyel uygulamalarda kendine yer bulamayan bu teori rafa kaldırılmıştır. Bundan birkaç on yıl sonra, nanoteknoloji kavramının ortaya çıkışı ile akışkan içerisine yüksek ısıl iletkenlikli partiküllerin ilavesi tekrar gündeme gelmiştir. Üretim ve malzeme alanlarındaki teknolojik gelişmeler yüksek iletkenlikli katı partiküllerin nanometre boyutlarında üretimine olanak tanımıştır ve geleneksel akışkanlara alternatif olarak nanoakışkanların ortaya çıkmasına neden olmuştur.

1.2. Nanoteknoloji, Nanomateryaller ve Nanoakışkanlar

Nanoteknoloji; milyarda bir ölçekte çalışan bir teknolojiyle ürünlerde/tekniklerde yenilik yaratmak ve/veya yeni ürünler/teknikler geliştirmektir. Başka bir deyişle nanoteknoloji; 1-100 nanometre boyutlarda, atomik ve moleküler seviyede maddelerin anlaşılması, kontrol edilmesi ve atomik seviyede değiştirilip işlevsel hale getirilmesidir. Nanoteknoloji, ölçü olarak Nanometre adı verilen (kısa şekli nm) bir ölçme birimini kullanılır. Nanometre; bir metrenin

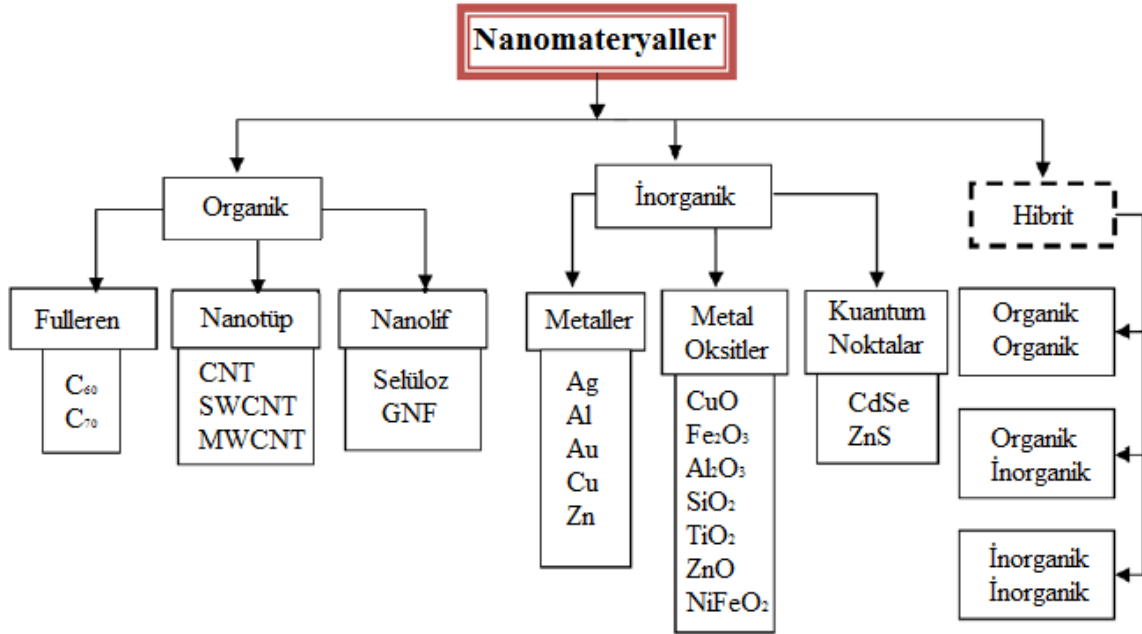
milyarda biri ölçüsünde bir uzunluğu temsil eder ve bu da yaklaşık olarak art arda dizilmiş birkaç atom kadardır. Elektron mikroskobunun bulunması ile birlikte, artık malzeme üretirken malzemeyi oluşturan elementlerin atomları üzerinde çalışmalar yapılarak (atomların diziliş biçimleri değiştirilerek) onlara çeşitli özellikler ilave edilmeye başlanmıştır. Bunun yanında gelişen üretim teknolojisi ile yapısal materyaller de artık nanometre mertebelerinde üretilmektedir. Günümüz teknolojisinde bu üstün özellikli nanoteknoloji ürünleri pek çok alanda insanlığın hizmetine sunulmuştur. Nanoteknoloji ürünü bu nanomateryaller enerji, mekanik, biyomedikal, petrokimyasal, elektrik-elektronik, bilgisayar vb. pek çok alanda kullanılmaktadır. Şekil 1.7’de günümüzde hayatın her alanında olan nanomateryallerin başlıca kullanım alanları verilmiştir. Bu tez kapsamında bu geniş nanoteknoloji alanının ‘‘Termal Enerji Depolama’’ kısmı ile ilgilenecektir.



Şekil 1. 7. Nanomateryallerin başlıca kullanım alanları (Al-Kayiem vd. 2013)

1.2.1. Nanomateryallerin sınıflandırılması

Nanomateriyaller temel olarak organik ve inorganik nanomateryaller olarak sınıflandırılabilir (Şekil 1.8). Fullerinler, karbon nanotüpler (CNT) ki bunlar tek duvarlı veya çok duvarlı olabilir, grafitler ve nanofiberler, organik nanomateryaller olarak sınıflandırılır. Bu organik nanomateryallerin hemen hemen hepsi karbon bazlı malzemelerdir. İnorganik nanomateryaller ise metal ve metal-oksitlerden oluşmaktadır. Genel olarak demir, alüminyum, bakır, silisyum, titanyum ve bu metallerin oksitleri inorganik nanomateryallere örnek olarak verilebilir. Bunun yanında son yıllarda hibrit nanomateryaller başlığı altında yeni bir sınıflandırma yapılmaktadır. Hibrit nanomateryaller organik ve inorganik nanomateryallerin kombinasyonu şeklinde organik-organik, organik-inorganik ve inorganik-inorganik materyal birlikteliklerinden meydana getirilmektedir. Şekil 1.8’de verilen sınıflandırmada nanomateryal grupları ve bu gruplara ait örnekler verilmiştir. Ayrıca nanomateryaller kullanım alanlarına göre de sınıflandırılabilirler. Örneğin nanoakışkan sentezinde genellikle metal ve metal oksitler kullanılırken, yapıştırıcılarda çoğunlukla nanolifler tercih edilmektedir.

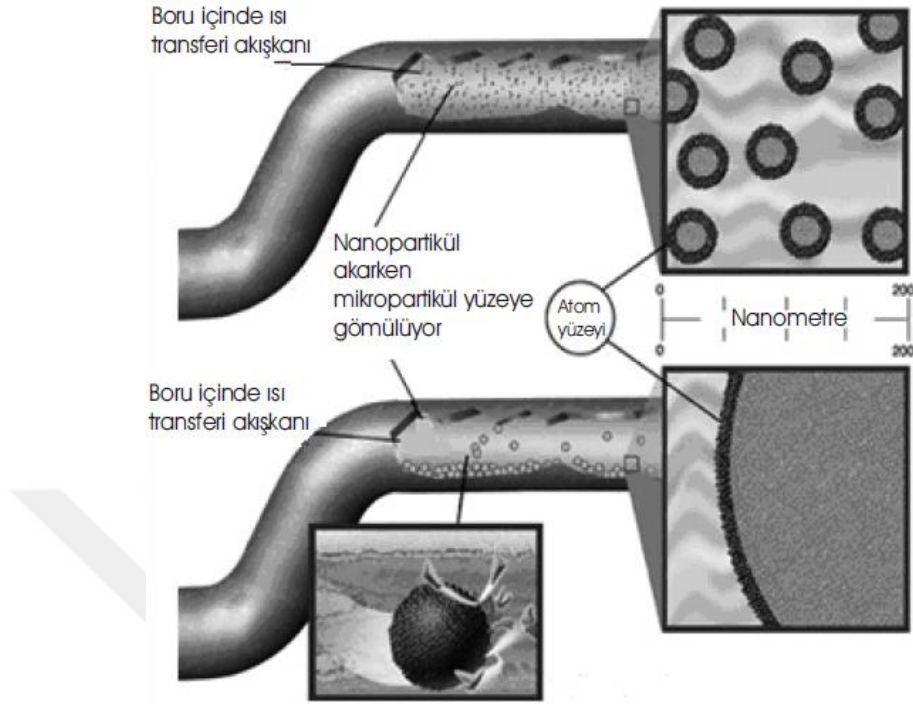


Şekil 1. 8. Nanomateryallerin sınıflandırılması ve bazı örnekler (Al-Kayiem vd. 2013)

1.2.2. Nanoakışkanlar

1.2.2.1. Nanoakışkan kavramı

Nanoakışkan tanımı ve bu akışkanının bilimsel serüveni, pasif ısı transferi arttırma yöntemlerinden katkı maddeleri kullanımı yöntemi üzerine yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Maxwell'e göre termal sistemlerde kullanılan klasik veya bir başka deyişle geleneksel iş akışkanlarına ısı iletkenliği yüksek partiküllerin ilavesi ile oluşturulan süspansiyonların termofiziksel özelliklerinde bir iyileşme sağlanacaktır. Bunun sebebi ise katı partiküllerin temel akışkandan yüksek ısı iletkenliğe sahip olmalarıdır. Fakat Maxwell'in yaklaşık 100 yıl önce ortaya attığı bu fikir, partiküllerin ancak milimetre ve mikrometre boyutlarında üretilebilmesi ve bu partiküllerle kararlı bir süspansiyon elde edilememesi neticesinde uzunca bir süre uygulamaya dökülemediği. Nanoteknoloji kavramının ortaya çıkması ve imalat sektöründe yaşanan teknolojik gelişmeler sonucu Maxwell'in fikri tekrar dikkat çeken bir konu haline gelmiştir. İlk olarak 1990'lı yılların ortalarında Choi nanometre boyutlarındaki partikülleri akışkan içerisine katarak kararlı bir süspansiyon elde etmiş ve bu süspansiyonun termal özelliklerinin klasik akışkana oranla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. İşte bu yüksek termal iletkenliğe sahip nanometre boyutundaki partiküllerin iş akışkanları içerisine katılması yöntemi ile elde edilen katı-sıvı süspansiyonlarına "nanoakışkan" adı verilir. Şekil 1.9'da temel akışkan içerisinde mikropartiküller ile nanopartiküllerin karşılaştırması yapılmıştır. Maxwell ortaya koyduğu mikro akışkanlar ile Choi'nin nanoakışkanları arasındaki farklar gösterilmiştir.



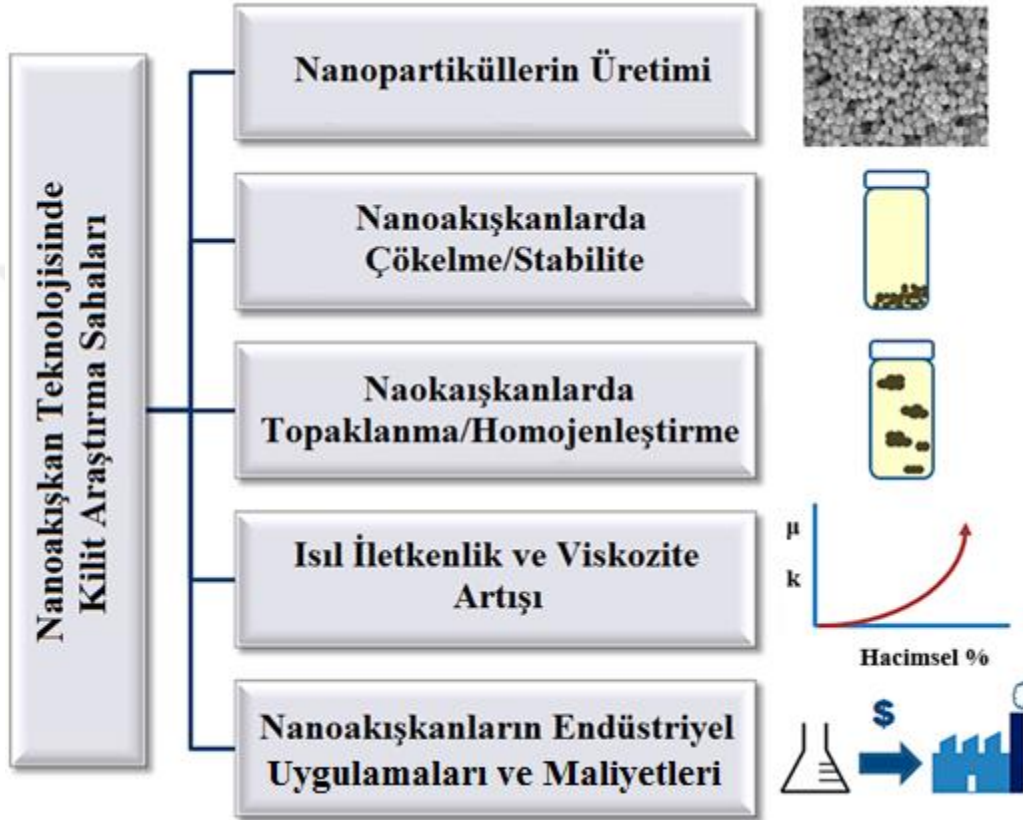
Şekil 1. 9. Nanoakışkanlar ile mikroakışkanların karşılaştırılması (Sahin vd. 2006)

Nanoakışkanlar basit bir katı-sıvı süspansiyonu gibi düşünülmemelidir. Bu akışkanlar özel yöntemler ile hazırlanır ve iki fazlı bir akışkandan çok tek fazlı bir akışkan gibi davranırlar. Nanoakışkanlardan beklenen özelliklerden bazıları aşağıda verilmiştir (Dilek 2008).

1. Kararlı (stabil) ve dayanıklı olmalıdır.
2. Partiküllerdeki topaklanma ihmal edilebilir düzeyde olmalıdır.
3. Partiküller akışkanın kimyasal özelliklerini değiştirmemelidir.
4. Partiküller sistem elemanlarına zarar vermemelidir.

Temel akışkan olarak genellikle su, etilen glikol veya yağ gibi akışkanlara nano boyutlu katı partiküllerin ilavesi ile elde edilen bu süspansiyonların karakteristikleri ve termofiziksel özellikleri, akışkanın hazırlanma yöntemi, partiküllerin türü, şekli ve büyüklüğü, temel akışkanın türü ve özellikleri veya katkı maddesi kullanımı ile alakalıdır. Sayılan parametrelerde yapılan herhangi bir değişiklik nanoakışkanın özelliklerini doğrudan etkileyecektir. Bu parametrelere ek olarak nanoakışkanın nasıl hazırlandığı da kararlılığını ve dayanıklılığını etkilemektedir. İlerleyen bölümde nanoakışkan hazırlamada uygulanan yaklaşımlardan

bahsedilecektir. Ayrıca önceki çalışmalar kısmında nanoakışkanın termal performansının artmasına neden olan fiziksel parametreler ve nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin tahmininde sıklıkla kullanılan modeller verilecektir. Bunun yanında Nanoakışkan teknolojisinde kilit araştırma sahaları Şekil 1.10'da verilmiştir.



Şekil 1. 10. Nanoakışkan teknolojisinde kilit araştırma sahaları (Taha-Tijerina vd. 2016)

1.2.2.2. Nanoakışkanların hazırlanması

Nanoakışkanların hazırlanması yalnızca nanopartiküllerin su, etilen glikol veya yağlar içerisine ilavesi ile sonuçlandırılmaz. Bunun yanında nanoakışkanlardan yukarıda verilen, iyi kararlılık, düşük topaklanma ve kimyasal özelliklerde değişim göstermeme gibi özelliklerde olması da beklenmektedir. Literatürde nanoakışkanların hazırlanması sırasında karşılaşılabilecek en büyük problem olarak çökelme problemi gösterilmektedir. Ayrıca nanoakışkanların hazırlanması hususunda pek çok teknik ortaya konulmuştur ve bu tekniklerin geliştirilmesi

konusunda çalışmalara devam edilmektedir. Nanoakışkanların hazırlanması konusunda temel olarak iki metottan bahsetmek mümkündür. Bunlar iki adım ve tek adım metotlarıdır.

Tek adım metodu metalik partiküller ile hazırlanan nanoakışkanlarda sıklıkla kullanılır. Bu metodun temelinde nanopartiküllerin üretimi ile temel akışkan içerisine dağıtımı eş zamanlı olarak yapılmaktadır. İlk bilinen tek adım metodu tekniği yağ substratı kullanımı ile vakum buharlaştırma (VEROS) tekniğidir. Gümüş (Ag) ve Demir (Fe) partikülleri ile sentezlenen nanoakışkanlarda sıklıkla kullanılan bu teknik zaman içerisinde çeşitli modifikasyonlara uğratarak geliştirilmiş ve bu tekniğin temelleri kullanılarak yeni teknikler ortaya konmuştur (Wang ve Mujumdar 2008a). Araştırmalar tek adım metodu ile hazırlanan nanoakışkanlarda partikül dağılımının iki adım metodu ile hazırlanan nanoakışkanlara göre daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır. Fakat tek adım metodu ile tek bir proses sonucu çok miktarda ve farklı partikül konsantrasyonlarında nanoakışkanlar elde edilememektedir. Bu saydığımız dezavantajlar neticesinde bu metot ticarileşememiştir (Romano vd. 1997).

Diğer bir nanoakışkan hazırlama metodu olan iki adım metodu bu hususta tek adım metodundan daha geniş bir kullanım alanına sahiptir. İki adım metodu aşağıda verilen aşamalardan oluşmaktadır.

1. Nanopartiküllerin, çeşitli metotlarla (kimyasal: buhar yoğunlaşma, mikro-emülsiyon, sprey piroliz, termal spreyleme veya fiziksel: öğütme, inert gaz yoğunlaşma) kuru toz olarak üretilmesi.
2. Nanopartiküllerin, mekanik karıştırma ve dağıtma işlemleri (ultrasonik homojenleştirme, yüksek parçalayıcı karıştırıcı vb.) ile temel akışkan içerisine ilave edilmesi.

İki adım metodu büyük miktarlarda nanoakışkan sentezine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle ekonomiktir ve endüstride kullanımı yaygındır. Yapılan araştırmalar genellikle bu metot ürünlerinin yüksek çökelme ve topaklanma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu sebeptendir ki araştırmacılar stabilite bozukluklarının önüne geçmek için çeşitli önerilerde bulunmuşlardır. Bu önerilerden en çok kullanılanları aşağıda verilmiştir.

1. Süspansiyonun pH değerini değiştirmek.
2. Yüzey aktif maddeler ve/veya seyrelticiler kullanmak.

Fakat çözüm olarak sunulan her iki yöntemde de nanoakışkan içerisine çeşitli yabancı maddelerin ilavesi söz konusudur ve bu maddeler akışkan türü, partikül şekli ve boyutu, nanoakışkanın fiziksel ve kimyasal özellikleri, hazırlanma biçimi vb. etkenlere göre farklılık göstermektedir. Ayrıca yukarıda verilen yöntemlerin uygulanmasının nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini nasıl etkileyeceği tam olarak açıklanamamaktadır (Wang ve Mujumdar 2008b).

1.3. MEMS ve Mikrokanallar

1.3.1. MEMS ve mikrokanal uygulamaları

Mikro Elektro-Mekanik Sistemler, günümüzde ki mekanik ve elektronik sistemlerin boyutlarının minyatürize edilmiş halleridir. Mikro Elektro-Mekanik Sistemlerin boyutları 1-100 mikrometre aralığında değişim gösterir. Tabii ki bu yapıları etkileyen birçok faktör vardır ve bu yapılar çevre şartlarından çok çabuk etkilenirler. Mikro elektro-mekanik sistem yapıları üç bölümden oluşur. Bu bölümler mekanik bölüm, mekanik bölümü çalıştıran tahrik bölümü ve mekanik hareketin davranışını inceleyen algılama bölümü olarak özetlenebilir. MEMS tahrik mekanizmaları verilen tahrik tipine göre farklılık gösterir. MEMS yapıları termal, elektrostatik, manyetik, pnömatik ve optik olarak tahrik edilebilir. Algılama işlemi ise genellikle optik ve elektronik sinyaller vasıtasıyla yapılır. MEMS, makine malzeme elektronik başta olmak üzere, temelde tüm mühendislik dalları ve temel bilimlerle birlikte pek çok dalı kapsayan çalışmaların yapıldığı disiplinler arası bir kavramdır. MEMS, dünya çapında milyarlarca dolarlık pazar potansiyeliyle çok çeşitli endüstriyel ve tıbbi alanlarda artan sayıda uygulama alanı bulmaktadır. Bu uygulama alanlarının bazıları özet halinde Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Mikroelektromekanik sistemlerin (MEMS) başlıca ilgi ve uygulama alanlarından biri olan elektronik bileşenlerin soğutulması oldukça önemlidir. MEMS’ler çalışırken büyük miktarda ısı ortaya çıkmaktadır. Mevcut soğutucular yeterli soğutma kapasitesine sahip olmadığı için MEMS teknolojisinde kullanılamamaktadır. Mikrokanallar küçük boyut ve ağırlıkları, az iş akışkanı gerektirmeleri ve yüksek ısı akısı sağlamaları nedeniyle MEMS

teknolojisinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak, mikrokanalların MEMS teknolojisinde kullanımını cazip kılan avantajlarının yanı sıra küçük hidrolik çap, basınç düşümü, çift fazlı akışlarda kavitasyon ve akış analizi için kullanılacak teorilerin belirsizliği gibi birtakım dezavantajları da söz konusudur (Manay 2012).

Çizelge 1. 2. Sektörlere göre MEMS ürünleri (Avcı 2008)

Alan	Uygulamalar
Bilişim	Optik esaslı bilgi depolama ve disk sürücü teknolojisi, mürekkep püskürtmeli yazıcılar, ivme duyargaları, dönü ölçer (kamera sabitleme sistemleri), antenler, duyarga ağları, mikroaynalar, mikro ısı değiştiricileri (elektronik devrelerin soğutulması)
Proses kontrolü, savunma, havacılık ve uzay	İvmeölçerler ve eğiklik duyargaları, gaz duyargaları, manyetik duyargalar, spektrometre, sıcaklık/basınç duyargaları, ultrasonik dönüştürücüler, mikrouydular, radyasyon ölçümü, akıllı giysiler, ivmeölçerler, biyolojik ve biyokimyasal ve duyargalar, yonga-laboratuar (biyolojik ve kimyasal silahların algılanması, ilaç yönetimi), ivmeölçerler, mikrobolometreler (kızıl ötesi görüntüleme sistemleri), mikro güç kaynakları, optik duyargalar, mikro ısı değiştiricileri (elektronik çiplerin soğutulması)
Tıp ve biyoloji	DNA analizi, mikrocerrahi aletler, kimyasal duyurucular, sinirsel elektrotlar/sondalar, insulün pompası, iğnesiz enjektörler, ivmeölçerler (kalp atışlarını düzenleyen cihazlar), işitme cihazları, basınç duyargaları (kalp basıncı), akıllı haplar, biyoçipler, mikroçipler, mikropompalar
Otomotiv	Basınç/sıcaklık/nem/ivme duyargalar, manyetik duyargalar, optik duyargalar, mikroenjektör, hava yastıkları, taşıt güdüm teknolojileri, yağmur algılama sistemleri, mikro ısı değiştiricileri
Çevre	İvmeölçerler (depremin algılanması), kimyasal ve biyokimyasal duyargalar, yonga-laboratuar (çevre kirliliğinin algılanması), radyoaktif duyargalar

Mikrokanallardaki akış akışkan moleküllerinin ortalama serbest yolunun mikrokanal karakteristik uzunluğuna oranı olarak tanımlanan Knudsen sayısına bağlı olarak makro kanallardaki klasik akış analiz yöntemleriyle çözülemeyebilir. Bu sebeple mikrokanallarda ısı transferi ve akış karakteristikleri makro boyuttaki kanallardan farklılık göstermektedir. Mikrokanallarda ısı transferi ile ilgili çalışmalarda ortak sonuçlara ulaşılabilmesi ifadeyi

desteklemektedir. Bu yönüyle mikro kanallarda akış ve ısı transferi karakteristikleri konusu günümüzde önemini korumakta ve araştırmacılar için ilgi kaynağı olmayı sürdürmektedir.

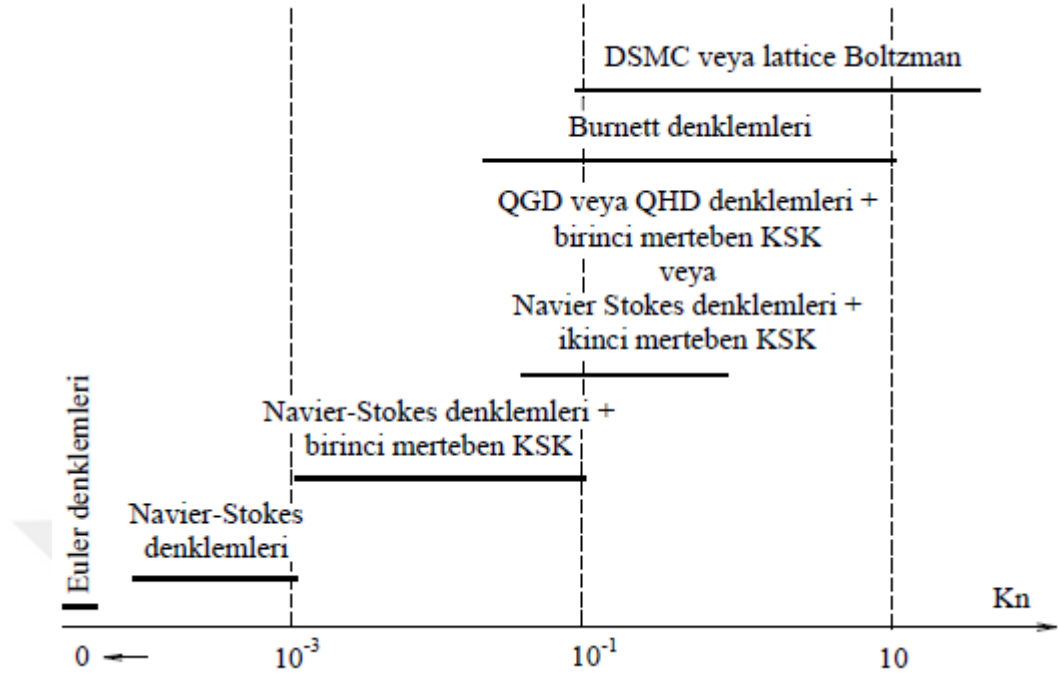
1.3.2. Mikrokanal tanımı ve Knudsen sayısı

Konu ile ilgili literatürde tam bir birlik sağlanmamış olsa da genellikle hidrolik çapları 0-1000 µm aralığında olan kanallar mikrokanal olarak adlandırılmaktadır. Knudsen sayısı ise mikrokanallardaki akışın sınıflandırılması için kullanılan bir ayraç olarak aşağıdaki gibi tanımlanır. Eşitlikte λ ortalama serbest yolu, L ise sistemin karakteristik uzunluğunu (D_h) temsil etmektedir.

$$Kn = \lambda / L \quad (2.1)$$

Knudsen bulunduğu aralığa göre 4 farklı durumdan söz etmek mümkündür. Bu durumlar aşağıda verilmiştir. Şekil 1.11’de bu 4 farklı duruma göre akış rejimleri ve akışkan hareketini temsil eden akış modelleri şematik olarak verilmiştir

1. $Kn < 10^{-3}$ için, akış sürekli akış olarak adlandırılır ve hareketli kayma sınır koşulu ile Navier-Stokes eşitlikleri kullanılabilir.
2. $10^{-3} < Kn < 10^{-1}$ için, akış kayma akışı rejimi olarak adlandırılır ve Navier-Stokes eşitlikleri, duvarlarda kayma hızı ve sıcaklık atlama dikkate alınarak uygulanabilir.
3. $10^{-1} < Kn < 10$ için, akış geçiş akışı olarak adlandırılır ve Navier-Stokes eşitliklerinin sürekli yaklaşımı artık geçerli değildir. Bununla birlikte moleküller arası çarpışma henüz ihmal edilebilir değildir ve dikkate alınması gerekir. Navier-Stokes eşitliklerinden daha yüksek mertebeli olan Burnett denklemi veya moleküler yaklaşıma dayalı Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) yöntemi kullanılabilir.
4. $Kn > 10$ için, akış serbest moleküler akış olarak adlandırılır ve moleküller arası çarpışma, gaz molekülleri ve duvarlar arasındaki çarpışmayla karşılaştırıldığında ihmal edilebilir.



Şekil 1. 11. Knudsen sayısı aralığına göre akış modelleri (Avcı 2008)

Sıvı akışlarında moleküler arası mesafe gazlara oranla çok küçüktür. Bu sebeple nanoakışkan kullanımında Knudsen sayısı 10^{-3} değerinin altında olacaktır. Bu durumda kullanacağımız mikrokanallarda sıvı akışları sürekli akış yaklaşımıyla analiz edilebilir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Karma Taşınım

Karma taşınım ile ısı transferi mikroelektronik soğutma, iklimlendirme ve petrokimya gibi büyük endüstriyel alanlarda sıklıkla başvurulan bir ısı transfer mekanizmasıdır. Bu sebeple enerji tasarrufu veya yukarıda bahsi geçen endüstriyel alanlarda kullanılan ısı değiştiricilerin kompaktlığı ancak karma taşınım ile ısı transferi mekanizmasının optimizasyonu ile veya bu mekanizma ile gerçekleştirilen ısı transferinde sağlanacak artışla sağlanabilir. Literatürde bu konu ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Yapılan araştırmalar genellikle Reynolds sayısı ve Grashof sayısı gibi akış parametrelerinin veya geometrik parametrelerin değişiminin ısı transferi üzerindeki etkilerini kapsamaktadır. Devam eden bölüm karma taşınım çalışmalarının küçük bir özeti şeklindedir.

Bu alandaki öncü çalışmalardan biri Depew ve August (1971) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada laminar akış şartlarında yatay bir boruda karma taşınım etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda iki yeni korelasyon önerilmiştir. Fakat bu korelasyonların maksimum %40 hata oranı gibi yüksek hata oranlarına sahip olduğu belirtilmiştir. Rustom ve Soliman (1988) yatay konumda ve iç yüzeyine kanatçıklar yerleştirilmiş bir tüpteki laminar karma taşınımı deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda tüp içerisinde karma taşınımın doğal taşınım bileşeni sebebiyle ikincil akış oluştuğu ve bu akışın geometrik parametrelerdeki değişimden büyük oranda etkilendiği rapor edilmiştir. Oluşan bu ikincil akıştaki değişikliklerin ise akış alanında aksel hız, sıcaklık dağılımı, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünü etkileyeceği öne sürülmüştür.

Maughan ve Incropera (1987) alt plakanın üniform olarak ısıtıldığı paralel plakalarda karışık taşınım ile olan ısı transferini deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada akışkan olarak hava kullanılmış ve Prandtl sayısı 0.7 olarak belirlenmiştir. Deneysel parametreleri $125 < Re < 500$, $7 \times 10^3 < Gr < 1 \times 10^6$ ve $0 < \theta < 30^\circ$ değerleri arasında seçilmiş ve bu parametrelerin etkileri incelenmiştir. Isı transferinde oluşan iyileşmelerin sebebi olarak, kaldırma kuvvetinin neden olduğu ikincil akışların oluşması ve gelişmesi gösterilmiştir. Yatay bir kanalda karma taşınımın sayısal olarak incelendiği bir başka çalışma ise Wu ve Perng (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kanal içine yerleştirilmiş eğik plakanın ısı transferi

performansındaki artışa etkileri araştırılmıştır. Parametre olarak eğik plakanın açısı 30-90° aralığında tutulmuş, Reynold sayısı değeri 260-530 aralığında belirlenmiş ve Grashof sayısı 0-3.2x10⁶ aralığında değiştirilmiştir. Sonuçlarda eğik plakanın ısı transferinde iyileşmelere yol açtığı ortaya konulmuştur.

Doğan ve Sivrioğlu (2010), karma taşınım şartlarında akıma paralel dikdörtgen kesitli kanatçıklar yerleştirilmiş kapalı bir kanallarda ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel olarak, sabit ısı akısı sınır şartı ve akışkan olarak da hava kullanılmıştır. Kanala giren havanın hızı 0.15-0.16 m/s civarında sabit tutulmuştur. Deneysel olarak Rayleigh sayısı $3 \times 10^7 < Ra < 8 \times 10^8$ ve Richardson sayısı $0.4 < Ri < 5$ aralığında değiştirilmiştir. Düzenekte, kanatçıklar arası mesafe, kanatçık yüksekliği ve genişliği gibi geometrik parametrelerin ısı transferine etkileri araştırılmış ve sonuç olarak optimum geometrik parametreler belirlenmiştir.

Yatay silindirik bir boruda giriş geometrilerinin karma taşınım ile ısı transferine etkileri Mohammed (2007) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel olarak $400 \leq Re \leq 1600$ ve $3 \times 10^5 < Gr < 10^6$ parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada geometrik parametreler olarak ise küt ve yuvarlatılmış uçlu olarak iki farklı giriş geometrisinden faydalanılmıştır. Ayrıca 30 mm sabit boru çapı ile 600-2400 mm arası boru uzunlukları için deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı giriş geometrileri ve uzunluklarının ısı transferini etkilediği belirtilmiştir.

Mohammed ve Salman (2007), eğimli bir silindir içerisinde karma taşınım ile ısı transferinde açının ısı transferi üzerine etkisini sabit ısı akısı sınır şartında deneysel olarak araştırmıştır. Deneysel olarak Reynolds sayısı değeri 400-1600 aralığında tutulmuştur. Deneysel olarak, 30 mm çapında ve 900 mm uzunluğunda alüminyum boruda 70-400 W/m²'lik sabit ısı akısı sınır şartında gerçekleştirilmiştir. Kanal 30°, 45° ve 60° olmak üzere üç farklı açı değerinde konumlandırılmış ve aynı zamanda boru çapı sabit tutularak boru uzunluğu da değiştirilmiştir. Sonuç olarak tüm geometriler için artan açı değerlerinin Nusselt sayısını arttırdığı ortaya konulmuştur.

Doğan (2007), laminar karma taşınım şartları altında içerisine kanatçıklar yerleştirilmiş kapalı kanallarda ısı transferini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Sabit ısı akısı sınır

şartında gerçekleştirdiği bu çalışmada akışkan olarak ise hava kullanmıştır. Reynolds sayısı aralığı $250 < Re < 2300$, Grashof sayısı aralığı $5 \times 10^7 < Gr < 1 \times 10^9$ ve Richardson sayısı aralığı ise $0.05 < Ri < 342$ olarak belirlenmiştir. Kanatçıklar arası mesafe $4 < S < 18$ mm olarak alınmış, kanatçık yüksekliği ise $25 < H < 80$ m arasında seçilmiştir. Çalışmanın sayısal kısmı FLUENT paket programı ile yürütülmüştür. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda Reynolds sayısındaki artışın, kanatçıklar arası herhangi bir mesafe ve her bir kanatçık yüksekliği için ısı transfer katsayısının artırdığı, ortaya konulmuş ve doğrulanmıştır.

Chong vd. (2007), ortaya koydukları deneysel çalışmada, dikdörtgen bir kanal içerisine bir plaka yerleştirmiş ve bu kanalın karma taşınım ile ısı transferi karakteristiklerini incelemiştir. Düzeneklerinde kanal -60° 'den 60° 'ye kadar açılar ile konumlandırılmış ve kanal kesitinin orta noktasına yerleştirilmiş plaka üniform ısı akısı ile ısıtılmıştır. Deneysel esnasında Prandtl sayısı yaklaşık olarak 0.7 belirlenmiş, Reynolds sayısı 300-1900 aralığında, Grashof sayısı ise 5×10^2 - 5×10^6 aralığında tutulmuştur ve açı -60° 'den $+60^\circ$ 'ye doğru değiştirilmiştir. Ortalama Nusselt sayıları ve basınç kayıplarının Reynolds sayısı ile ilişkisi gözlemlenmiştir. Sonuç olarak Reynolds sayısının 1500 değerine kadar ortalama Nusselt sayısının artan kanal açısı ile arttığı fakat 1500 Reynolds değerinden sonra Nusselt sayısındaki değişimin açıdan bağımsız olduğu ortaya konmuştur.

Karma taşınım ile ısı transferi alanında yukarıda verilen özet haricinde birkaç benzer çalışma da bulunmaktadır. Bunu yayında karma taşınım etkilerinin gözlemesi için gerekli düşük Reynolds sayılarında ($25-500$ Re) çalışmanın zorluğun da bahsetmek gerekir. Bu durum araştırmacıları daha çok sayısal çalışmalara yönlendirmektedir. Aşağıda verilen çizelge (Çizelge 2.1) karma taşınım ile ısı transferi konusunda yapılan sayısal çalışmaların bir kısmı özetlemektedir.

Çizelge 2. 1. Karma taşınım ile ısı transferi özet çizelgesi (sayısal çalışmalar)

Referans	Boyut /Isıtma Şekli / Akışkan Türü	Parametre Aralıkları	Bulgular
Islam vd. (2001)	3D/ÜIA/Hava,Su	$104 \leq Ra \leq 108$ $1.5 \leq R \leq 10$ $0.7 \leq Pr \leq 5.42$ $200 \leq Re \leq 1000$	Sonuçlar Rayleigh sayısının ikincil akış, eksenel hız profili, ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkisini içermektedir. Artan Prandtl sayısı Nusselt sayısını düşürür ve tahmin edilen Nusselt sayısı deney sonuçları ile iyi bir uyum içindedir. Nusselt sayısı belirli bir mesafeden sonra hızla azalır, daha sonra üniform hale gelmeden önce kademeli olarak artar.
Mirmasoumi ve Behzadmehr (2008)	2D/ÜIA/Al ₂ O ₃ -Su	-	Hacimsel partikül yoğunluğu arttıkça ikincil akış gücü artmıştır. Tüpün alt kısmı, üstten daha yüksek konsantrasyona sahipken, yoğunlaşma, viskoz kuvvetlerin önemli olduğu yakın duvar bölgesinde daha da yüksektir.
Ben vd. (2011)	2D/ÜIA/Su	-	Buharlaşma fenomeni, uygulanan ısı akısı yoğunluğunu ve besleme suyu sıcaklığını arttırarak veya besleme suyu kütleli debisini azaltarak geliştirildi.
Izadi vd. (2013)	3D/ÜIA/Al ₂ O ₃ -Su	$Ri_o/Ri_i = 0.5-1.5$ $\phi = \%1-5$	Kaldırma kuvvetleri kaynaklı ikincil akışlar ısı transfer katsayısını büyük oranda etkiler. Ri_o/Ri_i 'nin artırılması, iç ve dış duvar ısı transfer katsayısını arttırırken, ısı transfer katsayısına nanopartikül hacimsel konsantrasyonunun etkisi oldukça karmaşıktır.
Zanchini (2008)	2D/UDS	-	Sonuçlar değişken viskozite artışının, kaldırma kuvvetlerindeki viskoz basınç düşümüne bağlı olduğunu gösterdi. Ayrıca basınç düşüşünün yalnızca kesit ortalamalı Fanning sürtünme faktörü ile orantılı olduğu sonucuna varıldı.
Teamah vd. (2005)	2D/UDS	$Ra = 10^3-10^6$ $Re = 0-2000$ $Pr = 0.01-10$	Rayleigh sayısına göre ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısındaki artıştan etkilenmediği savunulmuştur.

Akbari vd. (2008)	3D/Nanoakışkan	-	Isı transfer katsayısı 0.004 hacimsel partikül konsantrasyonunda %15 civarında artmıştır. Sürtünme katsayısı dolayısı ile basınç düşümü tüp eğimi ile birlikte sürekli artarken, ısı transfer katsayısı eğim açısını 45° değerinde maksimuma ulaşır.
Devi ve Suriyakumar (2013)	2D	$0.00 \leq \phi \leq 0.10$ $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	Eğim açısı arttıkça boyutsuz hız artar. Bununla birlikte, eğim açısının etkisi sıcaklık düşürmektir. Bakır-su ve alümina-su nanoakışkanlarında hacimsel partikül yoğunluğu arttıkça boyutsuz hız ve sıcaklık artar.

2.2. Nanoakışkanlar

Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ve ısı transferi karakteristikleri ile ilgili bir literatür özeti şeklinde olan bölümlerde nanoakışkanların ısı iletkenliklerini, viskozitelerini ve termal performanslarını arttıran parametrelerden ve bu artışa sebep olan mekanizmalardan bahsedilecektir. Ayrıca termofiziksel özelliklerin saptanmasında önerilen modellere değinilecektir. Yine de son yıllarda trend olan bu konuyu tamamının bu bölümde özetlenmesi mümkün değildir. Şekil 2.1’de literatürde son 10 yılda bu konu ile ilgili yapılan yayınların yıllara göre dağılımı verilmiştir.

Tarama Şekli: Nanofluid* (Başlık)				Tarama Şekli: Nanofluid*(Konu)			
Sonuç:6869				Sonuç:11640			
Basım Yılı	Yayın Adedi	Toplam %	Dağılım	Basım Yılı	Yayın Adedi	Toplam %	Dağılım
2016	1241	18.067 %	■	2016	2096	18.007 %	■
2015	1178	17.150 %	■	2015	1980	17.010 %	■
2014	998	14.529 %	■	2014	1634	14.038 %	■
2013	749	10.904 %	■	2013	1243	10.679 %	■
2012	695	10.118 %	■	2012	1115	9.579 %	■
2011	525	7.643 %	■	2011	856	7.354 %	■
2010	413	6.013 %	■	2010	731	6.280 %	■
2009	301	4.382 %	■	2009	573	4.923 %	■
2008	253	3.683 %	■	2008	498	4.278 %	■
2007	181	2.635 %	■	2007	309	2.655 %	■

Şekil 2. 1. Nanoakışkanlar ile ilgili çalışmaların yıllara göre dağılımı

(wcs.webofknowledge.com, 01.11.2016)

2.2.1. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri

2.2.1.1. Isıl iletkenlik

Maddelerin termal performansını belirlemede en önemli parametre ısı iletkenliktir. Akışkanlarda da bu böyledir. Bir sistemde kullanılan iş akışkanının ısı iletkenliği sistemin termal performansını doğrudan ve büyük oranda etkiler. Bu sebeple nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin belirlenmesi nanoakışkan kavramının ortaya çıkışı ile en dikkat çeken konu haline gelmiştir. Nanoakışkanların ısı iletkenliklerini ölçmede literatürde sıklıkla üç temel yöntemden bahsedilir. Bu yöntemler aşağıda verilmiştir.

1. Geçici sıcak tel metodu (transient hot wire method)
2. Kararlı hal paralel plaka tekniği (steady-state paralel plate technique)
3. Sıcak salınım tekniği (temperature oscillation technique)

Bu yöntemler arasında sıklıkla geçici tel yöntemi tercih edilmektedir. Geçici sıcak tel yönteminde, anlık elektriksel sinyallere telin verdiği zaman ve sıcaklık tepkileri ölçülerek yorumlanır. Bu tel hem ısıtma hem de sıcaklık ölçümü amacıyla kullanılır. Aynı zamanda bu tez kapsamında konu edilen çalışmada da geçici sıcak tel yöntemi ile ısı iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Nanopartiküllerin temel akışkanlar içerisine katılmasıyla elde edilen nanoakışkanların ısı iletkenlikleri partikül tipine, partikül hacimsel konsantrasyonuna, partikül şekil ve büyüklüklerine, temel akışkan türüne ve hatta nanoakışkan hazırlama yöntemi ve katkı maddelerine göre değişiklik göstermektedir. Fakat bir nanoakışkanın ısı iletkenliğindeki en önemli parametre tabii ki nanoakışkanı oluşturan iki ana bileşen olan temel akışkan ve nanopartiküllerin ısı iletkenlikleridir. Çizelge 2.2’de nanoakışkan sentezinde sıklıkla kullanılan akışkan ve partiküllerin ısı iletkenlikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Klasik ısı transferi akışkanları ve bazı katı malzemeler için ısı iletkenlikler
(Jaime vd. 2016)

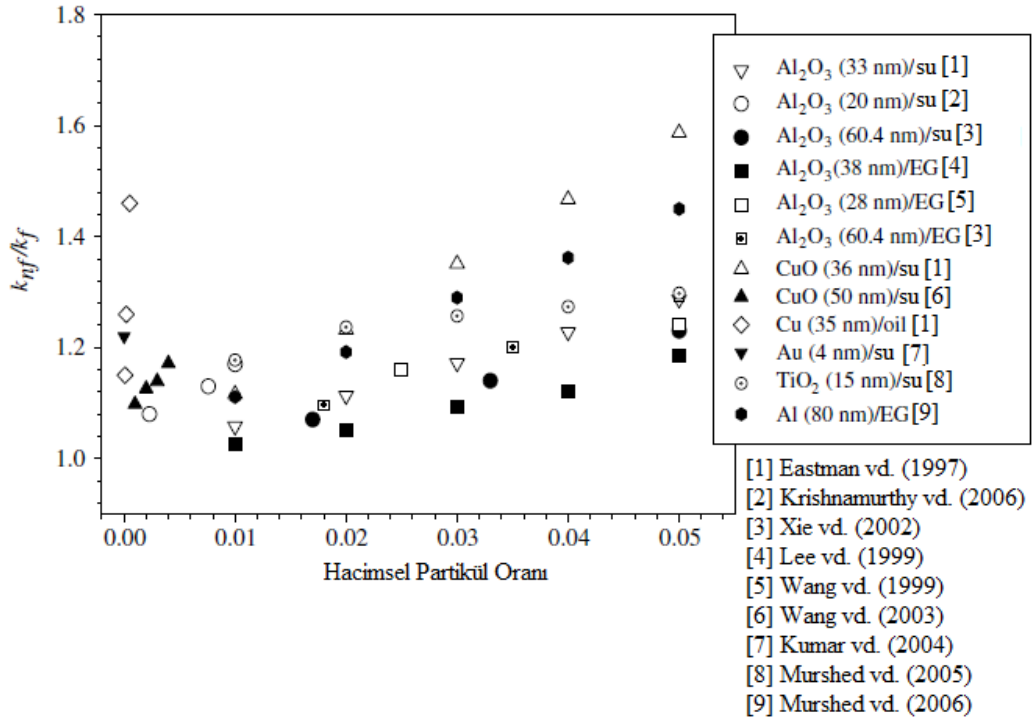
	Materyal	İletkenlik (W/mK)	Kaynak
Klasik Akışkanlar	Su(<i>DiW</i>)	~0.60-0.61	Kroto vd. (1985), Lee (2006), Patel vd. (2003)
	EtilenGlikol(<i>EG</i>)	~0.251	Eastman vd. (1996), Liu vd. (2005)
	Motor Yağı	~0.145	Eastman vd. (1996), Liu vd. (2005)
	Minarel Yağ	~0.115	Taha-Tijerina vd. (2012), Godfrey ve Herguth (1995)
	Gazyağı	~0.139	Iijima (1991)
	Toluen	~0.133	Iijima (1991)
	R141b Soğutucu	~0.089	Mahbulul vd. (2013)
Metalik Katılar	Alüminyum	237	Perry ve Green (2007)
	Bakır	398	Perry ve Green (2007)
	Altın	315	Perry ve Green (2007)
	Demir	80	Perry ve Green (2007)
	Nikel	91	Perry ve Green (2007)
	Gümüş	424	Perry ve Green (2007)
Karbon Yapıları	Tek cidarlı nanotüp (<i>SWCNTs</i>)	3000-6000	Marquis ve Chibante (2005), Osman ve Srivastava (2001)
	Çift cidarlı nanotüp (<i>MWCNTs</i>)	~3000	Kim vd. (2001), Hong vd. (2007)
	Karbon(elmas)	900-2320	Speight (2004), Kang vd. (2006)
	Karbon(grafit)	119-165	Speight (2004)
	Grafen	~3000	Balandin (2011), Ghosh vd. (2008)
	Grafit	130-2000	Callister ve Rethwisch (2014)

Metalik Olmayan Katılar	Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	31-41	Callister ve Rethwisch (2014), Dodd ve Murfin (1994)
	Alüminyum Nitrür (AlN)	319-550	Slack vd. (1987)
	Bor Nitrür ($h-BN$)	~300	Xu ve Chung (2000), Wang vd. (2009)
	Bor Nitrür Nanotüp ($BNNTs$)	~600-960	Duclaux vd. (1992), Chang vd. (2005)
	Bor Nitrür Nanokurşunları ($BNNRs$)	1700-2000	Peimyoo vd. (2014)
	Bakır Oksit (CuO)	76.5	Hwang vd. (2007)
	Molibden Disülfür (MoS_2)	34.5±4	Yan vd. (2014)
	Silisyum Karbür (SiC)	148	Perry ve Green (2007)
	Silisyum Oksit (SiO_2)	1.4	Wang vd. (2007), Hwang vd. (2006)
	Titanyum Oksit (TiO_2)	8.4	Kim vd. (2006)
	Tungsten Disülfür (WS_2)	32-53	Peimyoo vd. (2014)
	Çinko Oksit (ZnO)	29	Kim vd. (2006)

Nanoakışkanların termofiziksel özellikleriyle ilgili çalışmalarda genellikle nanoakışkanların ısı iletkenlikleri partiküllerin süspansiyon edildiği temel akışkanlar ile karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma iki farklı şekilde verilmiştir. Bunlardan birincisi nanopartikül ilavesi ile temel akışkanın ısı iletkenliğindeki artışın yüzde kesri ile verilmesidir. İkincisi ise nanoakışkanın ısı iletkenliğinin temel akışkanın ısı iletkenliğe oranı olarak tanımlanan efektif termal iletkenliğin belirtilmesidir. Efektif termal iletkenlik aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_{eff} = k_{nf} / k_b \quad (2.2)$$

Şekil 2.2’de Mushred vd. (2008) tarafından hazırlanmış hacimsel partikül yüzdesine karşılık efektif ısı iletkenlik katsayıları grafiği verilmektedir. Grafikte artan partikül yüzdelerinde efektif ısı iletkenliğin arttığı gözlenmektedir. Ayrıca grafikte verilen tüm efektif ısı iletkenlik değerleri 1’den büyüktür. Bu durumun nanopartiküllerin ısı iletkenliklerinin her zaman temel akışkanların ısı iletkenliklerinden büyük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2. 2. Efektif ısı iletkenliklerin hacimsel partikül oranı ile değişimi (Murshed vd. 2008)

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

Kim vd. (2007) ise bu hususta küçülen partikül boyutlarını ile nanoakışkanın ısı iletkenliklerinin linner olarak arttığını deneysel olarak belirlemiştir. Ancak bu lineer artışın mevcut matematiksel modeller ile açıklanamayacağı vurgulanmıştır. Buna karşın Chen vd. (2008) ve Beck vd. (2009) tarafından yapılan çalışmalarda ise partikül boyutlarında meydana gelecek artışın nanoakışkanın ısı iletkenliğini arttıracağı savunulmuştur. Çizelge 2.3 nanoakışkanların ısı iletkenlik artışı, hacimsel oran ve sentez yönteminin verildiği araştırmaların derlenmesi ile oluşturulmuştur.

Çizelge 2. 3. Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri için birkaç örnek (Li vd. 2009)

Nanoakışkan	Sentez Yöntemi	Hacim Kesri (%)	Partikül Boyutu (nm)	Isıl İletkenlik Artışı (%)	Kaynak
<i>Cu/EG</i>	Tek Adım	0.3	10	40	Eastman ve Choi (2001)
<i>Cu/H₂O</i>	Tek Adım	0.1	75-100	23.8	Min-Sheng Liu vd. (2006)
<i>Cu/H₂O</i>	İki Adım	7.5	100	78	Xuan ve Li (2000)
<i>Fe/EG</i>	Tek Adım	0.55	10	18	Hong vd. (2005)
<i>Ag/Toluen</i>	İki Adım	0.001	60-80	16.5(60°C)	Patel vd. (2003)
<i>Au/Toluen</i>	İki Adım	0.00026	10-20	21(60°C)	Patel vd. (2003)
<i>Au/Etanol</i>	İki Adım	0.6	4	1.3 ± 0.8	Putnam vd. (2006)
<i>Fe₃O₄/H₂O</i>	İki Adım	4	10	38	Zhu vd. (2006)
<i>TiO₂/H₂O</i>	Tek Adım	5	15	30-33	Murshed vd. (2005)
<i>Al₂O₃/H₂O</i>	İki Adım	5	20	20	Xie vd. (2002)
<i>Al₂O₃/EG</i>	İki Adım	0.05	60	29	Xie vd. (2002)
<i>CuO/H₂O</i>	İki Adım	5	33	11.5	Zhang vd. (2006)
<i>SiC/H₂O</i>	İki Adım	4.2	25	15.9	Xie vd. (2001)
<i>CNT/motor yağı</i>	İki Adım	2.0	20-50	30	Liu vd. (2005)
<i>CNT/EG</i>	İki Adım	1.0	15x30 µm	19.5	Xie vd. (2003)
<i>CNT/H₂O</i>	İki Adım	1.0	15x30 µm	7.0	Xie vd. (2003)

$H_2O/FC-72$	İki Adım	12	9.8 nm	52	Yang ve Han (2006)
--------------	----------	----	--------	----	--------------------

Partikül boyutları ve sıcaklığın nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerindeki etkilerini inceleyen bir diğer deneysel çalışmayı ise Patel vd. (2010) gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda temel akışkan içerisine nanopartikül ilavesinin ısı iletkenliği oldukça arttırdığı rapor edilmiştir. Ek olarak çalışmada Maxwell modeli gibi klasik modellerin partikül boyutu ve sıcaklık parametrelerini içermemesi sebebiyle nanoakışkanların ısı iletkenliklerini belirlemede yetersiz kaldığı ortaya konmuştur. Ayrıca araştırmacılar nanoakışkanın ısı iletkenliğinin sıcaklık ve partikül boyutu ile ilişkisini sırasıyla doğru ve ters orantılı olarak tanımlamıştır. Nanoakışkanların kimyasal özelliklerinin ısı iletkenlik katsayısı üzerindeki etkisini inceleyen öncü çalışma ise Xie vd. (2002) tarafından ortaya konmuştur. Bu çalışmada pH değerindeki değişimin nanoakışkanın ısı iletkenliğine etkisi incelenmiştir. Benzer şekilde Lee vd. (2006) CuO nanopartikülleri ile hazırladıkları nanoakışkanlarda pH değerinin nanoakışkanın ısı iletkenliğini büyük oranda etkilediğini belirlemiştir. Hwang vd. (2006) farklı nanopartiküllerin (Ag, SiO₂, CuO, MWCNT ve fullerene) farklı temel akışkanlar (su, etilen glikol, poly- α -olefin yağı, motor yağı) içerisine ilavesi ile elde edilen nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini belirlemeye çalışmıştır. Fullerene-Su nanoakışkanının ısı iletkenliğinin temel akışkandan daha düşük olması nedeniyle bu nanoakışkan dışındaki kullanılan tüm nanoakışkanların ısı iletim katsayısının, partikül yüzdesinin artışı ile arttığı ortaya konmuştur.

Sonuç olarak literatür, nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen; temel akışkanın ısı iletkenliği, nanopartiküllerin ısı iletkenliği, hacimsel oran, nanopartikülün şekli ve boyutu, sıcaklık ve katkı maddeleri gibi parametreler açısından incelenmiştir. Bu parametrelerin etkileri pek çok araştırmacı tarafından araştırılmış olsada birbiriyle örtüşen sonuç sayısı oldukça azdır ve birçok çelişkili sonuç bulunmaktadır. Bu sebeple nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin belirlenmesi ve arttırılması konusu araştırmacıların ilgisine çekmeye devam etmektedir. Çizelge 2.4 nanoakışkanların ısı iletkenlikleriyle ilgili bir özet tablosu niteliğindedir.

Çizelge 2. 4. Nanoakışkanların ısı iletkenlik özet çizelgesi (Angayarkanni ve Philip 2015)

Nanopartikül/boyut (nm)	Temel Akışkan	Konsantrasyon ϕ (%)	k_{nf}/k_f	Kaynak
Al ₂ O ₃	Su	4.3	1.32	Masuda vd. (1993)
CuO/18.6	EG	4	1.2	Lee vd. (1999)
Polietilen	Silikon Yağı	10	1.13	Shin ve Lee (2000)
Bakır/100		1.5	1.12	Xuan ve Li (2000)
		8	1.45	
Bakır/100	Su	2.5	1.23	Xuan ve Li (2000)
		7.5	1.78	
Gümüş/100	EG	10000 ppm	1.18	Cho vd. (2005)
CNT/ID: 5-10	EG	1	1.12	
OD: 20-50	Motor Yağı	1	1.3	
Bakır	Su	2	1.74	Jana vd. (2007)
Fe ₃ O ₄	EG	0.3	1.165	Yoo vd. (2007)
CNT/Çap (10) Uzunluk (5-10 μ m)	Su	0.3	1.02	Chen vd. (2008)
		1	1.10	
SiC/170	Su	1	1.04	Singh vd. (2009)
		4	1.22	
Al ₂ O ₃ /10		0.4	1.05	Buongiorno vd. (2009)
		2.8	1.15	
Fe ₃ O ₄ /8.7	Gaz Yağı	1.71	1.06	Shima vd. (2010)
		5.03	1.125	
CuO/10	EG	0.18	1.07	Shima vd. (2010)
		0.92	1.12	
		1.14	1.14	
γ -Al ₂ O ₃	Su+EG	0	1	Serebryakova vd. (2015)
		0.3	1.005	
		0.6	1.02	
		1.1	1.03	
		1.4	1.04	
Nanodiamond	EG	0.5	1.025	Branson vd. (2013)
		1.9	1.12	
Fe ₃ O ₄ /15	Gaz Yağı	0.2	1.01	Yu vd. (2010)
		0.85	1.11	
Fe ₃ O ₄	Gaz Yağı	0.25	1.04	Parekh vd. (2010)
		1	1.32	
ND-Ni/25	Su	0.012	1.07	Sundar vd. (2014)
		0.05	1.21	
ND-Ni/25	EG	0.62	1.03	Sundar vd. (2014)
		3.03	1.2	

TiO ₂ /13	Su	0.62 3.03	1.001 1.08	Angayarkanni vd. (2014)
CuO/<50 nm	Su	1 2 4	1.08 1.12 1.15	Ponmani vd. (2014)
ZnO/<50 nm		0.01 0.05 0.02 0.08	1.27 1.53 1.09 1.12	Ponmani vd. (2014)
Grafen	Su	0.01 0.06	1.24 1.33	Mehrali vd. (2014)
Grafen	EG	0.05 0.2	1.041 1.119	Ma vd. (2014)
Fe/98 nm	Su	0.003 0.0025 0.01	1 1.01 1.05	Esfe vd. (2015)
Cu	Tetradekan	0.001 0.01 0.015 0.020	1.02 1.06 1.09 1.14	Jiang vd. (2015)
Co ₃ O ₄	EG	0 0.01 0.02 0.03 0.045 0.06	1 1.04 1.09 1.13 1.17 1.23	Mariano vd. (2015)
SiC	Su	0.1 1 2 3	1.033 1.039 1.05 1.07	Lee vd. (2011)
Al ₂ O ₃	Metanol	0.01 0.37	1.06 1.07	Pang vd. (2012)
SiO ₂		0.5 0.85 0.01 0.37 0.5	1.11 1.14 1.011 1.012 1.051	Pang vd. (2012)

2.2.1.2. Viskozite

Nanoakışkan viskozitesi de nanoakışkanlar için önemli bir termofiziksel özellik olarak dikkat çekmektedir. Çünkü akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanan viskozite zorlanmış akışlarda doğrudan basınç kaybına dolayısı ile pompa gücüne etki etmektedir. Endüstriyel uygulamalar için önemli bir konu olan basınç kaybının akışkan viskozitesi ile doğrudan ilgisi araştırmacıların bu konuya ilgi göstermelerine sebep olmuştur. Nanoakışkan viskozitesinin belirlenmesi konusunda geniş bir literatür bulunmaktadır. Literatürde genellikle temel akışkan içerisine nanopartikül ilavesi sonucu viskozite değerinde belirgin bir artış rapor edilmiştir. Aynı zamanda nanoakışkan viskozitesinin, partikül hacimsel oranı, şekli ve büyüklüğüne ayrıca sıcaklık ve kümelenme durumuna bağlı olduğu belirtilmiştir. Viskozitedeki artış da ısı iletkenlikte olduğu gibi genel manada iki şekilde verilebilmektedir. Bunlardan ilki nanoakışkanın viskozitesinin temel akışkan ile karşılaştırılarak artışın yüzde kesri olarak verilmesidir. İkincisi ise mevcut artışı efektif viskozite kavramı ile tanımlamaktır. Efektif viskozite aşağıdaki gibidir.

$$\mu_{eff} = \mu_{nf} / \mu_b \quad (2.3)$$

Masuda vd. (1993) Al₂O₃ SiO₂ ve TiO₂ nanopartiküllerinin saf su içerisine süspansiyon edilmesinin akışkan viskozitesi üzerine etkilerini incelemiştir. Deneysel olarak yapılan araştırmada sıcaklık değeri oda sıcaklığıyla 67°C arasında tutulmuştur. TiO₂-Su nanoakışkanı için %4.3'lük hacimsel partikül oranında viskozitede %60 artış rapor edilmiştir. Bununla birlikte, %2'den yüksek konsantrasyonlarda Al₂O₃ ve SiO₂ nanoakışkanlarının efektif viskozite değerlerinin, iki veya ikinin üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Nanoakışkanların viskozite değerlerinin incelendiği bir başka deneysel çalışma ise Pack ve Cho (1998) tarafından gerçekleştirilmiştir. Al₂O₃ ve TiO₂ nanopartikülleri ile yürütülen çalışmada ortalama partikül boyutu sırası ile 13 nm ve 27 nm olarak verilmiştir. Partikül hacimsel oranları ise sırasıyla %3 ve %10'dan düşük tutulmuştur. Sonuç olarak nanoakışkanların viskozitesinin oldukça yüksek değerlere ulaştığı belirtilmiştir. Bunun yanında azalan sıcaklıkla birlikte nanoakışkanların viskozitelerinin temel akışkanda gözlenen duruma

benzer şekilde azaldığı ortaya konmuştur. Ayrıca nanoakışkan viskozitesinin partikül büyüklüğü ve konsantrasyonuna bağlı olduğu rapor edilmiştir.

Wang vd. (1999) sırasıyla 28 nm ve 23 nm ortalama partikül boyutundaki Al_2O_3 ve CuO nanopartikülleri ile hazırlanmış nanoakışkanların viskoziteleri üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada temel akışkan olarak saf su, etilen glikol ve motor yağı kullanılmıştır. Çalışmanın kilit noktası ise nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan yöntemlerin farklılık göstermesi ve bu yöntemlerin nanoakışkan viskozitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Sonuç olarak mekanik karıştırma yöntemiyle hazırlanan nanoakışkanların, filtrasyon ve yüzey kaplama yöntemleri ile hazırlanan nanoakışkanlardan yüksek viskozite değerine sahip oldukları belirtilmiştir. Bu durum ise mekanik karıştırma yöntemlerinin, partiküllerin temel akışkan içerisine dağıtılmasında yetersiz olmasıyla açıklanmıştır. Ayrıca çalışma sonucunda %3 hacimsel konsantrasyona sahip Al_2O_3 nanoakışkanı için viskozite artışı %30 olarak rapor edilmiştir. Ek olarak Pack ve Cho'nun (1998) aktardığı viskozitedeki %300 artışa nazaran oldukça düşük olan %30 artış değerinin partikül boyutu ve hazırlama tekniklerindeki farklarda oluşabileceği de belirtilmiştir.

Su bazlı CNT (Karbon Nanotüp) nanoakışkanların viskozitesinin çeşitli şartlar altında incelendiği bir çalışma ise Ding vd. (2006) tarafından ortaya konmuştur. Çalışmada parametreleri pH, sıcaklık (25-40°C) ve hacimsel partikül yoğunluğu (%0.1-0.5) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, en yüksek ısı transfer katsayısının 6 pH değerinde gözlendiği belirtilerek nanoakışkan viskozitesinin artan sıcaklık değeriyle azaldığı ve artan partikül konsantrasyonu ile arttığı rapor edilmiştir. He vd. (2007) partikül boyutu ve konsantrasyonun etkisini su bazlı TiO_2 nanoakışkanları için deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada hacimsel nanopartikül konsantrasyonunun üst limiti olarak %1.18 belirlenmiş ve viskozite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar artan hacimsel partikül konsantrasyonu ile nanoakışkan viskozitesinin arttığını göstermiştir. Ayrıca hacimsel konsantrasyon ile viskozite arasındaki ilişkinin lineer olmadığı vurgulanmıştır. Nanoakışkanların viskozitesi ile ilgili iki farklı çalışmadan alınan özet tabloları aşağıda verilmiştir (Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.6).

Çizelge 2. 5. Nanoakışkan viskozitesi özet çizelgesi (Azmi vd. 2016)

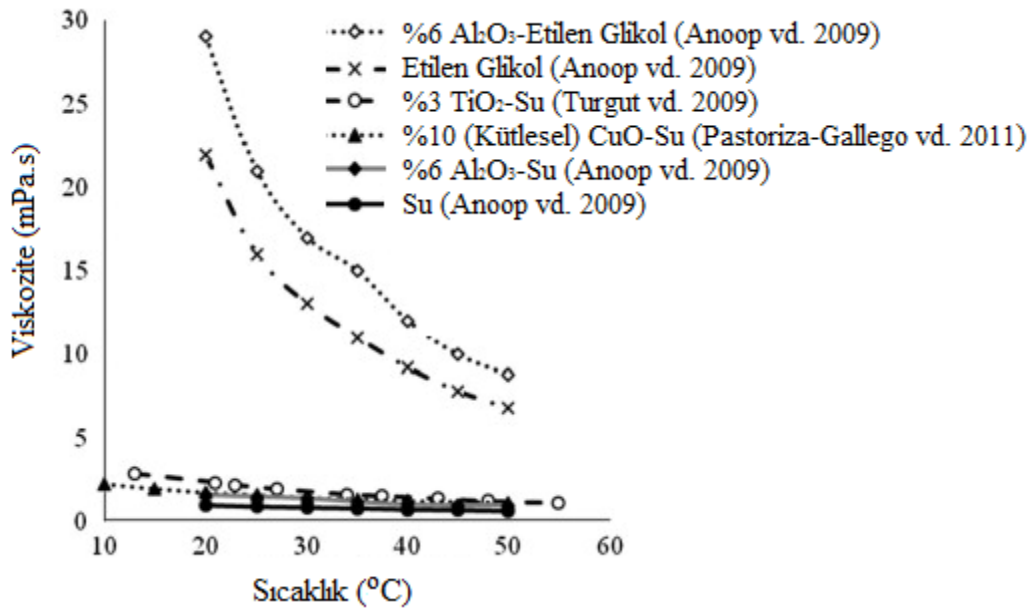
Kaynak	Partikül Tipi	Temel Akışkan	Hacimsel Oran (%)	Parçacık Boyutu (nm)	Maksimum Artış (%)	Notlar
Masuda vd. (1993)	Al ₂ O ₃	Su	1.30-4.30	13	300	31.85-86.85°C
	SiO ₂	Su	1.10-2.40	12	200	
		Su	3.10-4.30	27	60	
Pak ve Cho (1998)	TiO ₂	Su	0.99-10	27	200	25°C
Wang vd. (1999)	Al ₂ O ₃	Su	0-6.0	28	85	25°C
	Al ₂ O ₃	EG	0-3.5		40	
Das vd. (2003)	Al ₂ O ₃	Su	1-4	38	46	20-60°C
Heris vd. (2006)	Al ₂ O ₃	Su	0.2-3.0	20	40	24°C
	CuO			50-60	60	
Namburu vd. (2007)	SiO ₂	EG	0-10	29, 50, 100	350	-35-50°C
	CuO	Su	0-6.12	29		-35-50°C
He vd. (2007)	TiO ₂	Su	0.24-1.18	20	11	22°C
Nguyen vd. (2007, 2008)	Al ₂ O ₃	Su	0-13	36/47	450	25-75°C
Lee vd. (2008)	Al ₂ O ₃	Su	0.01-0.3	30	3	21-39°C
Turgut vd. (2009)	TiO ₂	Su	0.2-3.0	21	130	13-55°C
Yu vd. (2009)	SiC	Su	3.7	170	100	25-70°C
Kole ve Dey (2010)	Al ₂ O ₃	Motor Yağı	0.1-3.5	<50	300	10-80°C
Tavman vd. (2010)	SiO ₂	Su	0.4-1.85	12	90	20-50°C
	TiO ₂		0.2-2.0	21	20	
	Al ₂ O ₃		0.5-1.5	30	80	
Lee vd. (2011)	SiC	Su	3	100	100	28-70°C
Azmi vd. (2012, 2013)	SiO ₂	Su	0-4.0	50	49	30°C

Çizelge 2. 6. Su ve EG bazlı nanoakışkanların deneysel bağlı viskoziteleri (Kakaç ve Pramuanjaroenkij 2016)

Temel Akışkan	Nanopartikül Tipi	Hacimsel Oran (%)	Bağlı Viskozite	Kaynak
Su 0.00089 Pa.s Sundar vd. (2013)	Al ₂ O ₃	0.01-0.30	1.029	Lee vd. (2008)
	Al ₂ O ₃	0.00-5.00	2.36	Chandrasekar vd. (2010)
	Al ₂ O ₃ (36 nm)	0.00-13.00	4.5	Nguyen vd. (2008)
	Al ₂ O ₃ (47 nm)	0.00-13.00	5.5	Nguyen vd. (2008)
	Al ₂ O ₃	0.00-6.00	1.6-1.8	Anoop vd. (2009)
	Al ₂ O ₃ (<50) nm)	0.13-2.90	1.3	Pastoriza-Gallego vd. (2009)
	Al ₂ O ₃ (<20) nm)	0.13-2.90	1.8	Pastoriza-Gallego vd. (2009)
	TiO ₂	0.20-2.00	1.15	Duangthongsuk ve Wongwises (2009)
	Fe ₃ O ₄	0.00-2.83	2	Li vd. (2005)
	Fe	0.00-4.00	11.25	Li vd. (2005)
	Ag	0.30/0.06/0.09	1.06-1.43	Godson vd. (2010)
	CuO	1.00-6.12	4	Namburu vd. (2007)
	CuO	0.16-1.70	1.14/1.81	Pastoriza-Gallego vd. (2011)
	SiC	4.00	1.8	Timofeeva vd. (2011)
EtilenGlikol 0.0162 Pa.s Sundar vd. (2013)	AlN	1.00-10.00	1.37	Yu vd. (2001)
	TNT	0.10-1.80	1.7	Chen vd. (2009)
	Al ₂ O ₃	0.00-6.00	1.22	Anoop vd. (2009)
	CuO	0.00-6.00	1.24	Anoop vd. (2009)
	ZnO	0.20-5.00	1.15	Yu vd. (2009)
	Elmas	1.00	1.01	Yu vd. (2001)

Anoop vd. (2009) çeşitli hacimsel partikül oranlarında (%0.5, 1.2, 4, 6) CuO ve Al₂O₃ nanopartikülleri ile hazırlanmış etilen glikol bazlı nanoakışkanların viskozitelerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada sıcaklık aralığı 20-50°C aralığında tutulmuş ve nanoakışkan viskozitesinin artan sıcaklıkla azaldığı kaydedilmiştir. Tavman vd. (2010) %2 ye kadar hacimsel partikül oranlarına sahip ve sırasıyla 12, 21 ve 30 nm partikül boyutlarında SiO₂, TiO₂ ve Al₂O₃ nanopartikülleri ile hazırlanan su bazlı nanoakışkanların viskozitelerini belirleme üzerine deneysel bir çalışma ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda artan partikül oranlarının nanoakışkan viskozite değerlerinde büyük oranda artışa neden olduğu rapor edilmiştir. Kole ve Dey (2010) 15-50°C sıcaklık aralığında gerçekleştirdikleri çalışmada

%0.1 ile %1.5 hacimsel partikül oranında Al_2O_3 kullanarak hazırladıkları nanoakışkanın viskozite değerini incelemiştir. Bu çalışmada da nenzar olarak artan sıcaklık değerleri ile viskozitenin azaldığı tespit edilmiştir. Pastoriza-Gallego vd. (2011) 283.15K'den 323.15K'e kadar değişen sıcaklıklarda CuO-Su nanoakışkanı için nanoakışkan viskozitesinin sıcaklıkla değişimi incelenmiştir. Yapılan deneylerde sıcaklık artışıyla viskozitenin düştüğü görülmüştür. Şekil 2.3'de Mahbulbul vd. (2012) tarafından çeşitli çalışmalar için viskozitenin sıcaklıkla değişimi verilmiştir.



Şekil 2. 3. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklıkla değişimi (Mahbulbul 2012)

2.2.1.3. Isıl iletkenlik ve viskozite modelleri

Nanoakışkanların ısı iletkenliğini tahmin etmek için pek çok çalışma yapılmış ve literatüre çok sayıda teorik modeller sunulmuştur. Karışım içerisinde sadece küresel partiküllerin eklenmesi durumunda geçerli olan bir model Maxwell (1881) tarafından geliştirilmiştir. Maxwell'in modeli ilk etapta içerisinde makro boyutta parçacıklar olan katı-sıvı karışımları için düşünülmektedir. Fakat bu modelin nanoakışkanlara uygulanabilirliği oldukça güçlüdür. Sonradan geliştirilen pek çok model Maxwell modeline dayandırılmaktadır. Bu modelin belki de en eksik noktası yalnızca küresel geometrideki partiküllere hitap etmesidir. Günümüzde pek

çok farklı yöntemler ile üretilen nanopartiküllerde veya sentezlenen nanoakışkanlarda partikül şekilleri küresel geometrinin dışına çıkabilmektedir. Küresel partiküllerin yanında küresel olmayan partiküllerde de kullanılabilen ve literatürde sıklıkla kullanılan bir başka model ise Hamilton-Crosser (1962) tarafından önerilmiştir. Model, partikül ve temel akışkan iletkenliklerinin ve partikül şekillerinin fonksiyonu olarak verilmiştir. Çizelge 2.1’de verilen denklemde n deneysel şekil faktörüdür ve $n=3/\psi$ olarak verilir. Burada ψ küreselliktir ve kürenin (partikül ile eşit hacmine sahip) yüzey bölgesinin partikülün yüzey bölgesine oranı olarak tanımlanır. Xuan ve Li (2000) Hamilton Crosser modelini kullanarak ψ ’nin 0.5 ten 1 e kadar farklı değerleri için nanoakışkanların ısı iletkenliğini tanımlayan bir model önermiştir. Lee vd. (1999) dairesel partiküller için Al_2O_3 nanoakışkanlarını kullanarak gerçekleştirdiği deneysel çalışmasında, sonuçların model ile mükemmel bir uyum içinde olduğunu rapor etmiştir.

İki fazlı karışımların efektif ısı iletkenliğinin hesaplanmasında alternatif bir model de Yu ve Choi (2003) tarafından ortaya konmuştur. Ayrıca literatürde homojen küresel partiküller içeren iki fazlı karışımlar için güçlü bir model olan Bruggeman (1935) modeli de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu model nanopartiküllerin kümelenme etkisini düşünmek için Wang et al. (2003) tarafından modifiye de edilmiştir. Çizelge 2.7 nanoakışkanlarda ısı iletkenlik modellerini kapsayan bir özet tablo niteliğindedir.

Çizelge 2. 7. Isıl iletkenlik modelleri özet çizelgesi (Angayarkanni ve Philip 2015)

<p>1. Maxwell (1881)</p>	$\frac{k}{k_b} = \frac{1+2\beta\phi}{1-\beta\phi}, \beta = \frac{(k_p - k_b)}{(k_p + 2k_b)}$
<p>2. Bruggeman (1935)</p>	$\frac{k}{k_b} = k_b \frac{\left[(3\phi - 1) \frac{k}{k_b} + (2 - 3\phi) + \sqrt{\Delta} \right]}{4}$ $\Delta = (3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_p}{k_b} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{k_p}{k_b} \right)$

3. Hamilton ve Crosser (1962)	$\frac{k}{k_b} = k_b \left[\frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)(k_b - k_p)\varphi}{k_p + (n-1)k_b + (k_b - k_p)\varphi} \right]$
4. Yu vd. (2004)	$\frac{k}{k_b} = \left(1 + \frac{n\varphi A}{1 - \varphi A}\right) k_1, A = \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} \frac{k_{pj} - k_b}{k_{pj} + (n-1)k_b}$
5. Hashin ve Shtrikman (1962)	$k_b \left[1 + \frac{3\varphi k}{3k_b + (1-\varphi)k} \right] \leq k \leq \left[1 - \frac{3(1-\varphi)k}{3k_p - \varphi k} \right] k_p$
6. Avsec vd. (2007)	$\frac{k}{k_b} = \left[\frac{k_p + (n-1)k_b - (n-1)\alpha_e(k_b - k_p)}{k_p + (n-1)k_b + \alpha_e(k_b - k_p)} \right]$
7. Xuan vd. (2003)	$\frac{k}{k_b} = \frac{k_p + 2k_b - 2(k_b - k_p)\varphi}{k_p + 2k_b + (k_b - k_p)\varphi} k_f + \frac{\rho_p \varphi c_p}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \mu}}$
8. Pak ve Cho (1998)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 7.47\varphi$
9. Kumar vd. (2004)	$\frac{k}{k_b} = k_b + c \frac{2k_B T}{\pi v d_p^2} \frac{\varphi r_b}{k_b (1-\varphi) r_b} k_b$
10. Chandrasekar vd. (2009)	$\frac{k}{k_b} = \left[\frac{k_p + (n-1)k_b + (n-1)(1+\beta)^3 \varphi(k_p - k_b)}{k_p + (n-1)k_b - (1+\beta)^3 \varphi(k_p - k_f)} \right] + \frac{c\varphi(T-T_0)}{\mu k a^4}$
11. Prasher vd. (2005)	$\frac{k}{k_b} = (1 + A Re^m, Pr^{0.333} \varphi) \left[\frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\varphi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\varphi} \right] k_p,$ $h = \frac{k_p}{a(1 + A Re^m, Pr^{0.333} \varphi)}$

<p>12. Leong vd. (2006)</p>	$\frac{k}{k_b} = \frac{(k_p - k_{lr})\varphi k_{lr} [2\gamma_1^3 - \gamma^3 + 1] + (k_p + 2k_{lr})\gamma_1^3 [\varphi\gamma^3(k_{lr} - k_b) + k_b]}{\gamma_1^3(k_p + k_{lr}) - (k_p - k_{lr})\varphi[\gamma_1^3 + \gamma^3 - 1]}$
<p>13. Yamada vd. (1987)</p>	$\frac{k}{k_b} = \frac{\frac{k_p}{k_b} + K - K\varphi(1 - \frac{k_p}{k_b})}{\frac{k_p}{k_b} + K + \varphi(1 - \frac{k_p}{k_b})} k_b, K = 2\varphi^{0.2}(l_p / d_p)$
<p>14. Gupta vd. (1995)</p>	$k = k_b(0.0556Pe + 0.1649Pe^2 - 0.0391Pe^3 + 0.0034Pe^4)$
<p>15. Hesselman vd. (1987)</p>	$\frac{k}{k_b} = \frac{[\alpha(1 + 2\beta + 2)] + 2\varphi[\alpha(1 - \beta) - 1]}{[\alpha(1 + 2\beta + 2)] - \varphi[\alpha(1 - \beta) - 1]}$
<p>16. Xie vd. (2005)</p>	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\theta\varphi_T + \frac{3\theta^2\varphi_T^2}{1 - \theta\varphi_T}$
<p>17. Jang vd. (2004)</p>	$\frac{k}{k_b} = k_b + (1 - \varphi) + k_p\varphi + \varphi h\delta_T$
<p>18. Timofeeva vd. (2007)</p>	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\varphi$
<p>19. Wang vd. (2003)</p>	$\frac{k}{k_b} = \frac{(1 - \varphi) + 3\varphi \int_0^\infty \frac{k_{cl}(r)n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_b} dr}{(1 - \varphi) + 3\varphi \int_0^\infty \frac{k_b n(r)}{k_{cl}(r) + 2k_b} dr}$

<p>20. Emami vd. (2010)</p>	$\frac{k}{k_b} = \frac{\alpha'(1 + \frac{\Delta}{d})}{1 + \frac{\alpha'\Delta}{d}}$
<p>21. Wand vd. (2010)</p>	$\frac{k}{k_b} = 1 + \frac{3fq(p) / p_0}{1 - fq(p) / p_0}$
<p>22. Corcione (2011)</p>	$\frac{k}{k_b} = 1 + 4.4 \text{Re}^{0.4}, \text{Pr}^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.03} \varphi^{0.66}$
<p>23. Bu-Xuan Wang (2012)</p>	$k_{cp} = k_{ad} \frac{(k_p + 2k_{ad}) + 2A^3(k_p - k_{ad})}{(k_p + 2k_{ad}) - A^3(k_p - k_{ad})}; A = \frac{1-t}{t+a}$
<p>24. Chon vd. (2005)</p>	$\frac{k}{k_b} = 1 + 64.7 \varphi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.7476}, \text{Pr}^{0.9955} \text{Re}^{1.2321}$
<p>25. Kihm vd. (2011)</p>	$\frac{k}{k_b} = \left[1 + C \frac{f^a k_b \rho_p c_p T^{1.5}}{k_b h \mu^{0.5} d_p^{0.5}}, \exp(-3.8T_b / T) \left(\frac{c_b}{c_p} \right)^b \right]$
<p>26. Evans vd. (2006)</p>	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\varphi \frac{\gamma - 1}{\gamma + 2}$
<p>27. Evans vd. (2008)</p>	$\frac{k}{k_b} = 1 + \varphi_p \frac{k_p}{3k_b}$

28. Yang vd. (2008)	$\frac{k}{k_b} = 1 + 3\varphi \frac{\alpha - 1}{\alpha + 2}; \alpha = \frac{r_p}{R_b k_b}$
29. Braginsky vd. (2008)	$k_{\min}^{-1} = \varphi k_s^{-1} + (1 - \varphi) k_1^{-1}$ $k_{\max} = \varphi k_s + (1 - \varphi) k_1$
30. Vajjha vd. (2009)	$\frac{k}{k_b} = \left[\frac{k_p + 2k_b - 2(k_b - k_p)\varphi}{k_p + 2k_b + (k_b - k_p)\varphi} \right] \times 5 \times 10^4 \beta \varphi \rho_{p,b} \sqrt{\frac{kT}{\rho_p d_p}} f(T, \varphi)$
31. Ho vd. (2010)	$\frac{k}{k_b} = \frac{2 + \left(\frac{k_p}{k_b}\right) + 2\varphi \left[\left(\frac{k_p}{k_b}\right) - 1\right]}{2 + \left(\frac{k_p}{k_b}\right) - \varphi \left[\left(\frac{k_p}{k_b}\right) - 1\right]}$

Nanoakışkanların viskozitesinin belirlenmesi, ısı iletkenlik konusuna göre nispeten daha az çalışılmış bir konudur. Nanoakışkanların reolojik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmaların temelleri Einstein'ın klasik analiz çalışmasıyla atılmıştır. Sıvılar içerisinde süspansiyon küre parçacıkların viskozitesini belirlemeye yönelik öncü çalışma Einstein (1906) tarafından yürütülmüştür. Sıvıyla partiküller arası etkileşimi esas alan Einstein eşitliği, yalnızca düşük hacimsel oranlarda ve küresel geometriye sahip parçacıklar için doğru sonuçlar verebilmiştir. Daha sonra de Brujin (1942) yalnızca düşük hacimsel oranlar için doğru sonuçlar verebilen bu yöntemi geliştirmiş ve yüksek hacimsel oranlara uygun hale getirmiştir. Bir başka genişletilmiş Einstein modeli ise Mooney (1951) tarafından ortaya konmuştur. Bunu yanında Brinkman (1952) sayısal olarak gerçekleştirdiği çalışmada Einstein modelini geliştirerek, %4 hacimsel oranlara uygun sonuçlar veren bir model ortaya çıkarmıştır.

Bir başka sayısal model Frankel ve Acrivos (1967) ortaya konmuştur. Düşük hacimsel oranlarda Einstein modeliyle iyi bir uyum içerisinde olan bu model daha sonra Graham (1981) tarafından partikül boyutları dikkate alınarak geliştirilmiştir. Nanoakışkanlarda Brownia

hareketi etkileri göz önüne alınarak oluşturulan bir başka model ise Masoumi vd. (2009) tarafından önerilmiştir. Araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılan bu model, sonra yıllarda ortaya konan en güvenilir modeldir ve pek çok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır. Aşağıda verilen çizelgede (Çizelge 2.8) sayısal çalışmalar sonucu ortaya konan viskozite modelleri verilmiştir.

Çizelge 2. 8. Nanoakışkanların viskozite modelleri sayısal çalışmalar (Azmi vd. 2016)

Yazar	Model	Tanım
Einstein (1906)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2.5\phi$	%1 den düşük hacim oranında süspansiyonlar için
de Bruijn (1942)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{1}{1 - 2.5\phi + 1.522\phi^2}$	Daha yüksek hacimsel oranlar için elıştırılmış Einstein modeli
Vand (1948)	$\log \mu_{eff} = \log \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{2.5\phi + 2.7\phi^2}{1 - 0.609\phi}$	Brownian etkisinin ihmal edildiği küresel geometrideki parçalar için
Mooney (1951)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \exp\left(\frac{2.5\phi}{1 - \phi / \phi_m}\right)$	Sonsuz seyreltilmiş küresel partiküllü süspansiyonlar için
Brinkman (1952)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}}$	%4'e kadar hacimsel orandaki süspansiyonlarda kullanılabilir
Krieger ve Dougherty (1959)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \left(\frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$	Yarı deneysel
Frankeland ve Acrivos (1967)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{9}{8} \left[\frac{(\phi / \phi_m)^{1/3}}{1 - (\phi / \phi_m)^{1/3}} \right]$	Yarı deneysel

Nielsen (1970)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = (1 + 1.5\phi) \exp\left(\frac{\phi}{1 - \phi_m}\right)$	Düşük hacimsel oranlar için kabul edilebilir
Lundgren (1972)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2.5\phi + \frac{25}{4}\phi^2$	Yarı deneysel
Batchelor (1977)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2$	%10 a kadar hacimsel oranlar için kabul edilebilir
Graham (1985)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 2.5\phi + \frac{25}{4} \times \left[\frac{1}{\left(\frac{H}{d_p}\right)\left(2 + \frac{H}{d_p}\right)\left(1 + \frac{H}{d_p}\right)^2} \right]$	Frankeland ve Acrivos (1967) modelinin geliştirilmiş halidir
Masoumi vd. (2009)	$\mu_{nf} = \mu_b + \frac{\rho_p V_b d_p^2}{72C\delta}$ $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi}} d_p$ $C = \mu_b^{-1}(a\phi + b)$	Brownian hareketi etkileri dikkate alınarak hazırlanmıştır

Yukarıda verilen tüm bu modeller geniş bir hacimsel oran skalasında veya partikül boyutunda hazırlanan nanoakışkanın viskozitesini tahmin konusunda tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Nanopartikül tipi, hacimsel konsantrasyon, partikül boyutları ve partikül şekli gibi parametrelerde oluşan herhangi bir değişiklik seçilen viskozite modelinin beklentilerin altında kalmasına neden olacaktır. Bu nedenle araştırmacılar daha kuvvetli modellerin ortaya konulabildiği yarı deneysel yöntemlere başvurmuşlardır. Yarı deneysel modellerde genellikle bazı parametreler (genellikle partikül şekil ve boyutları) sabit tutulmaktadır. Çizelge 2.9’da yarı deneysel efektif viskozite modellerine örnekler verilmiştir.

Çizelge 2. 9. Yarı deneysel viskozite modellerine örnekler (Azmi vd. 2016)

Yazar	Model
Tsengand ve Lin (2003)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 13.47 \exp(35.98\phi)$
Maïga vd. (2004)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 123\phi^2 + 7.3\phi + 1$
Buongiorno (2006)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 13.47 \exp(35.98\phi)$
Namburu vd. (2007)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2 (Al_2O_3)$ $\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 5.45\phi + 108.2\phi^2 (TiO_2)$
Nguyen vd. (2007)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1.125 - 0.0007T (Al_2O_3)$ $\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 2.1275 - 0.0215T + 0.0002T^2 (CuO)$
Duangthongsuk ve Wongwises (2010)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = 1 + 7.3\phi + 123\phi^2$
Yu vd. (2009)	$\mu_{nf} = 0.00496 \exp(1736.6T)$
Kole ve Dey (2010)	$\log(\mu_{nf}) = A \exp(-BT)$ $A = -225.245\phi + 18.404\phi + 1.749$ $B = 575.835\phi^3 - 32.101\phi^2 + 0.148\phi + 0.011$

Corcione (2011)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = \frac{1}{1 - 34.87(d_p / d_b)^{-0.3} \varphi^{1.03}}$ $d_b = 0.1 \left(\frac{6M}{N\pi\rho_b} \right)$
Sharma vd. (2012)	$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_b} = C_1 \left\{ \left(1 + \frac{\varphi}{100} \right)^{11.3} \left(1 + \frac{T_{nf}}{70} \right)^{-0.038} \left(1 + \frac{d_p}{170} \right)^{-0.061} \right\}$ <p>SiC için $C_1 = 1.4$ ve Metal Oksitler için $C = 1.0$</p>

2.2.1.4. Isıl iletkenliği arttıran mekanizmalar

Bu bölümde nanoakışkanların ısıl iletkenliğindeki artışa neden olarak görülen bazı mekanizmalar tartışılacak ve açıklanacaktır.

1. Nanopartiküllerin Brownian Hareketi

Brownian hareketi, süspansiyon bir akışkan içerisindeki partiküllerin rastgele hareketidir. Nanoakışkanlar göz önüne alındığında, nanopartiküllerin bu rastgele hareketiyle doğrudan enerji taşınmaktadır. Ek olarak, nanopartiküllerin etrafında sıvının hareketi nedeniyle oluşan bir mikro taşınım etkisi de göz ardı etmemek gerekir. Literatürde, nanoakışkanların ısıl iletkenliğinin Brownian hareketine etkisi konusunda pek çok çalışma vardır. Bhattacharya vd. (2004) nanoakışkanlardaki Brownian hareketini dikkate alarak nanoakışkanların ısıl iletkenlik artışını belirlemek için Brownian dinamiklerin simülasyonunu kullanmıştır. Bu çalışmada nanoakışkanın gerçek efektif ısıl iletkenliği şöyle tanımlanmıştır:

$$k_{nf} = \varphi k_p + (1 - \varphi) k_b \quad (2.4)$$

Burada k_p yalnızca nanopartiküllerin ısıl iletkenliği değildir, aynı zamanda nanopartiküllerin ısıl iletkenliğine Brownian hareketi etkisini de içermektedir. Çalışmaların sonucunda, Brownian dinamikleri simülasyonu metodu ile Cu-etilen glikol ve Al_2O_3 -etilen glikol nanoakışkanlarının farklı yüzdeleri için belirlenen ısıl iletkenlik değerlerinin literatürdeki

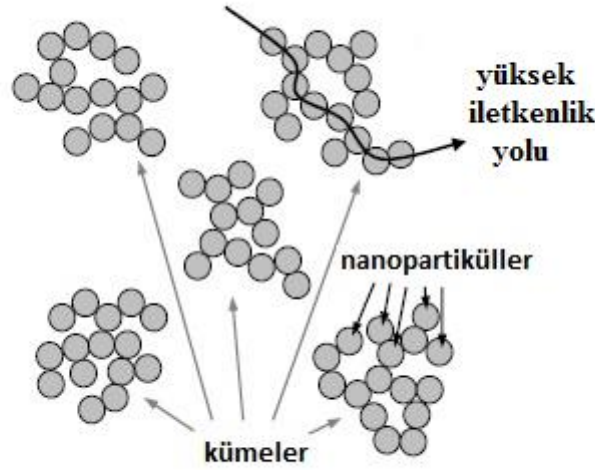
deneysel bulgularla çok iyi bir uyum içerisinde olduğu rapor edilmiştir. Aynı zamanda Brownian etkilerinin dikkate alınmadığı bir model olan Hamilton-Crosser modelinin bu nanoakışkanların ısı iletkenliklerini belirleme konusunda beklentileri karşılayacağı ortaya konmuştur.

Prasher vd. (2005) Brownian hareketinin ve Brownian hareketi tarafından tetiklenen taşınımın etkisini dikkate alındığı bir çalışma yapmıştır. Kümelenme etkisini analiz edilmediği bu çalışmada nanoakışkanların ısı iletkenliklerindeki sıra dışı artışın Brownian hareketin kaynaklandığı belirtilmiştir. Li ve Peterson (2007) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise nanopartiküllerin Brownian hareketi kaynaklı karışma etkisinin nanoakışkanların ısı iletkenliğine katkısı sayısal olarak araştırılmışlardır. Çalışmada tek bir, iki ve birçok nanopartikül için hız, basınç ve sıcaklık dağılımı araştırılmıştır. İki nanopartiküllerin yalnız partiküle göre ve aynı şekilde birçok partiküllerin ise iki partiküle göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Sonuç olarak, nanopartiküllerin Brownian hareketi tarafından oluşturulan karışma etkisinin, nanoakışkanın ısı iletkenliğini arttırmak için önemli bir etken olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, nanopartiküllerin etrafındaki akışın nanopartiküllerin makro ölçekli nesnelere gibi çözüldüğü unutulmamalıdır, ayrıca Kaymama koşulu ve partiküllerin ıslanabilirliği dikkate alınmamıştır.

Brownian hareketinin ısı iletkenliği arttırmada çok efektif olmadığını öneren çalışmalar da vardır. Örneğin Evans vd. (2006) ısı iletkenliği artışının çok küçük bir kısmının Brownian hareketine bağlı olduğunu teorik olarak göstermiştir. Bu gerçek aynı zamanda moleküler dinamik simülasyonlar tarafından da doğrulanmıştır. Sonuç olarak Brownian hareketinin nanoakışkanlarda meydana gelen ısı iletkenlik artışının ana nedeni olamayacağı sonucuna varılmıştır.

2. Nanopartiküllerin Kümelenmesi

Nanopartiküllerin kümeler oluşturduğu pek çok araştırmacı tarafından ortaya konulmuştur (Prasher vd. 2006, He vd. 2007). Evans vd. (2008) nanoakışkanlar içerisinde oluşan bu partikül kümelenmelerin, ısının daha hızlı transfer edilmesine neden olacağını belirtmiştir. Çünkü ısı, katı parçacıklarda sıvı matrise nazaran daha hızlı iletilebilmektedir. Bu olay Şekil 2.4’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 4. Yüksek iletkenlik yolu (Özerinç 2010)

Ayrıca Evans vd. (2008), nanoakışkanın ısı iletkenliği ile arayüzey ısı direncin ilişkisini de göz önünde bulundurarak aşağıdaki efektif ısı iletkenlik modelini önermiştir.

$$\frac{k_{nf}}{k_b} = \frac{(k_{cl} + 2k_b) + 2\phi_{cl}(k_{cl} - k_b)}{(k_{cl} + 2k_b) - \phi_{cl}(k_{cl} - k_b)} \quad (2.5)$$

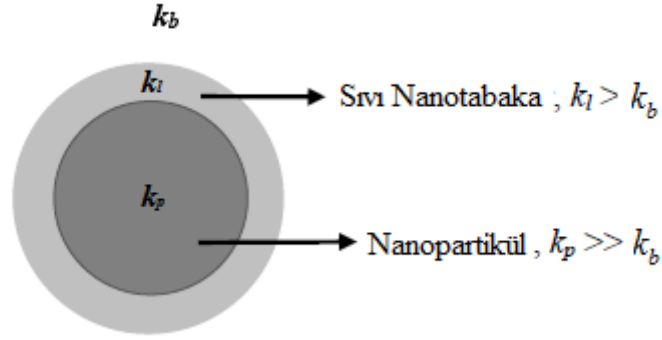
Burada k_{cl} kümelerin ısı iletkenliği ve ϕ_{cl} kümelerin partikül hacimsel oranı olarak tanımlanmıştır. Teorik çalışmaya ek olarak, Monte Carlo simülasyonu kullanılarak da nanoakışkanın efektif ısı iletkenliğini belirlemiştir. Teorik yaklaşım ve bilgisayar simülasyonu sonuçları karşılaştırıldığında ise iyi bir uyum görülmüştür. Buradan hareketle, küme

boyutundaki artışın efektif ısı iletkenliği arttırdığı söylenebilir. Fakat artan partikül oranı ile ısı iletkenlikde kümelenme etkisi ile olan artışın azaldığı belirtilmiştir. Bu noktada, nanopartiküllerin aşırı kümelenmesinin, nanoakışkanlarda istenmeyen bir durum olan kelmeye neden olabileceği de not edilmelidir. Bu nedenle maksimum ısı iletkenliği arttırmak için kümelenmenin optimum düzeyde tutulması gerekmektedir.

Kebinski vd. (2008) topladıkları deneysel veriler üzerinde, nanoakışkanların ısı iletkenliklerindeki artışa sebep olan temel mekanizmaları bulmak üzerine çalışmalar yapmıştır. Sonuç olarak Brownian hareketi ve bu hareket sonucu oluşan mikro taşınım, partiküller üzerindeki sıvı tabakalarının formasyonları ve yakın alan radyasyonu gibi etkilerin bu artışın ana sebebi olamayacağı belirtilmiştir. ısı iletkenlik artışının ana nedeni olarak partiküllerin kümelenmesi gösterilmiştir. Feng vd. (2007) nanopartikül boyutlarının etkilerini de göz önünde bulundurarak kümelenmenin ısı iletkenlik artışına etkilerini incelemiş ve bir model geliştirmiştir. Sonuç olarak küçülen partikül boyutlarında van der Waals kuvveti etkilerinin artması nedeniyle birbirlerine daha yakın kümelenme formasyonlarının gözlendiği raporlanmıştır. Ayrıca kümelenmenin ve partikül çaplarındaki bu klmenin ısı iletkenlik katsayısının artışına neden olacağı belirdilmiştir.

3. Nanopartiküller Etrafında Sıvı Katmanlaşma

Nanoakışkanlarda sıvı moleküllerinin partikül yüzeyleri etrafında katmanlı yapılar oluşturduğunu gösteren pek çok çalışma mevcuttur (Yu vd. 1999, Yu vd. 2003). Ayrıca bu nanokatmanların sıvı matrisinden daha büyük ısı iletkenliğe sahip olduğu da belirlenmiştir. Bu gözlemlerin sonucu olarak, nanoparçacıklar etrafındaki katmanlı yapıların nanoakışkanların ısı iletkenliğinin artışından sorumlu olabileceği tartışılmıştır. Bu olay Şekil 2.5’de Şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 5. Nanopartikül etrafında oluşan katmanlı yapı (Özerinç 2010)

Bu nanokatmanların ısı iletkenliği ve kalınlığı ile ilgili deneysel verilerin elde edilememesi önerilen mekanizmanın önemli bir dezavantajıdır. Yu vd. (2003) nanokatmanların kalınlığı ve ısı iletkenliği için bazı değerler varsayarak, nanoparçacıkların etrafındaki sıvı katmanın etkisini içeren bir model oluşturmuştur. Xie vd. (2005) ise nanotabanın termal iletkenliğinin de sıcaklığa bağlı olarak verildiği bir model ortaya koymuştur. Bu teorik çalışma nanoakışkanların ısı iletkenliklerine nanotabaka etkisinin görülmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalara rağmen nanokatman parametrelerinin doğru seçilmesi uygun deneysel verilerin üretilmesi ile mümkündür. Fakat bu da önerilen mekanizmanın doğruluğunu kanıtlamaya yetmeyecektir.

Lee (2007) nanokatmanın termal iletkenliği ve kalınlığının belirlenmesi ile ilgili nanopartiküller etrafında elektriksel çift tabaka formasyonu yaklaşımını önermiştir. Yapılan çalışmaya göre nanokatman kalınlığı, dielektrik sabiti, iyonik güç ve nanoakışkanın sıcaklığına bağlıdır. Nanokatmanın termal iletkenliğinin parametreleri ise, toplam yüklenmiş yüzey yoğunluğu, elektriksel çift tabakadaki iyon yoğunluğu, nanoakışkanın pH değeri, nanopartikülün ve temel akışkanın ısı iletkenliğidir. Nanokatmanın termal iletkenliği ve kalınlığının hesaplanmasında bir diğer teorik yol Tillman ve Hill (2007) tarafından önerilir. Bu çalışmada nanokatmanın termal iletkenliğinin radyal dağılımı ile nanokatmanın kalınlığı arasındaki ilişki için uygun şartlar hazırlayarak klasik ısı iletim denklemi kullanılmıştır. Nanokatman içindeki termal iletkenliğin radyal değişimi hakkındaki fonksiyon başlangıç tahmini kullanılarak belirlenmiştir. Bu tahmine göre, nanokatmanın kalınlığını ve ilgili vasayımın doğruluğunu kontrol etmek mümkün olmuştur. Aynı zamanda bazı araştırmalar da

nanoakışkanların ısı iletkenlik artışındaki temel etkinin nanokatmanlarca oluşturulmadığını savunmuşlardır. Bu çalışmalara örnek olarak Xue vd. (2004)'ün çalışması gösterilebilir.

4. Nanopartiküllerde Balistik Fonon İletimi

Katılarda, parçacıkların karakteristik boyutu göz önüne alındığında, fononların ortalama serbest yolunun bu uzunluktan daha küçük olduğu durumlarda difüzyif ısı transferinin geçerli olduğu bilinmektedir. Keblinski vd. (2002) oda sıcaklığındaki Al_2O_3 nanoparçacık fononlarının ortalama serbest yolunu 35 nm olarak tahmin etmiştir.

Geiger ve Poirier'in (1979) geliştirdiği yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen bu tahmin sonucunda 35 nm altındaki partikül çaplarında gerçekleşen ısı transferinin difüzyif değil balistik olduğu sonucuna varılabilir. Buna rağmen balistik ısı transferi fenomeninin ısı iletkenlik artışındaki etkisini henüz tam anlamıyla açıklanamayacağı belirtilmiştir. Fakat yine de çalışmada bu teorinin nanopartiküllerin birbirlerine çok yakın olduğu ve partikül boyutlarının oldukça küçük olduğu durumlarda geçerli olabileceği savunulmuştur. Ayrıca çalışma sonucunda Brownian hareketinin, partiküller arasındaki mesafeyi azaltma eğiliminde olduğundan bu teoriye destek vereceği belirtilmiştir.

Bu konu ile ilgili bir diğer çalışma Nie vd. (2008) tarafından yapılmıştır. Bahsi geçen çalışmada nanopartiküllerin temel akışkan içerisine ilavesinin, ortalama serbest yolda herhangi bir değişime neden olup olmadığı teorik olarak araştırılmıştır. Yazarlar, fononların ortalama serbest yolunda belirgin bir değişikliğin bulunduğu katman yapısının yaklaşık 1 nm'lik bir mesafe ile sınırlandırıldığını bulmuşlardır. Bunun sonucunda, böyle yüksek derecede yerel bir etkinin ısı iletkenlikteki artıştan sorumlu tutulamayacağı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, nanoparçacıkların varlığına bağlı olarak sıvı fazda fonon taşıma hızının değişimi de araştırılmış ve ilgili etkinin önemsiz olduğu bulunmuştur.

5. Yakın Alan Radyasyonu

Domingues vd. (2005), iki nanopartikül arasındaki ısı transferine yakın alan radyasyonunun etkisi üzerinde önemli bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada problem

moleküler dinamik simülasyon metodu ile incelemiş ve nanopartiküller arasındaki mesafenin partikül boyutundan küçük olduğu rapor edilmiştir. Bu durumda nanopartiküller arasında yakın alan radyasyonunun ısı iletkenliği arttırmada önemli bir etkisi olabileceği savunulmuştur. Bu etkinin 10 nm'den küçük partiküllerde önem kazanacağı ve Brownian hareketinin partiküller arası mesafenin azalmasına sebebiyet vereceğinden, bu etkinin artmasına neden olacağı belirtilmiştir.

Bu konuda diğer bir çalışma ise Ben-Abdallah (2006) tarafından yapılmıştır. Bakır-etilen glikol nanoakışkanı için gerçekleştirilen sayısal çalışmada, yakın alan etkileşiminin ısı iletkenlik katsayısı üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığı idda edilmiştir.

2.2.2. Nanoakışkanların ısı transferi

Pasif ısı transferi artırma yöntemlerinden biri olarak ele alındığında, nanopartikül ilavesi ile temel akışkanın ısı iletkenliğinden daha büyük ısı iletkenliğe sahip nanoakışkan kullanımı, termal sistemlerin performansını artırma açısından cazip bir çözümdür. Bu sebeple, yüksek ısı iletkenlikli bu yeni nesil akışkanın termal performanslarını inceleyen pek çok çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmalar nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinde, temel akışkan ve partikül tipi, hacimsel partikül yoğunluğu, partikül boyut ve şekilleri gibi çeşitli etken parametrelerin araştırılması şeklindedir.

Bu başlık altında öncü çalışmalardan biri Pak ve Cho (1998) tarafından gerçekleştirilmiştir. Türbülanslı akım rejiminde gerçekleştirilen deneylerde, ısı transfer katsayısına partikül hacimsel oranları ve Reynolds sayısını etkileri incelenmiştir. Belirli bir hacimsel partikül oranına kadar artan hacimsel oranın ısı transfer katsayısını arttırdığı gözlemlenmiştir. Eşik oran aşıldığında ise ısı transfer katsayısı azalmaya başlamıştır. Xuan ve Li (2003) laminar ve türbülanslı akım şartlarında düz bir boruda Cu-Su nanoakışkanının ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sabit ısı akısı sınır şartlarında gerçekleştirilen bu çalışma sonucunda nanopartiküllerin ısı transfer katsayısını arttırdığı ve bunun yanında ihmal edilebilir bir basınç düşümüne sebebiyet verdiği rapor edilmiştir.

Al_2O_3 -Su nanoakışkanının laminar akım rejiminde ısı transferi karakteristiklerinin deneysel olarak incelendiği bir çalışma da Wen ve Ding (2004) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda ısı transfer katsayısının hacimsel partikül yoğunluğunun artışı ile arttığı rapor edilmiştir. Araştırmacılar ısı transferindeki hacimsel oran etkisinin yüksek Reynolds sayılarında daha belirgin olduğunu da vurgulamıştır. Ding vd. (2006) CNT partikülleri ile sentezlenen su bazlı nanoakışkanlarda ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda %350 gibi çok yüksek bir maksimum ısı transferi artışı elde edilmiştir. Bu artış, nanoakışkanın ısı iletkenliğindeki artışın yanında, nanopartikül kullanımının sınır tabaka kalınlığında azalmaya sebebiyet vermesi ve rastgele partikül hareketlerine bağlanmıştır.

Yang vd. (2005) Grafit içeren nanoakışkanların ısı transferi üzerine deneysel bir çalışma ortaya koymuştur. Laminar akım rejiminde gerçekleştirilen bu çalışmada, dairesel boru içerisinde Grafit içeren nanoakışkanların ısı transfer performansları incelenmiştir. Nanopartikül ilavesinin sistemin termal performansını arttırdığı ortaya konulmuş fakat bu artışın mevcut kolerasyonlar ile tahmin edilenden çok daha az olduğu vurgulanmıştır. Bunun yanında nanopartikül ilavesi ile sistemde gözlenen basınç düşümünde büyük bir artış not edilmemiştir.

10 nm boyutlarında Al_2O_3 nanopartiküllerinin Propanal temel akışkanı içerisinde süspansiyon edilmesi ile hazırlanan nanoakışkanın ısı transferi ve reolojik özelliklerinin incelendiği bir çalışma ise Sommers ve Yerkes (2010) tarafından yürütülmüştür. Çalışma sonucunda nanoakışkan kullanımının, sistemlerin ısı performanslarını arttırdığı ortaya konmuştur. Fakat bu artışın sebebi olarak yalnızca akışkanın termofiziksel özelliklerindeki değişim gösterilmiştir ve Brownian hareketinin bu artışa bir katkı sunmadığı savunulmuştur. Ayrıca bu ısı performans artışının, partiküllerin akış içerisinde türbülans etkilerini artırması veya sınır tabaka kalınlığının azaltmasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir.

Corcione vd. (2012) CuO , Al_2O_3 ve TiO_2 nanopartiküllerinin su ve etilen glikol temel akışkanları içerisine ilavesi ile elde edilecek nanoakışkanların ısı transferi ve akış karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Sonuç olarak, artan partikül oranlarının ısı transfer katsayısında bir noktaya kadar olumlu etki göstereceği, fakat eşik değeri aşıldığında ısı transfer katsayısında ciddi düşüşler görüleceği belirtilmiştir. Tiwari vd. (2013) levha tipi ısı

değiştiricide Seryum Oksit nanopartiküllerinin su temel akışkanı içerisine süspansiyon edilmesiyle farklı hacimsel oranlarda hazırlanan nanoakışkanların, ısı transferi ve basınç düşümünün karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada hacimsel partikül oranı %0.5-%3 aralığında tutulmuştur. Basınç düşümünde önemli bir değişimin gözlenmediği bu çalışmada artan partikül hacimsel oranlarının ısı transferi katsayısını arttırdığı rapor edilmiştir. Sonuçlar iş akışkanı olarak nanoakışkan kullanılmasının ısı transferine önemli katkı sağlayacağı ve pratik uygulamalar için uygun olacağı şeklinde yorumlanmıştır.

Kalteh (2013) farklı tip nanopartiküllerin ve temel akışkanların kullanıldığı geniş kapsamlı bir çalışma ortaya koymuştur. Bu çalışmada nanopartikül olarak Elmas, Al₂O₃, CuO, Fe, Au, Ag, SiO₂ ve TiO₂, temel akışkan olarak ise Etilen glikol, motor yağı ve saf su kullanılmıştır. Nanopartiküllerin ve temel akışkanların ısı transfer katsayısı üzerine etkilerinin incelendiği bu sayısal çalışmanın sonuçları Çizelge 10'da verilmiştir. Ayrıca bu konu ile ilgili bir özet çizelgesi Azmi vd. (2016) tarafından hazırlanmıştır, bu çizelge Çizelge 2.11'de verilmiştir.

Çizelge 2. 10. Re=100'de ve %1 hacimsel oranda nanopartiküllerin saf su içerisinde basınç düşümü ve ortalama Nusselt sayıları (Kalteh, 2013)

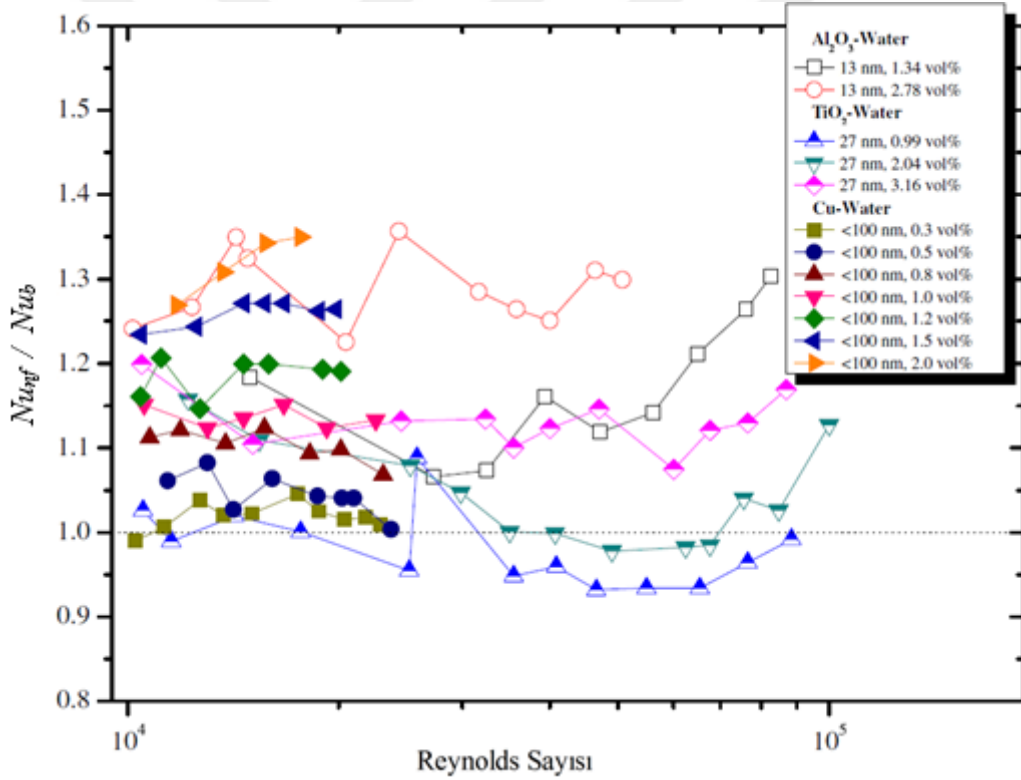
Nanopartikül	Saf Su	Al ₂ O ₃	CuO	Cu	Fe	Au	Ag	TiO ₂	SiO ₂	Elmas
ΔP	24.19	24.6	24.61	24.61	24.63	24.66	24.63	24.59	24.59	24.58
\overline{Nu}	7.92	8.42	8.23	11.65	8.81	11.04	12.07	8.12	8.00	17.35

Nanoakışkanların ısı ve kütle transferi ile ilgili özet niteliğinde bir diğer çalışma ise Pang vd. (2015) tarafından yürütülmüştür. Çalışmada ısı ve kütle transferi ile ilgili nanoakışkan literatürü incelenmiş ve bu çalışmalar çeşitli başlıklar altında özetlenmiştir. Su bazlı nanoakışkanların konvektif ısı transferi ile ilgili deneysel veriler ile oluşturulan grafik Şekil 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2. 11. Su bazlı nanoakışkanların ısı transferi özet çizelgesi (Azmi 2016)

Kaynak	Deneysel Aralıklar ve Partiküllerin Türü	Sonuçlar / Açıklamalar
Hwang vd. (2009)	Al_2O_3 (30 nm) $\phi \leq \%0.3$ $200 \leq Re \leq 1400$	Tam gelişmiş laminer aralıkta %0.3 hacim konsantrasyonunda ısı transfer katsayısında %8 artış sağlandı.
Heris vd. (2006)	Al_2O_3 (20 nm) $\phi \leq \%3.0$ CuO (50-60 nm) $\phi \leq \%3.0$ $650 \leq Re \leq 2050$	Yüksek hacimsel partikül oranlarında Al_2O_3 nanoakışkanları CuO nanoakışkanlarına göre daha büyük ısı transfer katsayısı üretti.
Eastman vd. (2001)	CuO $\phi \leq \%1.0$	Isı transfe katsayısında suya oranla %15'den fazla iyileşme gözlemlendi.
Xuan ve Li (2002)	Cu (<100 nm) $\phi \leq \%2.0$ $10000 \leq Re \leq 24000$	Nanoakışkan ile duvar sıcaklığı arasındaki sıcaklık gradyanının eğiminin azalacağı idda edildi.
Fotukian ve Nasr Esfahany (2010)	CuO (30-50 nm) $\phi \leq \%0.024$ $6000 \leq Re \leq 31000$	Suya oranla nanoakışkanın ısı transfer katsayısının %25 ve basınç düşümünü ise %20 arttırdığı belirlendi.
Kim vd. (2009)	CNT (20 nm) $\phi \leq \%3.5$ Al_2O_3 (20-50 nm) $\phi \leq \%3.0$ $800 \leq Re \leq 6500$	%3.0 hacimsel partikül yoğunluğunda Al_2O_3 nanoakışkanın ısı transfer katsayısında %20'lik bir artış oluşturduğu bildirildi.
Nguyen vd. (2007)	Al_2O_3 (36 ve 47 nm) $\phi = \%6.8$ $3000 \leq Re \leq 9000$	47 nm boyutlu parçacıklarla karşılaştırıldığında 36 nm boyutlu parçacıklar ile daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edildiği gözlenmiştir.
Williams vd. (2008)	Al_2O_3 (46 nm) $\phi \leq \%3.6$ ZrO_2 (60 nm) $\phi \leq \%0.9$ $9000 \leq Re \leq 63000$ $21 \leq T_{nf} \leq 76^\circ C$	Mevcut tek fazlı akış kolerasyonlarının nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümünü tahmin etmede kullanılabileceği sonucuna varıldı.
Pak ve Cho (1998)	Al_2O_3 (13 nm) $\phi \leq \%2.78$ TiO_2 (27 nm) $\phi \leq \%3.16$ $0^4 \leq Re \leq 10^5$	%2.78 hacimsel oranında Al_2O_3 nanoakışkanı için ısı transfer katsayısında %12 azalma gözlemlendi.
He vd. (2007)	TiO_2 (95 nm) $\phi \leq \%1.1$ $700 \leq Re \leq 6500$	Nanoakışkan konsantrasyonunu ısı transfer katsayısına etkisinin türbülanslı akımda laminar akıma göre daha fazla olduğu belirlendi.

Duangthongsuk ve Wongwises (2010)	TiO ₂ (21 nm) 0.2 < φ < %2.0 3000 < Re < 18000	Nanoakışkanların ısı transferi katsayısını %1 hacimsel orana kadar arttırdığı, bu noktadan sonra artan konsantrasyonun ısı transfer katsayısını olumsuz etkiledi belirlendi.
Yu vd. (2009)	SiC (170 nm) φ = %3.7 3300 < Re < 13000 4.6 < Pr < 7.1	Isı transfer katsayısında %50-%60 arasında bir artış gözlemlendi. Ayrıca daha az pompa gücü gerektiren SiC'ün Al ₂ O ₃ 'e oranla daha iyi bir ısı transfer akışkanı olduğu sonucuna varıldı.
Azmi (2013, 2014)	TiO ₂ (50 nm) φ ≤ %3.0 SiO ₂ (22 nm) φ ≤ %4.0 5000 < Re < 25000	Isı transfer katsayısında TiO ₂ için %1 hacimsel oranda yaklaşık %26 artış gözlenirken %3 hacimsel oranda SiO ₂ de bu oran %33 olarak belirlendi.



Şekil 2. 6. Nanoakışkanların türbülanslı akış şartlarında konvektif ısı transferi (Pang vd. 2015)

2.3. Mikrokanallar ve Mikrotüplerde Akış ve Taşınım ile Isı Transferi

Mikro boyutlu kanallar ve tüpler küçük boyutları, düşük ağırlıkları ve az miktarda iş akışkanı gerektirmeleri nedeniyle MEMS teknolojisinin vazgeçilmez bir parçası olmuşlardır. Fakat bu sistemlerde yukarıda sayılan avantajların yanı sıra küçük hidrolik çap, yüksek basınç düşümü, çift fazlı akışlarda kavitasyon ve akış analizi için kullanılacak teorilerin belirsizliği gibi dezavantajlar da bulunmaktadır. Mikrokanallarda ısı transferi üzerine çalışmalar Tuckerman ve Pease (1981) tarafından başlatılmıştır ve daha sonra ısı transferini artırma konusunda önemli bir alternatif olarak görüldüğünden bu sistemler araştırmacıların ilgisini çekmeye devam etmiştir. Mikrokanallarda gaz, sıvı, iki fazlı akışlar ve nanoakışkanların ısı transferi performansı ve bu akışların reolojik özelliklerinin araştırılmasına yönelik sayısal ve deneysel çalışmalar mevcuttur. Yapılan literatür araştırmasında mikrokanallarda ısı transferine en büyük etkinin geometrik parametreler ile yapılabileceği görülmektedir. Bu geometrik parametreler genel olarak kanal kesiti, kanal sayısı, kanal yüksekliği, kanal genişliği, kanal pürüzlülüğü, kanal içerisine yerleştirilen yüzey elemanlarından oluşmaktadır. Bu bölümde mikrokanalların konvektif ısı transferi ile ilgili önceki çalışmalar incelenmiştir (Manay 2014).

Zhou vd. (2007) mikrotüplerin ısı transferi ve akış karakteristiklerini laminar akış şartlarında deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel olarak sırasıyla 50-100 μm ve 373-1570 μm 'lik hidrolik çaplara sahip yüzeyi parlatılmış silika ve kaba paslanmaz çelik mikro boruları kullanılmıştır ve iş akışkanı olarak saf su seçilmiştir. Reynolds sayısı aralığı ise 20 ile 2400 olarak belirlenmiştir. Yüzeyi parlatılmış silika tüpler için sürtünme faktörleri konvansiyonel teori tahminleri ile iyi bir uyum içerisinde iken kaba paslanmaz çelik tüplerin sürtünme faktörleri konvansiyonel teori tahminlerinin üzerinde kalmıştır. Isı transferi açısından bakıldığında ise özellikle düşük Reynolds sayılarında, eksenel yönde Nusselt sayılarının konvansiyonel tahminlerin oldukça uzağında kaldığı belirlenmiştir.

Mikrotüplerde ısı transferi ve akış karakteristiklerinin deneysel olarak incelendiği bir başka çalışma ise Lelea vd. (2004) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Reynolds sayısı 800 ile sınırlandırılmış ve laminar akış şartlarında 0.1 mm, 0.3 mm ve 0.5 mm çaplarında mikrotüpler kullanılmıştır. Kanal malzemesi paslanmaz çelik olarak seçilmiş ve iş akışkanı olarak da saf su kullanılmıştır. Sonuç olarak tüm mikrotüpler için geleneksel veya klasik teori

yaklaşımlarının kabul edilebilir sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Yang ve Lin (2007) mikrotüplerin zorlanmış taşınım ısı transfer performanslarını deneysel olarak incelemiştir. İç çapları 123 µm ile 962 µm arasında olan altı adet paslanmaz çelik mikrotüp ile gerçekleştirilen deneylerde iş akışkanı olarak ise su kullanılmıştır. Sonuçlar, laminar ve türbülanslı akışlar için geleneksel ısı transferi korelasyonlarının mikrotüplerde tam gelişmiş ısı transfer performansını tahmin etmek için uygulanabileceğini göstermiştir. Bunu yanında akış rejimindeki geçişin 2300-3000 Reynolds aralığında olduğu da bildirilmiştir. Ayrıca ısı kaybının sırasıyla 123 µm ve 962 µm boyutunda mikrotüpler için toplam ısı girdisinin %4'ünden ve %1'inden az olduğunu gözlemlenmiştir. 123 µm'lik tüpte en düşük Reynolds sayısında, %4'lük bir ısı kaybının ısı transfer katsayısında %25'lik artışa neden olduğu bildirilmiştir.

Peng vd. (2007) 230 µm çapında cam mikrotüplerde su akışını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada Reynolds sayısı 1540-2960 aralığında tutulmuştur. Akışta laminardan türbülansa geçişin yaklaşık olarak 1700-1900 aralığında olduğu belirlenmiş ve 2500'den yüksek Reynolds sayılarında türbülanslı akımın tamamen geliştiği rapor edilmiştir. Liu vd. (2007) hidrolik çapları 242 µm, 315 µm ve 520 µm boyutlarında olan quartz mikrotüplerde zorlanmış taşınım ısı transferi üzerine deneysel bir çalışma yürütmüştür. İş akışkanı olarak deiyonize su kullanılan çalışmada Reynolds sayısı 7000 ile sınırlandırılmıştır. Çalışma sonuçlarının laminar akış şartlarında mevcut korelasyonlar ile iyi bir uyum gösterdiği raporlanmıştır. Mikrotüpler ile ilgili deneysel ve sayısal çalışmalar için bir özet çizelge aşağıda verilmiştir (Çizelge 2.12).

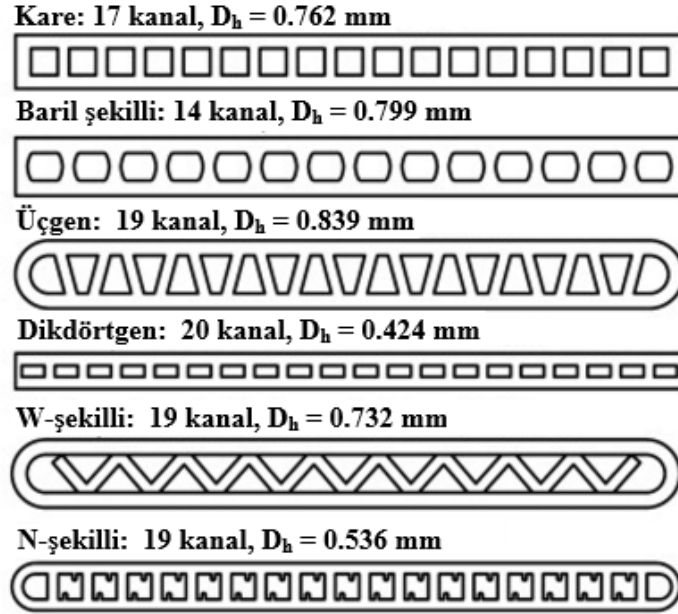
Çizelge 2. 12. Mikrotüpler için deneysel ve sayısal çalışmalar özet çizelgesi (Salman vd. 2013)

Araştırma	Çap/Akış Karakteristiği	Reynolds Sayısı	Akışkan	Bulgular
Zhou vd. (2007)	50-1570 µm / laminar	20-2400	Deiyonize su	Eksenel yönde Nusselt sayıları sonuçları konvensiyonel tahminlerin uzağında kalmıştır.
Lelea vd. (2004)	0.1-0.5 mm / laminar	800'e kadar	Saf su	Su akışı için tüm kanal çaplarında konvensiyonel veya klasik teoriler uygulanabilir.

Yang ve Lin (2007)	123-962 μm / laminer ve türbülanslı	100-10000	Su	Toplam ısı girişindeki ısı kaybı, iç çapa ve Reynolds sayı değerlerine bağlıdır.
Celata vd. (2006)	70-326 μm / laminer	300'den az	Demineralize su	126 μm 'den düşük çap değerlerinde 64/Re değerinden yukarıda sürtünme katsayısı değerleri ile karşılaşmıştır.
Peng vd. (2007)	230 μm / laminer ve türbülanslı	1540-2960	Deiyonize su	Akış karakteristiğinde laminerden türbülansa geçiş 1700-1900 Reynolds sayısındadır.
Celeta vd. (2006)	50-528 μm / laminer ve türbülanslı	50-3138	Demineralize su	Nusselt sayısı çap değerinin azalması ile azalmıştır
Sara vd. (2009)	0.20 mm / laminer	40-1400	Deiyonize su	Sürtünme faktörü Hagen-Poiseuille modeli ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Sherwood sayısı ise bu model tahminlerinden küçüktür.
Zhang ve Fu (2009)	0.531 ve 1.042mm	-	Sıvı Azot	İki fazlı akış karakteristikleri için mevcut teorik modeller yetersizdir.
Liu vd. (2007)	242, 315 ve 520 μm / laminer ve türbülanslı	100-7000	Deiyonize su	Nusselt sayısı laminer kolerasyonlar ile kabaca uyumludur.
Celeta vd. (2007)	30-254 μm / laminer	0.8-500	Helyum	Sürtünme faktörü Hagen-Poiseuille modeli tahminleri ile iyi bir uyum içerisinde olmuştur.
Qi vd. (2007)	0.531-1.931 mm	-	Hidrojen	Düşük ve orta dereceli ısı akılarında ısı transfer katsayısı kütle kalitesi ile artmıştır.
Xiong ve Chung (2010)	50 μm / laminer	40-2000	Su	Hidrolik çapın Nusselt sayısı ve sürtünme faktöründe arttırıcı veya azaltıcı etkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.
Zhang vd. (2010)	120-528 μm / laminer	10-2280	Su	Isı transferiyle, duvar-sıvı ısıl iletkenlik oranı arasında hassas bir ilişki olduğu belirlenmiştir.
Giulio ve Papla (2004)	50-150 μm / laminer	100-1700	-	Yüzey pürüzlülüğünün ısı transferi üzerine etkisi geometrik parametrelere oranla oldukça azdır. Isı transferinde en etkili parametre olarak mikrotüp şekli belirlenmiştir.

Hong ve Asako (2010)	10-100 μm / laminer	14-1829	Gaz	Mikrotüplerdeki gaz akışında duvar sıcaklığını belirlemek üzere bir koleksiyon hazırlanmıştır.
Koo ve Kleinstreuer (2008)	50 μm / laminer	20-2000	İzopropanol su ve metanol	Viskoz yayılım, akış alanındaki sürtünme katsayısı ölçümlerini büyük oranda etkilemiştir.
Lelea ve Cioabla (2010)	0.1 mm / laminer	7.2-1684	Su ve FC-70	Sürtünme katsayısı ve Poiseuille sabitinin Nusselt sayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.
Satapathy (2010)	-	-	Gaz	Boyutsuz basınç düşümünün Reynolds sayısı ve yüzey pürüzlülüğündeki artış ile arttığı belirlenmiştir.
Wang ve Wang (2007)	-	1-500	-	Duvar pürüzlülüğünün basınç düşümüne etkisi belirlenmiştir. Basınç düşümü artan yüzey pürüzlülüğü ile artmıştır.
Aziz ve Niedbalski (2011)	-	-	Gaz	Viskoz dağılım güçlenirken Nusselt sayısının minimum değerine ulaşılmıştır.

Agarwal vd. (2010) altı adet dairesel olmayan ve farklı geometride mikrokanalda ısı transfer katsayılarını belirlemek üzere deneysel bir çalışma ortaya koymuştur. Çalışmada mikrokanal hidrolik çapları 0.424 mm ile 0.939 mm arasında tutulmuş ve iş akışkanı olarak R134a kullanılmıştır. Deneylerde akışın kütleli debi aralığı ise 150 kg/m²/s ile 750 kg/m²/s belirlenmiştir. Kanallar baril şekilli, N-şekilli, W-şekilli, dikdörtgen, kare ve üçgen kesitli olarak 5 farklı geometridir (Şekil 2.7). Çalışma sonucunda, deney sonuçlarının büyük kanallar için geliştirilmiş teorik modellerin oldukça uzağında kaldığı ortaya konmuştur. Buna sebep olarak ise bu teorik modellerin mikrokanallara özgü akış fenomenlerini ve arayüz kesme davranışını dikkate almıyor olması gösterilmiştir. Ayrıca deney sonuçları ile kare, dikdörtgen kesitli ve baril şekilli kanallar için modeller geliştirilmiştir.



Şekil 2. 7. Deneysel bir çalışmada kullanılan mikrokanal geometrileri (Agarwal vd. 2010)

Morkani vd. (2009) sabit genişlikte mikrokanallarda akış ve konvektif ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Kanal yüksekliğinin 50 μm ile 500 μm arasında tutulduğu deney sisteminde iş akışkanı olarak akış hızı 0.04 ml/dk ile 240 ml/dk arasında olan musluk suyu kullanılmıştır. Akışın Reynolds sayısı ise 100 ile 5000 arasında değiştirilmiştir. Sonuçlar akış ve konvektif ısı transferi için konvansiyonel kanunlar ve kolerasyonların direk olarak uygulanabileceğini göstermiştir. Ayrıca laminar akıştan türbülanslı akışa geçişin büyük boyutlu kanallara benzer Reynolds sayılarında gözlemlendiği de rapor edilmiştir.

Shokouhmand ve Bigham (2010) sabit Reynolds sayılarındaki mikrokanalların termal ve hidrodinamik karakteristikleri üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada bu karakteristiklere Knudsen sayısı ve geometrinin etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısının Knudsen sayısı ile düştüğü rapor edilmiştir. Ek olarak giriş bölgesinde çok yüksek değerlerde olan ısı transfer ve sürtünme katsayılarının, akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş hale yaklaşması ile hızlı bir şekilde düşeceği belirtilmiştir. Ayrıca viskoz yayılımın mikrokanal karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve Knudsen sayısının artışı ile bu etkinin daha belirgin olarak gözlemlenebileceğinden bahsedilmiştir.

Mikrokanallarda ısı transferi ve akışkan akışının incelendiği bir diğer sayısal çalışma ise Sui vd. (2010) tarafından yürütülmüştür. Mikrokanallardaki akışın üç-boyutlu olarak incelendiği bu çalışmada kanal kesiti dikdörtgen olarak seçilmiş ve sabit ısı akısı sınır şartında çalışılmıştır. Simülasyonda kanalın alt yüzeyinden sabit ısı akısı uygulanırken, üst yüzey ise adyabatik olarak seçilmiştir. Çalışma sonucunda mikrokanallarda, pürüzlülüğün sonucu olarak ikincil akışkarın (Dean vorteksleri) oluşacağı ve akış boyunca yönü ve miktarı değişken olan bu ikincil akışların neden olduğu karışım etkisinin konvektif ısı transferini büyük oranda arttıracığı rapor edilmiştir. Ayrıca mikrokanallardaki basınç düşümü olumsuzluğunun, ısı transferi atışına nazaran çok küçük olduğu belirtilmiştir. Mikrokanallarda ısı transferi ve akış karakteristikleri ile geniş bir literatür bulunmaktadır. Konu ile ilgili deneysel ve sayısal çalışmaların özetlendiği bir çizelge, çizelge 2.13’de verilmiştir.

Çizelge 2. 13. Mikrokanallar için deneysel ve sayısal çalışmalar özet çizelgesi (Salman vd. 2013)

Araştırma	Çap/Akış Karakteristiği	Reynolds Sayısı	Akışkan	Bulgular
Cheng Wang vd. (2007)	25 µm / laminar	-	NaCl ve Seyreltilmiş Gliserol	Mikrokanallarda iki fazlı akışın benzersiz viskozite problemlerini çözmek için bir metod geliştirilmiştir.
Agarwal vd. (2010)	0.424-0.939 mm / laminar	-	R134a	Yatay dairesel olmayan mikro kanallardaki soğutucu R134a'nın yoğunlaşması sırasında ısı aktarımı için korelasyonlar geliştirilmiştir.
Roland vd. (2006)	700-200 µm / laminar ve türbülanslı	200-8000	Demineralize Su	Mikro ölçekte laminar akış için Nusselt sayısında bir azalma meydana geldiği bildirilmiştir.
Wu ve Cheng (2003)	L/D = 285.41-451.40 / laminar	0-100	Su	Reynolds sayısındaki artış ile Nusselt sayısının lineere yakın bir davranışla arttığı belirlenmiştir.
Park ve Punch (2008)	106-307 µm / laminar	69-800	Deiyonize Su	Kullanılan parametre sınırları içerisinde kalmak kaydı ile konvansiyonel tam gelişmiş akış teorilerinin kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir.

Quam vd. (2010)	127-173 μm / laminer	240	Su	Mikrokanallarda ısı transfer katsayısının artan kütle akışı ile arttığı ve hidrolik çapla azaldığı ortaya konmuştur.
Lee vd. (2005)	106-307 μm / laminer	300-3500	Deiyonize Su	Mikrokanllarda ısı transfer katsayısının debiye bağlı olarak azalan kanal boyutu ile arttığı belirlenmiştir.
Harirchian ve Garimella (2008)	Genişlik 100-5850 μm ve Derinlik 400 μm / laminar	-	FC-77	Basınç düşümü ile hem kanal boyutu hemde kütle akışı arasında güçlü bir ilişki gözlenmiştir
Ergu vd. (2009)	Width=3.70 mm Height=0.107 mm Length=35mm / laminer	100-845	Deiyonize Su	Mikrokanallarda sürtünme katsayısı hesapları için klasik lamner akış teorilerinin kullanılabilceği belirtilmiştir.
Owhaib vd. (2004)	0.862-1.7 mm / laminar	-	R134a	Daha küçük çaplı kanallarda ısı transfer katsayısının daha yüksek olduğu ve sistem basıncındaki artışın ısı transfer performansını arttırdığı gözlenmiştir.
Chui vd. (2011)	W/H=1.67-14.29 / laminer	50-1000	Su	Isı transfer katsayısındaki artışın yüksek en/boy oranına sahip mikrokanllarda daha belirgin olduğu rapor edilmiştir.
Shen vd. (2006)	W=300 μm H=800 μm / laminer	162-1257	Deiyonize Su	Nusselt sayısının konvansiyonel teoriler ile tahmin edilen değerlerden düşük değerlerde kaldığı belirlenmiştir ve buna sebep olarak kesitin en/boy oranı ve yüzey pürüzlülüğü gösterilmiştir.
Celata vd. (2010)	480 μm / laminar	-	FC-72	Isı transfer katsayısının ısı akısından bağımsızlığına yönelik sonuçlar alınmıştır.
Megahed (2011)	248 μm / laminar	-	FC-72	Kütle akışının artışı ile kararsızlığın azaldığını gösteren sonuçlar edle edilmiştir.

Diaz ve Schmidt (2007)	H=0.3 mm W=12.7mm / laminer	-	Su ve Etanol	Alt ısı akısının artması ile ısı transfer katsayısında bir artış olduğu belirlenmiştir.
Chen vd. (2009)	100 - 250 μm / laminer	200-1700	Su	Kanal boyutların azaltıldığında yoğuşmada ısı transferinde belirgin bir artış elde edilmiştir.
Wojtan vd. (2006)	0.5 ve 0.8 mm / laminer	-	R134a ve R245fa	Isı transfer katsayısı ile kütleli akış, ısıtılmış uzunluk ve kanal boyutları arasında kuvvetli bir ilişki belirlenmiştir.
Asthana vd. (2011)	100 μm / laminer	-	Su/Yağ	Sıcaklıkdaki değişimden büyük oranda etkilenen basınç kaybındaki artışın, ısı transferini artırdığı belirlenmiştir.
Wang ve Cheng (2008)	155 μm / laminer	-	Deiyonize Su	Tek bir mikrokanal içerisindeki kararlı hal kaynama ile ısı transferi buhar kalitesi ile ilişkilendirilmiştir.
Wu vd. (2010)	90.6 μm / laminer	300-900	Su/Metanol	Mikrokanalın kesit şekli ile yoğuşma akışındaki düzensizlikler arasında ilişki kurulmuştur.
Zhang vd. (2010)	W=61 μm H=272 μm L=15mm / laminer	-	Deiyonize Su	Mikrokanallı ısı değiştiricisinde, modellerde elde edilen basınç düşümü verilerinin deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir.
Kohl vd. (2005)	25-100 μm / laminer ve türbülanslı	-	Su ve Hava	Sonuçlar mikrokanallardaki sürtünme katsayılarının, standart boyutlara sahip kanal verileri kullanılarak çıkarılabileceğini göstermiştir.
Tang vd. (2007)	52-300 μm / laminer	3-6300	Azot ve Helyum	Mikrokanallardaki yüzölçümlerinin sürtünme katsayısını doğrudan etkileyeceği belirtilmiştir.
Mokrani vd. (2009)	1 ila 100 μm / laminer ve Turbulent	100-5000	Su	50 ila 500 μm arasında kanal yüksekliğine sahip mikrokanallarda, Konvansiyonel kanunlar ve kolerasyonların direkt olarak uygulanabilirliği ortaya konmuştur.

Berstch vd. (2009)	1.09 ve 0.54 mm	-	R134a ve R245fa	Tek fazlı akış için R134a ve R245fa akışkanlarının ısı transfer katsayıları karşılaştırılmıştır.
Ngo vd. (2007)	1.09 mm / laminer	250-2500	CO ₂	Mikrokanallı ısı değiştiricilerinde basınç düşüm katsayısı analizi yapılmış ve S-şekilli kanatların zikzak kanatlara göre 4-5 kat daha az basınç düşümüne neden olduğu belirlenmiştir.
Fang vd. (2010)	100-300 µm / laminer	-	Su	Küçük kanallar, yüksek ortalama ısı akısına sahip olmaları sebebiyle daha elverişli olarak nitelendirilmiştir.
Bogojevic vd. (2011)	194 µm / laminer	82	Su	Kaynama başlangıcının metastabil homojen olmayan akış dağılımına neden olduğu gözlenmiştir.
Hernando vd. (2009)	100-200 µm / laminer	10-5000	Deiyonize Su	Plaka ısı iletim direnci, mikrokanallı ısı değiştirici performansı için büyük bir kısıttır. Plaka kalınlığı ve plaka malzemesi, mikrokanallı ısı değiştirici tasarımında kritik parametreler olarak belirlenmiştir.
Wu vd. (2011)	L/D=50-150 / laminer	-	R134a, R123, R245fa, R236fa, Azot ve Su	Su verilerinin %94'ünün ve su harici verilerin %97'sinin tahminin için %30 hata oranına sahip bir metot ortaya konmuştur.
Mlcak vd. (2008)	85.6 µm / laminer	50-400	Su	Hidrolik giriş uzunluğunun artması ile sürtünme katsayısında lineer bir artış gözlenmiştir.
Chen vd. (2009)	40-158 µm / laminer	30-500	Deiyonize Su	Üçgen kesitli mikrokanallı ısı değiştirici, en yüksek ısı transfer performansı gösteren ısı değiştirici olmuştur. Trapez kesitli ısı değiştirici ise üçgen kesitliden düşük fakat dikdörtgen kesitliden yüksek performans göstermiştir.
Zhu ve Liao (2006)	- / laminer	-	Gaz	Dikdörtgen ve üçgen kesitli mikrokanallarda Nusselt sayısı aynı termal sınır koşullara sahip makrokanallara göre daha düşük değerlerdedir

Ji vd. (2004)	$L=1 - 100 \mu\text{m} /$ laminer	0.001-100	Gaz	Ortalama Poiseuille sayısı yalnızca pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla değil aynı zamanda pürüzlülük elemanları arasındaki mesafenin azalması ile de artmıştır.
Sui vd. (2010)	$1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$	100-800	Su	Akıştaki vortekslerin artması akışın yönünün değişmesine ve akışta karışma etkisinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu sebeple dalgalı mikrokanalların termal performansı düz mikrokanallardan daha iyi olmuştur.
Muhammad vd. (2010)	$H=300 \mu\text{m}$ $W=100-250 \mu\text{m}$	1000-3000	FC-70, Helyum ve Su	Yüksek Reynolds sayılarında, iş akışkanı olarak su kullanımı, FC-70 ve Helyum kullanımına oranla daha iyi ısı performans elde edilmesini sağlamıştır.
Niazmand vd. (2008)	$W/H=25-2 /$ laminer	10-200	Gaz	Hız profilinin tamamen gelişmiş olmaması ve sıcaklık sıçramaları nedeniyle, giriş bölgesinde ısı transferi ve sürtünme katsayısında büyük bir düşüş gözlenmiştir.
Khadem vd. (2009)	$L/H=20$ laminar	-	Gaz	Yüksek bağıl pürüzlülüklerde akışın Nusselt sayısı, pürüzlülüğün büyük oranda erkilenmiştir.
Kosar (2010)	$H=200 \mu\text{m}$ $W=200 \mu\text{m} /$ laminer	50-2000	Su	Düşük ısı iletkenlikte akışın Nusselt sayısında düşük olduğu gözlenmiştir.

2.4. Mikrokanallarda Nanoakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü

Teknolojik gelişmeler ile birlikte tasarım ve imalat minyatürleşme yönünde atılan bir eğilim olduğu açıktır. Son yıllardaki çalışmaların hedefi ise bu minyatürleşme eğilimi sonucu ortaya çıkan ürünlerin yüksek soğutma yüklerini karşılayabilecek ısı alıcıların geliştirilmesi yönündedir. Bu pencereden bakıldığında, az yer kaplamaları ve yüksek yüzey alanı – hacim oranları gibi özellikleri ile mini ve mikro kanallar kuşkusuz etkili bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kanallar içerisinde termal ve reolojik özellikleri geleneksel akışkanlara nazaran daha üst seviyede olan nanoakışkanların kullanımı ise sistemin termal performansını bir miktar

daha ileri taşıyacaktır. Ayrıca mikrokanalların düşük miktarlarda iş akışkanı gerektirmesi de geleneksel akışkanlara göre nispeten pahalı olan nanoakışkanların kullanımını destekleyen niteliktedir. Literatür incelendiğinde çok düşük hacimsel oranlarda nanoakışkanların kullanımı dahi mikrokanallardaki ısı transferinde önemli artışlar elde edilmesi ile sonuçlanmıştır. Son yıllarda mikrokanal ve nanoakışkan etken çiftinin ısı transfer performansı üzerine pek çok çalışma ortaya konmuştur.

Deneysel çalışmalarda sıklıkla belirli şartlardaki maksimum ısı transferi ve basınç düşümü değerleri, optimum çalışma koşulları ve/veya bu koşulları etkileyen parametreler (Hacimsel oran, partikül türü, şekli ve boyutu, temel akışkan türü, Reynolds sayısı, kesit geometrisi, hidrolik çap vb.) araştırılmıştır. Bu konuda önemli deneysel çalışmalardan biri Chein ve Chuang (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı hacimsel oranlarda CuO-Su nanoakışkanının mikrokanallı bir ısı değiştiricide ısı transferi ve basınç düşümü incelenmiştir. Çalışma sonucunda hacimsel oran ile basınç düşümü ve ısı transfer atışı arasında ilişki kurulmuştur. Sayısal çalışmalar noktasından bakıldığında ise bu konu ile ilgili iki farklı yaklaşımla karşılaşılmıştır. Bunlardan ilki tek fazlı akış yaklaşımı (homojen), diğeri ise iki fazlı akış yaklaşımıdır (heterojen). Literatürde bu iki temel yaklaşımın ile gerçekleştirilmiş sayısal çalışmaların adedi gün geçtikçe artmaktadır. Nanoakışkan ve Mikrokanal etken çiftinin ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri ile ilgili bir özet çizelgesi aşağıda verilmiştir (Çizelge 2.14).

Çizelge 2. 14. Nanoakışkan ve Mikrokanal etken çiftinin ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri özet tablosu (Hussien vd. 2016)

Yazar	Akış Tipi / Kanal Şekli	Nanoakışkan / Partikül Boyutu	Hacimsel Oran (%)	Boyutlar	Bulgular
Chein ve Chuang (2007)	10, 15 ve 20 mL/dk / Mikrokanallı ısı değiştirici	CuO-Su / 80 nm	0.2-0.4	$D_h=158 \mu\text{m}$	Basınç düşümünde ufak bir artışa karşılık ısı transferinde iyileşme elde edilmiştir.

Lee ve Mudawar (2007)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallar	Al ₂ O ₃ -Su / 36 nm	1 ve 2	W=215 µm H=821 µm D _h =341 µm	Nanoakışkanın hacimsel oranındaki artış, özellikle giriş bölgesinde ısı transferi ve basınç düşümünü arttırmıştır.
Wu vd. (2009)	Laminer / Trapez mikrokanallar	Al ₂ O ₃ -Su / 56 nm	0.15 ve 0.26	D _h =194.5 µm	Yüksek hacimsel oranlarda nanoakışkan kullanımı ilave bir basınç düşümüne neden olmadan ısı transfer katsayısını arttırmıştır.
Jung vd. (2009)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallar	Al ₂ O ₃ -Su ve Al ₂ O ₃ -Su+EG / 170 nm	0.6-1.8	100x100 µm ² 50x100 µm ² 50x100 µm ²	%1.8 hacimsel oranda ve 50x50 µm ² boyutlarında, büyük bir sürtünme kaybı gözlenmeksizin, ısı transfer katsayısındaki maksimum artış %32 olarak belirlenmiştir.
Liu ve Yu (2011)	Laminer, geçiş ve türbülanslı / Dairesel mikrokanal	Al ₂ O ₃ -Su / 40 nm	1-5	D _h =1.09 mm	Isı transferinde en büyük iyileşme laminar akışta gözlenmiştir. Hacimsel partikül oranı arttıkça taşınım ısı transfer katsayısı artmıştır.
Ho vd. (2010)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değiştirici	Al ₂ O ₃ -Su / 33 nm	1 ve 2	W=215 µm H=821 µm	Sürtünme katsayısında bir miktar artış olsa da ısı transferinde iyileşme elde edilmiştir.
Vafaei ve Wen (2012)	Laminer / Dairesel mikrokanal	Al ₂ O ₃ -Deiyonize Su / 25 nm	1, 3, 5 ve 7	D _h =510 µm	Yüksek debi değerlerinde, ısı transfer katsayısında %40'a varan artış gözlenmiştir.
Kalteh vd. (2012)	Laminer / Mikrokanallı ısı değiştirici	Al ₂ O ₃ -Deiyonize Su / 40 nm	0.1 ve 0.2	W=28.1 mm H=580 µm	İki fazlı akış modellerinin, homojen akış modellerine göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

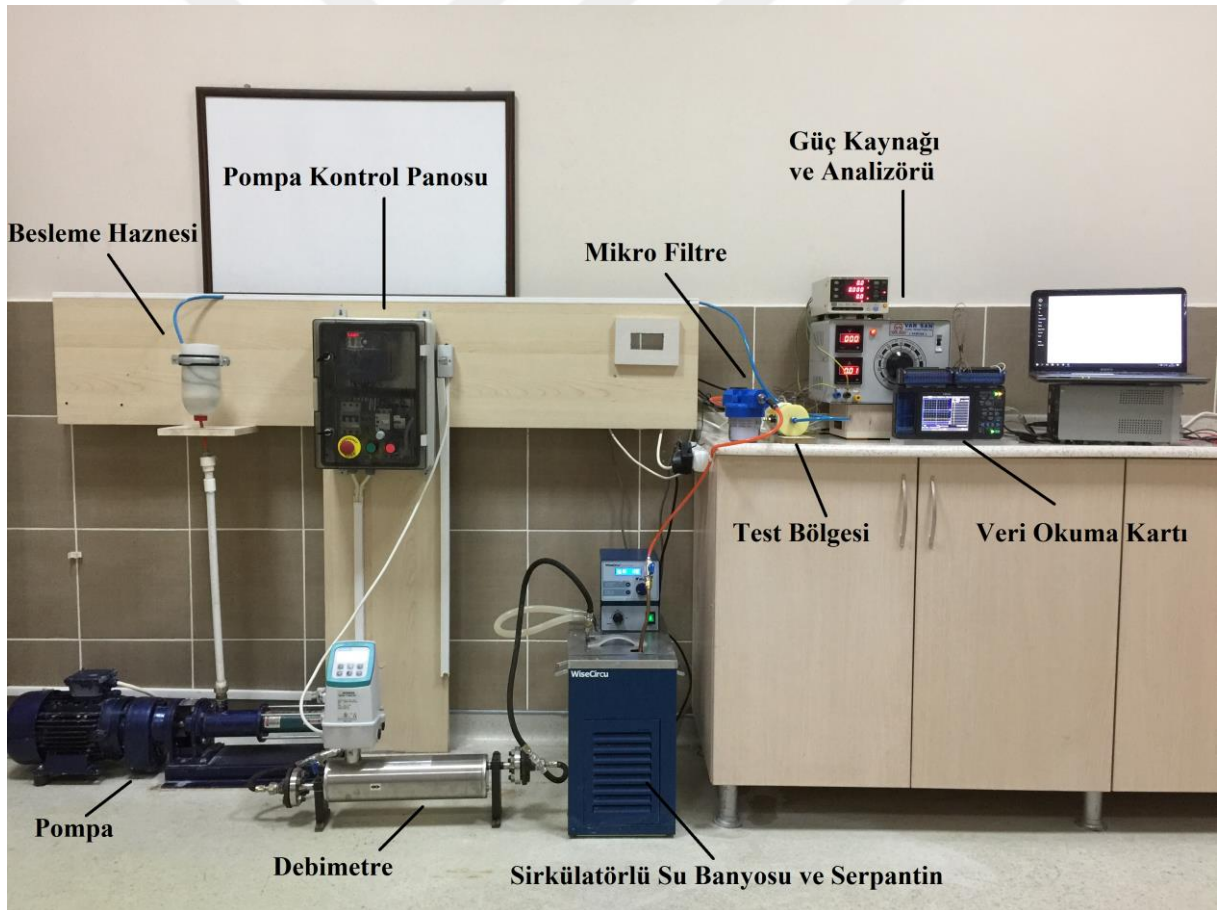
Nitiapirik vd. (2013)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değiştirici	TiO ₂ -Su	0.5, 1 ve 2	W=500 mm H=800 µm	En iyi ısı trasfer sonuçları maksimum hacimsel oran ve minimum ısı akısı değerlerinde elde edilmiştir.
Ho vd. (2014)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değiştirici	Al ₂ O ₃ -Su / 33 nm	2-10	W=1 mm H=1.5 mm D _h =1.2 mm	Isı transfer etkinliğinin, akışkan hacimsel partikül oranına bağlı olduğu belirlenmiştir.
Jang ve Choi (2006)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değiştirici	Cu-Su ve Elmas-Su / 6 nm ve 2 nm	1	H=350 µm	Isıl dirençte azalma ve bunun yanında ısı transfer performansında yaklaşık %10 artış gözlenmiştir.
Koo ve Kleinstreuer (2005)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değiştirici	CuO-Su, CuO-EG / 20 nm	1-4	H=50 µm W=300 µm	Nanopartikül ilavesinin, mikrokanallı ısı alıcının ısı performansını arttırdığı ortaya konmuştur.
Chein ve Huang (2005)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değiştirici	Cu-Su	0.3, 1, 2	H=100 µm W=300 µm H=57 µm W=365 µm	Nanoakışkanların yüksek ısıl iletkenlik değerleri sebebiyle, ısı transferinde artış gözlenmiş ve düşük hacimsel oranların fazladan bir basınç düşümüne neden olmadığı rapor edilmiştir.
Li ve Kleinstreuer (2008)	Laminer / Trapez kesitli mikrokanal	Cu-Su / 28.6 nm	1 ve 4	D _h =155.6 µm	Artan hacimsel partikül oranının, ısı transfer performansını arttırdığı ve fazladan basınç düşümüne sebebiyet verdiği belirlenmiştir.
Mohammed vd. (2011)	Laminer / Üçgen kesitli mikrokanallı ısı değiştirici	Al ₂ O ₃ , Ag, CuO, Elmas, SiO ₂ , TiO ₂ -Su	2	D _h =230 µm	Maksimum ısı trasferi ve minimum basınç düşümü değerleri Elmas ve Ag partikülleri ile elde edilmiştir.

Chen ve Ding (2011)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değiştirici	Al ₂ O ₃ -Su / 33 nm	1 ve 2	H=283 µm W=800 µm	Nanoakışkanın hacimsel partikül oranının artırılması ile ısı transfer performansında artış elde edilmiştir.
Hung vd. (2012)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değiştirici	Al ₂ O ₃ , CuO, Ag, Cu, Elmas-Su, EG, Motor Yağı	0.5-5	H=56 µm W=900 µm	Al ₂ O ₃ -Su ve Elmas-Su nanoakışkanları için suya göre maksimum ısı transfer artışı %21.6 olarak belirlenmiştir.
Salman vd. (2012)	Laminer / Dairesel mikrokanal	Al ₂ O ₃ , CuO, SiO ₂ , ZnO-EG / 25-85 nm	1-4	D _h =50 µm	Partikül boyutunun düşüşü ve hacimsel oranın artışı ile Nusselt sayısı, hız, duvar kayma gerilmesi ve basınç düşümü değerlerinde artış sağlanmıştır.
Ijam vd. (2012)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değiştirici	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ -Su	0.8-4	H=0.5 mm W=2 mm	%4 hacimsel partikül oranında nanoakışkan kullanımı ısı transferinde %11 artışa sebebiyet vermiş fakat basınç düşümünde artırmıştır.
Sohel vd. (2013a)	Türbülanslı / Minikanal ve mikrokanal	Al ₂ O ₃ ve Cu-Su ve EG	2-6	D _h =20-600 µm	Artan hacimsel oranlar mikrokanallarda entropi üretiminin azalmasına neden olmuştur. Mikrokanallarda nanoakışkan kullanımı, su kullanımına oranla daha az entropi üretimine sebebiyet vermiştir.
Sohel vd. (2013b)	Laminer / Dairesel mikrokanallı ısı değiştirici	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , CuO-Su	0.5-4	D _h =400 µm	Hacimsel partikül oranındaki artışın ısı transferinde belirgin bir iyileşmeye neden olacağı bildirilmiş ayrıca en yüksek iyileşme %13.15 ile %4'lük CuO nanoakışkanında gözlenmiştir.

Minea (2013)	Lamier / Dairesel mikrokanal	Al ₂ O ₃ -Su / 24 nm	1-4	L=0.8-1.4 m	Duvar ısı akısının Reynolds sayısı ve hacimsel partikül oranındaki artışla arttığı belirlenmiştir.
Hassan vd. (2013)	Lamier / Dairesel minikanal ve mikrokanal	Al ₂ O ₃ -Su	0.02-0.14	D _h =50 μm D _h =3 mm	Kanal boyutlarındaki küçülmenin, akışta sürtünmeyi ve ısıl tersinmezlikleri arttırdığı rapor edilmiştir.
Hatami ve Ganji (2014)	Laminer / Dikdörtgen mikrokanallı ısı değıştirici	Cu-Su / 1, 5, 25 nm	0-0.06	H=10-1000 W=100-1000 (μm)	Nusselt sayısının, kanal en boy oranı ve partikül boyutu ile birlikte arttığı rapor edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, SiO₂-su nanoakışkanlarının dairesel mikrokanalda karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Kullanılan nanoakışkanların sentezlenmesinde iki adım metodu kullanılmıştır. Nanopartiküller kuru toz olarak satın alınmıştır. İstenilen hacimsel oranlarda nanoakışkan eldesi için yapılan hesaplamalar sonucu nanopartiküllerin kütlesi hassas terazide belirlenmiş ve saf su içerisine süspansiyon edilmiştir. Karışım ultrasonik homojenizatörde belli sürelerde bekletilmiştir. Daha sonra, hazırlanan nanoakışkanın farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik ve viskozite ölçümleri yapılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan deney düzeneği Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Deney düzeneği akış sirkülasyonu ünitesi, test bölgesi ve veri toplama bölümlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3. 1. Mikrokanal deney düzeneği

Düzenekte iş akışkanını akışkan besleme haznesine doldurulmaktadır. Akışkan buradan pozitif yer değiştirmeli ve granüler akışlara uygun kendinden inventörlü pompa ile debimetreye basılmaktadır. Debi ölçümü alındıktan sonra akışkan, deney için belirlenen giriş sıcaklığı değerine ayarlanan su banyosu içerisindeki serpantine gönderilmektedir. İstenilen sıcaklıkta su banyosundan çıkan akışkan filtrasyon işlemine tabi tutulduktan sonra test bölgesine iletilir. Test bölgesinde veri okuma kartına bağlı ısı çiftleriyle giriş, çıkış ve yüzey sıcaklıkları ölçülmektedir. Veriler eşzamanlı olarak bilgisayara kaydedilmektedir. Test bölgesinde sabit ısı akışı şartları güç kaynağı tarafından beslenen şerit ısıtıcı tel kullanılarak oluşturulmaktadır.

Deneyler nanoakışkanların hacimsel partikül yüzdesinin değişiminin karma taşınım ile ısı transferi karakteristiklerine etkisini gözlemlemek amacıyla farklı hacimsel yüzdelerde (0, 0.002 ve 0.004) gerçekleştirilmiştir. Düzenekte karma taşınım ile ısı transferini sağlamak amacıyla Reynolds sayısı 5–55 aralığında tutulmuştur. Ayrıca test bölgesi yatay ile 0, 30, 60 ve 90° açı yapacak şekilde konumlandırılmış ve karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir.

Deneyler önce saf su ile sonra farklı hacimsel partikül oranlardaki SiO₂-su süspansiyonları ile yapılmıştır. Öncelikle test bölgesi yatayla yapması gereken açığa getirilir. Sisteme güç verilmeden önce akışkan besleme tankına doldurularak, pompa çalıştırılır. Kütleli debimetre okumaları kontrol edilerek, istenilen debi değerine ulaşılır ve bundan sonra sisteme güç kaynağı vasıtasıyla ısı enerjisi verilir. Güç kaynağındaki dalgalanmaları önlemek amacıyla sistemde güç analizörü kullanılmaktadır. Veri okuma kartından alınan sıcaklık değerleri takip edilerek sistemin kararlı hale gelmesi beklenir. Sistem kararlı hale ulaştınca veriler kaydedilir. Bu işlemler akış şartları diğer bir debi değerine ayarlanarak tekrar edilir.

Bu bölümde nanoakışkan hazırlanmasında ve deney sisteminde kullanılan materyaller detaylı bir biçimde sunulmuştur. Ayrıca nanoakışkanın hazırlanması ve karakterizasyonu ayrıntılı şekilde verilmiştir.

3.1. Deneysel Materyal

3.1.1. Hassas terazi

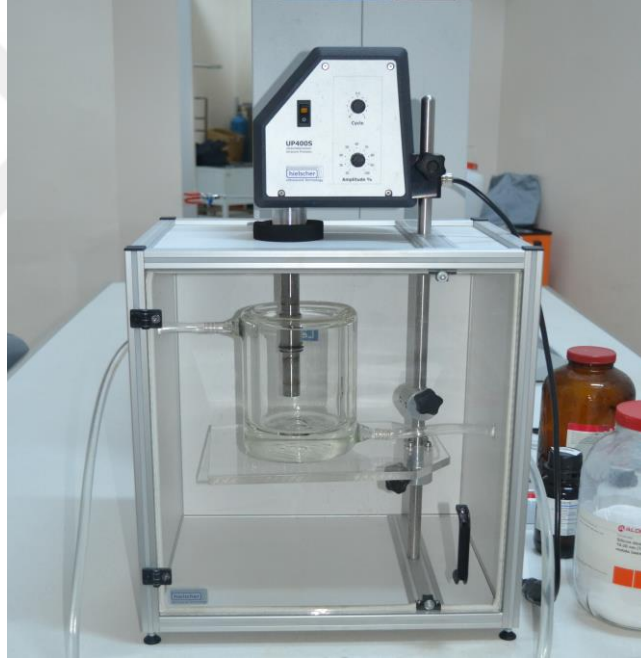
Nanoakışkan hazırlama işlemi partikül hacimsel konsantrasyonunun belirlenmesi ve ilgili nanopartikül kütlelerinin ölçülmesi ile başlar. Bu işlem için AXIS marka 400 g kapasiteli ve 0.0001g hassasiyetli hassas terazi kullanılmıştır (Şekil 3.2). Şekilde görüldüğü gibi terazi dış etkilere karşı yüksek derecede korunaklıdır. Bu nedenle çok doğru ve hassas ölçümler alınabilmektedir.



Şekil 3. 2. Hassas terazi (www.axis.pl, 01.11.2016)

3.1.2. Ultrasonik homojenizatör

İki adım metoduna göre hazırlanan nanoakışkanlarda, nanopartiküllerim temel akışkana ilavesi sonrasında bir karıştırma ve/veya dağıtma (homojenleştirme) işlemi uygulandığından bahsetmiştik. Nanoakışkanların karalı (stabil), çökme eğiliminde olmayan (durabil) yapıda olmalarını sağlayan bu karıştırma, dağıtma işlemi Hielscher marka UP400S model ultrasonik homojenizatör ile yapılmıştır (Şekil 3.3). Ayrıca Ultrasonik homojenizasyon yöntemi kullanılarak nanoakışkan içerisindeki topaklanmanın en aza indirgenmesi hedeflenmiştir. Cihaz 400W ve 24 kHz de çalışmaktadır ve 4-4000 ml aralığında işlem kapasitesine sahiptir. Hazırlanan nanoakışkanlarda sıcaklık artışının önüne geçmek için sisteme entegre bir soğutma hattı da kullanılmıştır.



Şekil 3. 3. Ultrasonik homojenizatör

3.1.3. Viskozimetre

Hazırlanan nanoakışkanların önemli termofiziksel özelliklerinden olan dinamik viskozite değerinin belirlenmesinde vibro tip viskozimetre kullanılmıştır. Vibro viskozimetreler numune içerisine daldırılan iki adet ince sensör plakasının hareketlerinin yorumlanması ve işlenmesi temeline dayanmaktadır. Sensör plakalar numune içerisinde sabit bir frekansta hareket ettirilir. Bu hareket için gerekli olan enerji akışkanın viskozitesi ile orantılıdır. Cihaz bu orantıyı kullanarak sonuçları sunmaktadır. A&D Marka SV-10 model vibro viskozimetre kullanılarak gerçekleştirilen viskozite verileri bilgisayar ortamına kaydedilmiştir (Şekil 3.4). Ölçümlerde kullanılan numune miktarı yaklaşık olarak 50 ml'dir. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklıkla değişimini gözlemleyebilmek amacıyla çeşitli sıcaklıklarda ölçümler almak gerekmektedir. Bu nedenle WiseCirsu marka bir su banyosu sisteme entegre çalıştırılmıştır. Su banyosu yardımı ile numune kabı istenilen sıcaklığa ayarlanabilmektedir.



Şekil 3. 4. Viskozimetre

3.1.4. Isıl iletkenlik ölçer

Nanoakışkanlar ve saf su için ısıl iletkenlik ölçümleri Linseis marka THB-100 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5). Sonuçlar cihaz yazılımı vasıtası ile bilgisayar ortamına alınmıştır. Bahsi geçen cihaz katı, sıvı, toz ve hamur tipi malzemelerde ölçüm yapabilmektedir. Bu sebeple nanoakışkanlar için kullanımı uygundur. Cihaz ölçüm tekniği geçici ısıl köprüler (transient hot bridge) yöntemine dayanmaktadır. Bu tekniğin detayları Hammerschmidt ve Meier (2006)'da verilmiştir. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Ölçümler yaklaşık 100 ml numuneler üzerinde su banyosu kontrolü ile farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 5. Isıl iletkenlik ölçer

Çizelge 3. 1. THB-100 teknik özellikler tablosu

Ölçüm Aralıkları		Ölçüm Belirsizlikleri	
Termal İletkenlik	0.01-100 W/(mK)	Termal İletkenlik	%2'den daha iyi
Termal Yayılım	0.05-10 mm ² /s	Termal Yayılım	%5'ten daha iyi
Isı Kapasitesi	100-5000 kJ/(m ³ K)	Isı Kapasitesi	%5'ten daha iyi

Sıcaklık		Numune boyutu	
Sensör	-50-200°C 100-600°C	Numune Ebatları	1 mm-limitsiz
Sensör tipi	Kapton ya da izole seramik sensör	Numune	Katı, Sıvı, Jel, Toz
Ölçüm sürekliliği		Numune sıcaklığı	-100-600°C
Tüm Numuneler	1-600 s		

3.1.5. Akışkan besleme haznesi

Düzenekte kullanılan akışkan sistem içerisinde bu hazneden aktarılmaktadır. Haznenin hacmi yaklaşık olarak 1 L'dir. Pompa bu hazneden aldığı akışkan vasıtasıyla sistemdeki havanın tahliyesini sağlamaktadır. Sistemin havası alındıktan sonra hazne ile pompanın bağlantısı kesilmektedir. Haznenin resmi Şekil 3.6 'da verilmiştir.



Şekil 3. 6. Akışkan besleme haznesi

3.1.6. Pompa

Deney sisteminde akış pozitif yer değiştirmeli, indikatörlü ve frekans kontrollü pompa ile sağlanmıştır (şekil 3.7). Bu pompa sisteme atımsız ve sürekli akış sağlamaktadır ve nanoakışkan stabilitesine zarar vermeyeceği için literatürde kullanılan dişli pompalardan daha etkili olacağı düşünölmektedir. Pompanın teknik özellikleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Sistemin debisi pompanın kontrol ünitesi üzerinden frekans kontrolü sayesinde manuel olarak değiştirilebilmektedir.



şekil 3. 7. Pompa

- Değişken hızlıdır.
- Maksimum akışkan sıcaklığı: 120°C
- Maksimum ortam sıcaklığı: 50°C
- Maksimum alışma basıncı: 12 bar
- Dişli bağlantı: 3/4" giriş, 1/2" ıkış bağlantı apı
- Motor koruması: IP41 (Motora koruması mevcuttur harici bir korumaya gerek yoktur.)

3.1.7. Debimetre

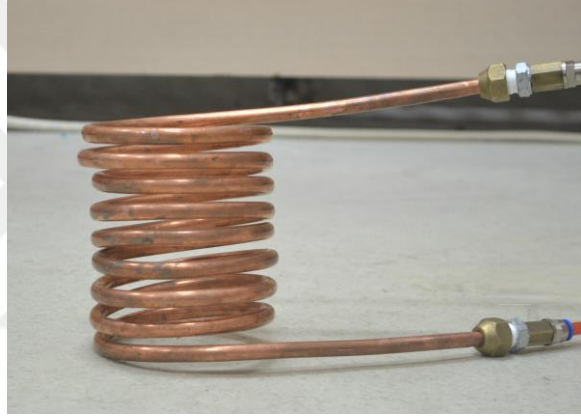
Deney parametrelerinden biri olan Reynolds sayısının istenilen değere getirilmesi akışkanın hız değerinin değiştirilmesi ile mümkündür. Akışkanın debi değeri ölçüldüğünde ilgili eşitlikler vasıtası ile hız değeri hesaplanabilir ve bu hız değeri kullanılarak da akışın hangi Reynolds sayısında olduğu belirlenmiş olur. Akışkanın debi ölçümü için pompa çıkışında Siemens marka Strans FC-MASS6000 model kütleli debimetre kullanılmıştır (Şekil 3.8). Dönel eleman içermeyen bu tip debimetrelerin kullanımı ile partikül çökmesi gibi stabilizasyon bozukluklarının önüne geçilebilir.



Şekil 3. 8. Debimetre (w3.siemens.com, 01.11.2016)

3.1.8. Serpantin ve sirkülatörlü su banyosu

Sistemde karma taşınım etkilerinin incelenecek olması nedeniyle düşük Reynolds sayılarında yani düşük hızlarda çalışılacağı belirtilmiştir. Bu sebeple sistem dolaşan akışkan ve besleme haznesinde tutulan akışkan değişken ortam şartlarından etkilenebilmektedir. Deney sisteminde test bölgesine giren akışkanın, deney parametreleri ve ortam şartları değişse dahi, belirli özellikte kalması istenmektedir. Bu nedenle akışkan test bölgesine girmeden hemen önce su banyosu içerisindeki bir serpantinden geçirilmiştir. 2 m uzunlukta ve 10 mm dış çapında bakır borudan imal edilen serpantin Şekil 3.9’de verilmiştir. Şekil 3.10’da ise wisecircu marka, ısıtma ve soğutma proseslerini barındıran, zaman ayarlı sirkülatörlü su banyosu gösterilmiştir.



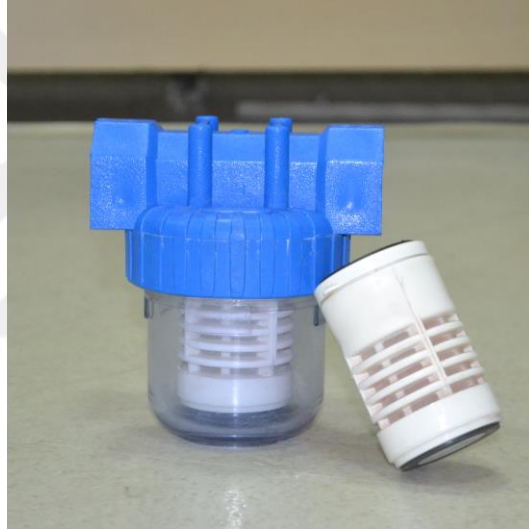
Şekil 3. 9. Serpantin



Şekil 3. 10. Sirkülatörlü su banyosu (www.witeg.de, 01.11.2016)

3.1.9. Mikro filtre

Küçük hidrolik çaplara sahip olan mikrokanllardaki akışlarda, akışkan içerisindeki mikron boyutlu taneciklerin kanalı tıkanması veya kanal kesitini daraltması gibi tehlikeler ile karşılaşılabilir. Akış sisteminde pompa, iletim tesisatı vb. elemanlarda kirlilik oluşabilir ve bu kirlilik akış içerisine granüler elemanların katılmasına sebebiyet verebilir. Bu sebeple deney düzeneğinde, akışkan test bölgesine girmeden hemen önce yaklaşık 10 µm'lik bir filtreden geçirilmiştir. Mikro filtre yıkanabilir ve görseli Şekil 3. 11'de verilmiştir.



Şekil 3. 11. Mikro filtre

3.1.10. Güç kaynağı ve analizörü

Test bölgesinde sabit ısı akışı şartları Şekil 3.12'de verilen güç kaynağı vasıtası ile beslenen şerit ısıtıcı teller ile sağlanmaktadır. Güç kaynağı manuel kontrollüdür. Ayrıca sistemde güç kaynağına entegre çalışan bir güç analizörü (wattmetre) bulunmaktadır. Bu analizör vasıtasıyla güç kaynağı akım ve gerilim değerleri daha hassas kontrol edilebilmiş ve test bölgesine verilen güç daha sağlıklı şekilde ayarlanmıştır. Aşağıda bu güç analizörüne ait teknik özellikler verilmiştir.

- True RMS Ölçüm Sistemi
- AC Akım, Gerilim Ölçümleri
- Aktif Güç, Görünür Güç Power Faktör Ölçümleri
- Frekans Ölçümleri (5kHz)
- D/A Çıkışı
- Kademe Dışına Çıkınca Uyarı Verebilme
- Ortalama Ölçüm Değerinin Ölçülmesi
- Akım Trafosu ve Gerilim Trafosu ile Kullanabilme
- RS-232 Bilgisayara Bağlantı Arabirimi
- Akım, Gerilim ve Gücün aynı anda Ekranda Gösterilmesi
- Yüksek Hassasiyetli Ölçüm ($\pm\%0.1$ rdg $+\%0.1$)
- 300V rms yada 425 V peak Gerilimine Kadar Gerilim Ölçümü
- 30A kadar Akım Ölçümü
- Akım Trafosu eki ile Yüksek Akımlarda Ölçebilme
- Gerilim Trafosu ile Yüksek Gerilimlerde Ölçebilme
- RS-232 Kablosu



Şekil 3. 12. Güç kaynağı

3.1.11. Veri okuma kartı

Test bölgesi üzerinde farklı noktalardan T tipi ısıl çiftler vasıtası ile sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Bu termoelemanlar LR8402-20 model Hioki marka veri okuma kartına bağlanmıştır. Veri okuma kartının bilgisayar bağlantısı mevcut olup veriler bilgisayar yazılımı ile anlık olarak kayıt altına alınmaktadır. Görseli Şekil 3.13’de verilen veri okuma kartının teknik özellikleri de maddeler halinde aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. 13. Veri okuma kartı

- Standart 30 Analog Kanallı
- Standart 8 kanal puls ve dijital giriş
- 45 veya 60 kanala kadar yükseltilebilir
- Bilgisayarla 5 adet veri okuma kartını aynı anda çalıştırmayla 300 kanal ölçüm
- Maks. 10 ms örnekleme hızı
- Maksimum giriş ± 100 V DC
- Kanallar arası matematiksel hesap
- Scale özelliği sayesinde analog çıkışlı sensörleri kendi biriminde gözlemleme
- Isıl çift ile Sıcaklık ölçümü
- Otomatik ısıl çift tanıma özelliği K, J, E, T, N, R, S, B, W
- Nem ölçümü ve otomatik nem sensörü algılama
- 2 telli giriş ile ısıl çiftleri doğrudan jack olmadan bağlama

- Offset Ayarı ile bağlanan sensörlerde meydana voltaj kaymalarını sıfırlama
- İstenilen tarihte ve saatte ölçümleri başlatma ve bitirme
- Puls Toplamı ve Puls Devri Ölçümü
- Ani güç kesintilerine karşı koruma
- Alarm Çıkış Özelliği
- Gerçek zamanlı bilgisayara, USB belleğe yada CF karta kayıt
- Dahili USB ve LAN arayüzü
- E-Mail yolu ile bilgilendirme
- Yazılım ile veri okuma kartını uzaktan kontrol etme ve ayarlama
- Hem cihaz hemde yazılım üzerinden verileri grafiksel olarak inceleme

3.1.12. Isıl çiftler

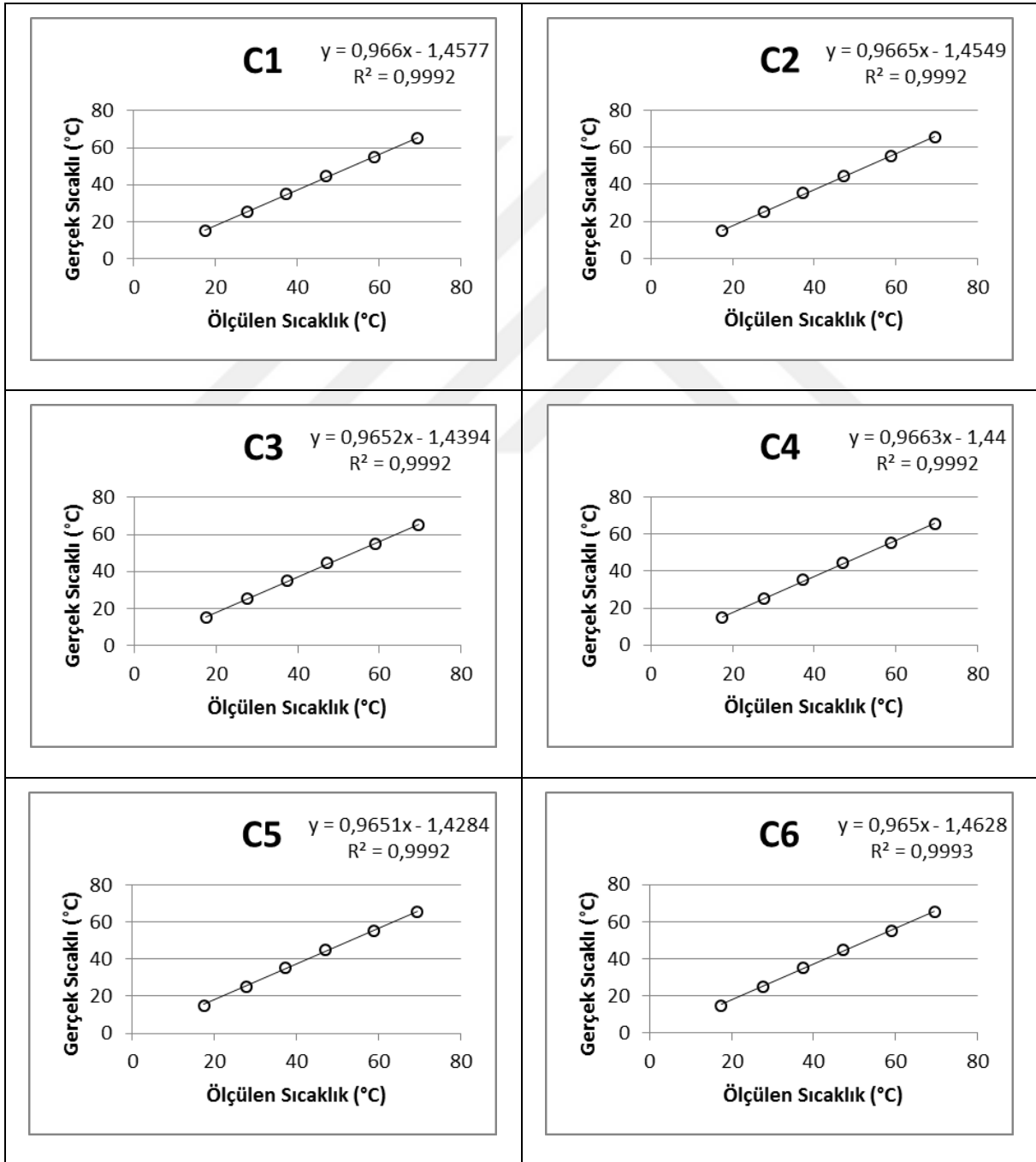
Kanal giriş, çıkış ve yüzey sıcaklık ölçümleri, yanmaya, kimyasal etkilere ve aşınmaya karşı yüksek dirence sahip T tipi fiberglass örgülü ısıl çiftler vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14’de farklı ısıl çift tiplerine ait çalışma sıcaklıkları verilmiştir. Ayrıca ısıl çiftler test bölgesine bağlanmadan önce WiseCurcu marka sirkülatörlü su banyosu içerisinde 20-70°C sıcaklık aralığında 10°C aralıklar ile sıcaklık ölçümleri alınarak kalibre edilmiştir. Kalibrasyon eğrileri ve denklemleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

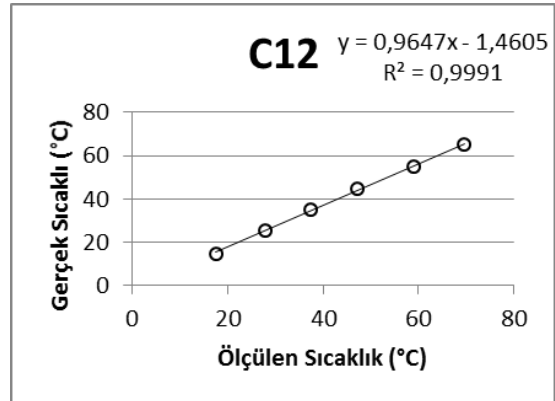
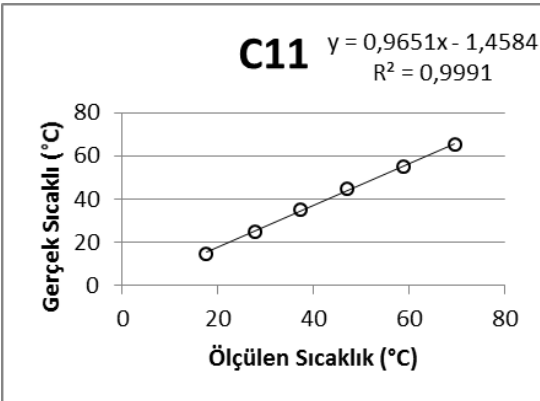
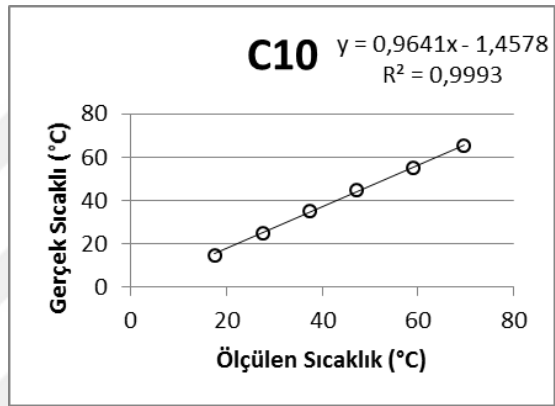
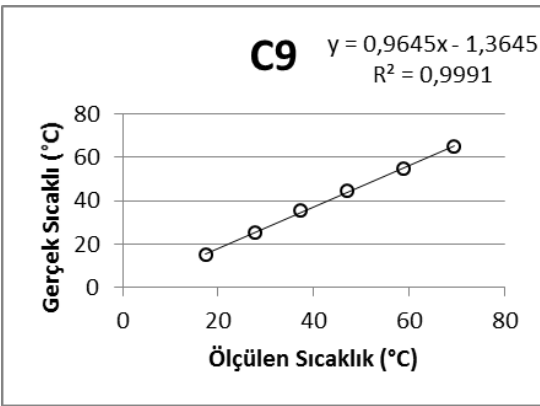
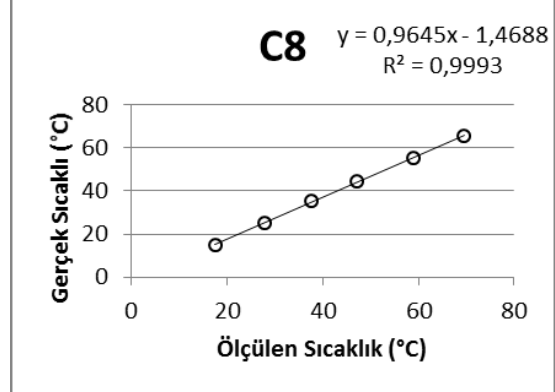
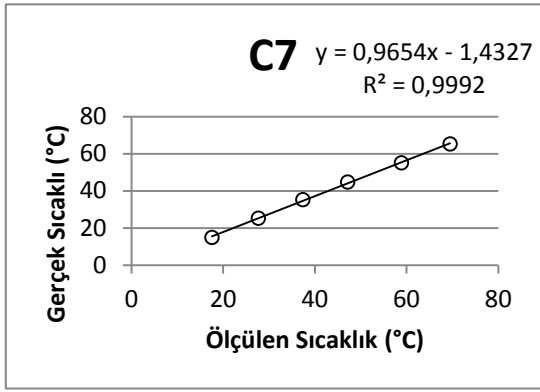
DIN 43710	DIN 43710 ve IEC 584	SICAKLIK ARALIĞI	
U	T	-200° C	+300° C
L	J	-200° C	+800° C
	K	-200° C	+1200° C
	K	-200° C	+1200° C
	E	-200° C	+1200° C
	N	0° C	+1200° C
	S	0° C	+1500° C
	R	0° C	+1600° C
	B	0° C	+1800° C
	W	0° C	+2000° C

Şekil 3. 14. Isıl çiftlerin ölçüm aralıkları (www.termopar.com.tr, 01.12.2016)

Test bölgesinde mikrokanal yüzeyine yerleştirilen ısıl çiftler, herhangi bir işlem gerektirmeksizin doğrudan veri okuma kartına bağlanabilme özelliğine sahiptir. Test bölgesinden sıcaklık okuma işlemi, sistem kararlı hale geldikten sonra, 2 dk boyunca veri alınması ile gerçekleştirilir. Bu sıcaklık verilerinin ortalaması alınarak kalibrasyon denklemlerine yazılır ve yüzey sıcaklıkları bu şekilde belirlenmiş olur.

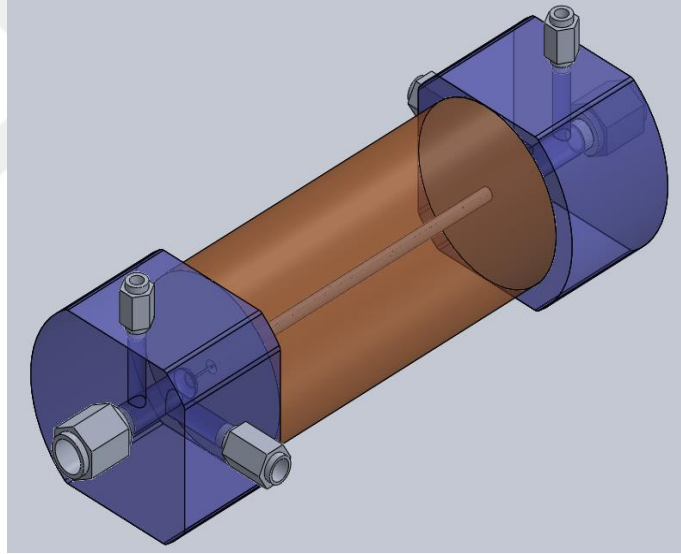
Çizelge 3. 2. Isıl çiftlerin kalibrasyon denklemleri



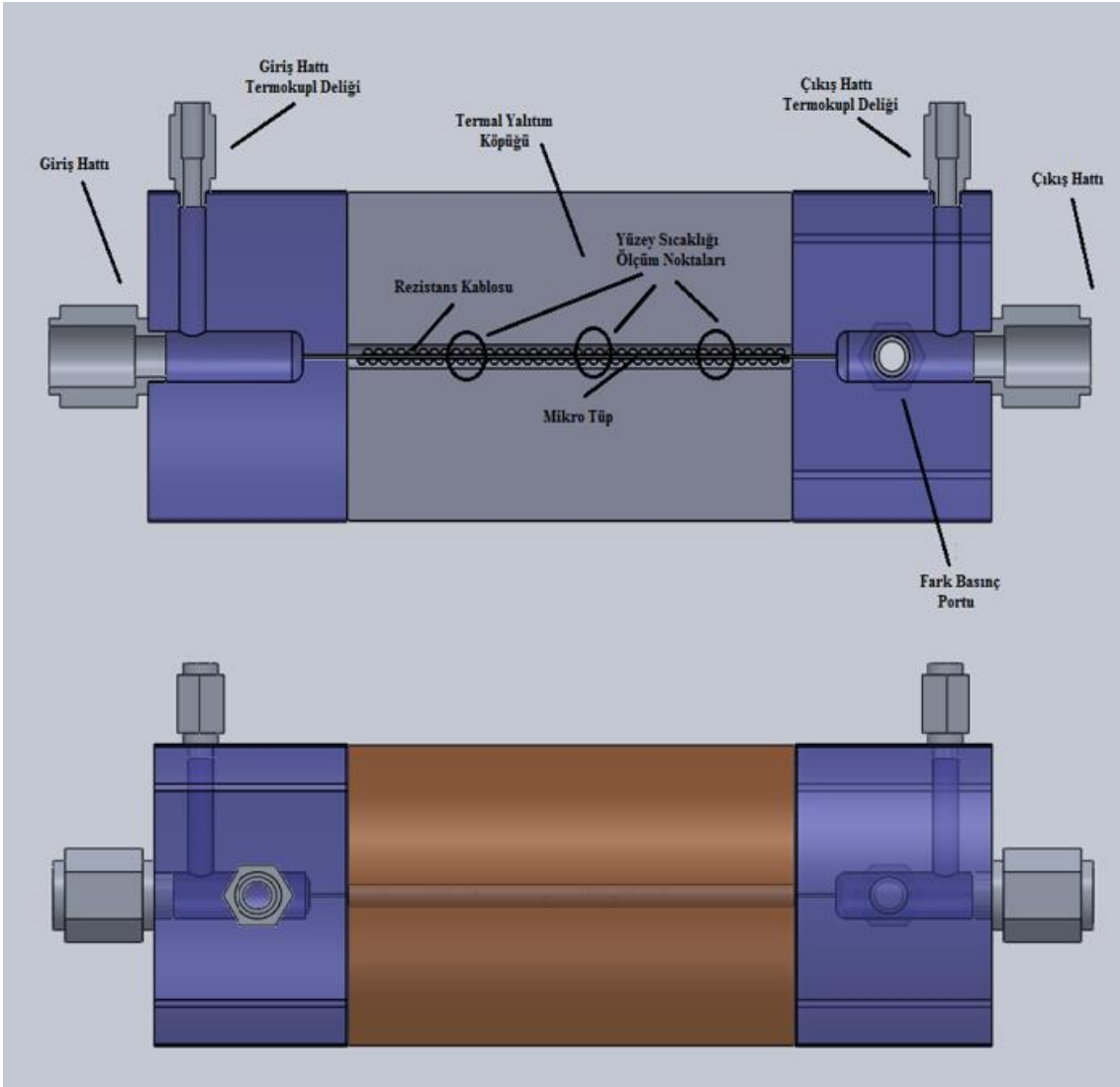


3.2. Test Bölgesi

Mikrokanal test bölgesi kestamit bloklar arasında yerleştirilmiş 500 μm iç 660 μm dış çapa sahip 5 cm uzunluğunda bir mikrokanaldan oluşmaktadır. Kestamit bloklar üzerinde 8 mm çapında hidrolik bağlantı içeren giriş ve çıkış hatları ve 6 mm hidrolik bağlantı içeren fark basınç portları yer almaktadır. Mikrokanal giriş ve çıkış sıcaklıkları blokların üst yüzeylerinden kanal giriş ve çıkış haznelarının orta noktasına indirilen 2 adet ısı çifti ölçülmektedir. Kanal dış yüzeyinden uygulanan sabit ısı akısı, mikrokanal üzerine sarılmış ve güç kaynağı tarafından beslenen şerit ısıtıcı teli vasıtasıyla sağlanmıştır. Kanal üzerinden 6 ısı çifti 3 farklı noktadan sıcaklık ölçümü alınmaktadır. Blokların arası ve mikrokanalın etrafı oluşabilecek ısı kaybını engellemek amacıyla termal yalıtım köpüğü ile doldurulmuştur. Test bölgesi ile ilgili görseller Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3. 15. Test bölgesi göreseli (perspektif)



Şekil 3. 16. Test bölgesi görseli (kesit ve ön Görünüş)

3.3. Hesaplamalar ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

3.3.1. Nanoakışkan hazırlanması ile ilgili hesaplamalar

İki adım metodu kullanılarak hazırlanacak olan 2 farklı hacimsel oranda (%0.2 ve %0.4) nanoakışkanlar için partikül kütlesi hesabına ilişkin eşitlikler aşağıda verilmiştir. Deneysel bir parametre olarak %0.2 ve %0.4 olarak belirlenen partikül yüzdeleri ve nanopartikül ve temel akışkan yoğunluğu bilindiğinden, nanoakışkan yoğunluğu Eşitlik 3.1’de verildiği eşitlikten çekilerek hesaplanır. Eşitlikte verilen ϕ hacimsel partikül yoğunluğudur.

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

Eşitlik 3.1'den hesaplanan nanoakışkan yoğunluğu (ρ_{nf}) ve hazırlanmak istenilen nanoakışkan miktarı (hacmisel) Eşitlik 3.2'de yerine yazılarak nanoakışkan kütlesi (m_{nf}) hesaplanır.

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

Nanoakışkanın kütle oranı (Cm) Eşitlik 3.3'de verilen şekilde yazılır. Burada partikül ve nanoakışkan yoğunluğu bilindiğinden, partikül kütlesi (m_p) hesaplanır.

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

Ayrıca Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5 kullanılarak temel akışkanın kütlesi ve hacmi belirlenir.

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

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

Nanoakışkanın ısı kapasitesini belirlemek için ise Eşitlik 3.6'de verilen ifadedden faydalanılmıştır.

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

3.3.2. Isı transferi verilerinin değerlendirilmesi

Deney düzeneğinde, test bölgesine güç kaynağı vasıtası ile verilen toplam ısı tamamının taşınım mekanizması ile test bölgesinden transfer edildiği kabul edilir. Bu sebeple kayıplar ihmal edilerek Eşitlik 3.7 elde edilir.

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

Burada güç kaynağından sisteme aktarılan güç, güç kaynağı analizöründen okunan akım ve gerilimin değerlerinin çarpımına eşittir. Bunun yanında eşitlikte taşınım ile ısı transfer miktarının da daha açık şekilde yerine yazılması ile Eşitlik 3.8 elde edilir.

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

Eşitlik 3.8'den ortalama ısı taşınım katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Eşitlik 3.9).

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

Elde edilen deneysel ortalama taşınım katsayısı kullanılarak Nusselt sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır (Eşitlik 3.10).

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

Ayrıca ‘ U ’ ortalama akışkan hızı kullanılarak akışın Reynolds sayısı Eşitlik 3.11’de verildiği haliyle hesaplanmıştır.

$$\text{Re} = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (3.11)$$

Kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanan ve doğal taşınımında dolayısı ile karma taşınımında önemli bir parametre olan Grashof sayısı ise Eşitlik 3.12’de verilen ifade kullanılarak hesaplanır.

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

Laminer akış karakteristikleri için önemli diğer bir boyutsuz sayı olan Greatz sayısı ise Eşitlik 3.13 kullanılarak hesaplanır.

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

Rayleigh sayısı, kaldırma kuvvetleri ve viskoz kuvvetler arasındaki ilişkiyi tanımlayan Grashof sayısı ile viskoz yayılım ve termal yayılım arasındaki ilişkiyi veren Prandtl sayısının çarpımıyla hesaplanır. (Eşitlik 3.14).

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

Kaldırma kuvvetlerinin, atalet kuvvetlerine oranı olarak tanımlanan bir diğer karma taşınım ile ilişkili boyutsuz sayı olan Richardson sayısı hesabında ise Eşitlik 3.15 kullanılır.

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

Karma taşınım ile ısı transferinde ve destekleyen akışta Nusselt sayısı, zorlanmış ve doğal taşınım kayganlı ısı transfer parametlerinin kombinasyonu şeklinde verilebilir (Eşitlik 3.16).

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

Karma taşınım için literatürde verilen analitik sonuçlar genellikle aşağıdaki cebirsel denkleme benzer şekilde ifade edilmiştir (Eşitlik 3.17). Burada ‘a’ bir sabittir ve üniform ısı akısı sınır şartında değerinin 2.11 alınması önerilmiştir. Φ ise doğal taşınım etkilerini içeren bir parametredir (Feng ve Li 2013).

$$\left(\text{Nu} \left(\frac{\mu_{\text{duvar}}}{\mu_{\text{bulk}}} \right)^{0.14} \right)^3 = \left(a \times \text{Gz}^{1/3} \right)_{\text{zorlanmış}}^3 + \left(a \times \Phi^{1/3} \right)_{\text{doğal}}^3 \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.18’de ise Prandtl, Greatz ve Grashof sayısının fonksiyonu olarak Φ sayısı tanımlanmıştır. Bulguların analizinde doğal taşınım etkileri ile zorlanmış taşınım etkilerinin kıyaslanmasında Eşitlik 3.17 ve Eşitlik 3.18’den faydalanılmıştır.

$$\Phi = \left(\frac{\text{GrPr} L / D}{\text{Gz} + L / D} \right)^{3/4} \quad (3.18)$$

Ayrıca Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisini tanımlayan bir başka büyüklük ise Ω olarak tanımlanmaktadır (Yang vd. 2005). Aşağıda verilen eşitlikten (Eşitlik 3.19) faydalanılarak doğal taşınım etkilerinin saf zorlanmış taşınıma ne oranda katkı sağladığı belirlenmiştir.

$$\Omega_{\text{zorlanmış}} = \text{Nu}_{\text{zorlanmış}} \left(\frac{\mu_{\text{duvar}}}{\mu_{\text{bulk}}} \right)^{0.14} \times \left(\text{Pr} \frac{D}{L} \right)^{-1/3} = 2.11 \left(\frac{\pi}{4} \text{Re} \right) = 1.95 \text{Re}^{1/3} \quad (3.19)$$

3.3.3. Belirsizlik analizi

DeneySEL verilerin doğru değerlendirilmesi açısından bu bulguların hata analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu hususta literatürde sıkça kullanılan bir yöntem olan Kline ve McKlinton (1953) yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntemde R büyüklüğü, x_1, x_2, x_3 gibi n adet bağımsız değişkenlere bağlı bir büyüklük olsun yani $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Bu bağımsız değişkene ait hata oranları ise w_1, w_2, w_3, w_n olarak tanımlansın bu halde hata oranı w_R aşağıdaki gibi tanımlanır (Eşitlik 3.19).

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

Eşitlik 3.19 da verilen ifadeden faydalanılarak deneysel bulgular ve tartışma kısmında konu edilecek bazı büyüklüklerin hata oranları aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir. Bu büyüklükler sırası ile Reynolds sayısı (Eşitlik 3.20), Nusselt sayısı (Eşitlik 3.21), Grashof sayısıdır (Eşitlik 3.22).

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

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

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

Verilen eşitliklerden de görüleceği üzere belirsizliği hesaplanacak olan büyüklüklere farklı parametreler farklı oranlarda etki etmiştir. Örneğin Reynolds sayısı için kütleli debi, hidrolik çap ve dinamik viskozite değerleri aynı oranda etkili iken, Grashof sayısında en büyük etki hidrolik çap parametresinden gelmiştir. Eşitliklerdeki parametrelerin belirsizlik değerleri ilgili kataloglardan temin edilerek yerine yazıldığında aşağıdaki çizelgede verilen belirsizlik değerleri elde edilmiştir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3. 3. Belirsizlik analizi sonuçları

	D_h	Q	A	Nu	Re	Gr
%	0.01	1	0.02	2.23	1	2

3.4. Nanoakışkanların Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Tez kapsamında incelenecek olan nanoakışkan saf su bazlı SiO₂ nanoakışkanı olarak seçilmiştir. Isı transfer karakteristikleri incelenecek olan nanoakışkanlar iki adım metodu kullanılarak hazırlanmıştır. İki adım metodu ile hazırlanan nanoakışkanlarda ilk aşama nanopartiküllerin hazırlanması, ikinci aşama ise çeşitli yöntemler kullanılarak bu partiküllerin temel akışkan içerisine dağıtılmasıdır. Bu hususta öncelikle nanoakışkanın hacimsel partikül oranı belirlenmeli ve istenilen hacimsel oranda nanoakışkan için gerekli temel akışkan ve partikül miktarları hesaplanmalıdır. Bu sebeple %0, 0.2 ve 0.4 olarak belirlenen hacimsel partikül oranları için gerekli hesaplamalar 3.3.1 başlığı altında verilen nanoakışkanların hazırlanması ile ilgili eşitlikler yardımı ile hesaplanmıştır. İlgili miktarlar çizelge halinde Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3. 4: Hazırlanacak nanoakışkanlar için gerekli partikül ve temel akışkan miktarları (2500 mL nanoakışkan için)

Hacimsel Oran	Nanoakışkan Hacmi (mL)	Nanoakışkan Kütlesi (g)	Kütlesel Oran	SiO ₂ Kütlesi (g)	Saf Su Kütlesi (g)	Saf Su Hacmi (mL)
0	2500	2474.2500	0	0	2474.2500	2500
0.002	2500	2481.3015	0.0048	12	2469.3015	2495
0.004	2500	2488.3530	0.0096	24	2464.3530	2490

Çizelge 3. 5: SiO₂ nanopartiküllerinin özellikleri (www.sigmaaldrich.com)

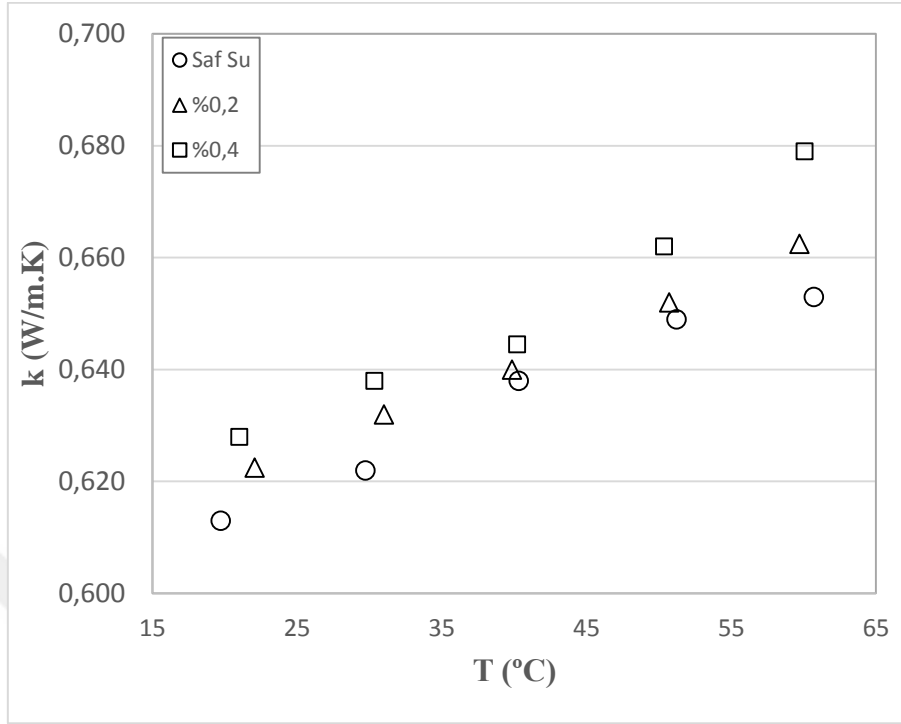
Adı	Silikon Dioksit
Moleküler Formülü	SiO ₂
Moleküler Ağırlığı	60.08 g/mol
Bulk Yoğunluğu	0.011 g/mL
Yoğunluğu	2.2-2.6 g/mL (25°C’de)

Partikül Boyutu	10-20 nm
Renk	Beyaz
Safılık	%99.5
Kaynama Noktası	2230°C
Ergime Noktası	> 1600°C

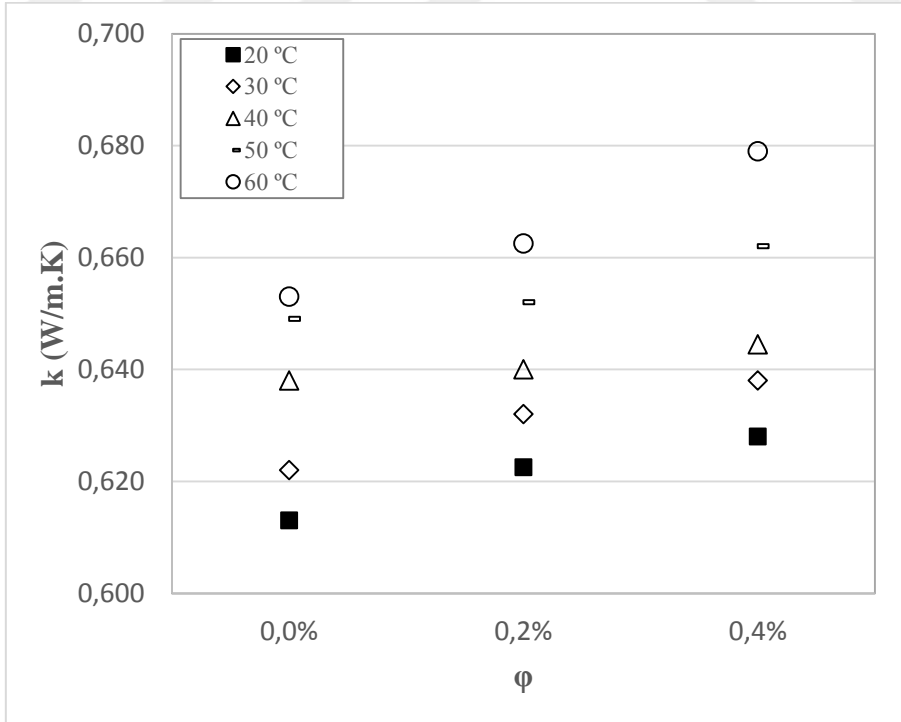
Partiküller Sigma-Aldrich firmasından tedarik edilmiştir. Partikül ve temel akışkan hesabında da kullanılan bazı nanopartiküllerin özelliklerini içeren bir çizelge yukarıda verilmiştir (Çizelge 3.4).

Nanoakışkan için gerekli temel akışkan ve partikül miktarları belirlendikten sonra. Öncelikle istenilen miktarda saf su bir kaba boşaltılmış ve belirlenen miktarda SiO₂ nanopartikülü de hassas terazi ile ölçülerek temel akışkan içerisine ilave edilmiştir. Elde edilen karışım öncelikle mekanik olarak karıştırılarak ultrasonik homojenizatör içerisine alınmıştır. Saf su ve nanopartikül karışımı 8 saat süre ile homojenizatör içerisinde homojenleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Diğer hacimsel oran için de bu işlemler tekrarlanmıştır. Elde edilen nanoakışkanlarda herhangi bir stabilizasyon problemi gözlenmemiştir (Çökme, Topaklanma, vb.). Hazırlanan nanoakışkanlardan 100 mL ısı iletkenlik ölçümleri için, 100 ml viskozite ölçümleri için ve 50 ml'de SEM görüntüleri için numuneler alınmıştır.

Saf su ve saf su bazlı SiO₂ nanoakışkanı için ısı iletkenlik ölçümleri Linseis marka THB 100 model ısı iletkenlik ölçer ile gerçekleştirilmiştir. Geçici Isıl Köprü (Transient Hot Bridge) tekniği ile ölçüm yapan cihazın çalışma prensibi Hammerschmidt ve Meier (2006) tarafından ayrıntılı biçimde izah edilmiştir.



Şekil 3. 17. Farklı akışkanlar için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3. 18. Farklı sıcaklıklarda ısı iletkenliğin hacimsel partikül oranı ile değişimi

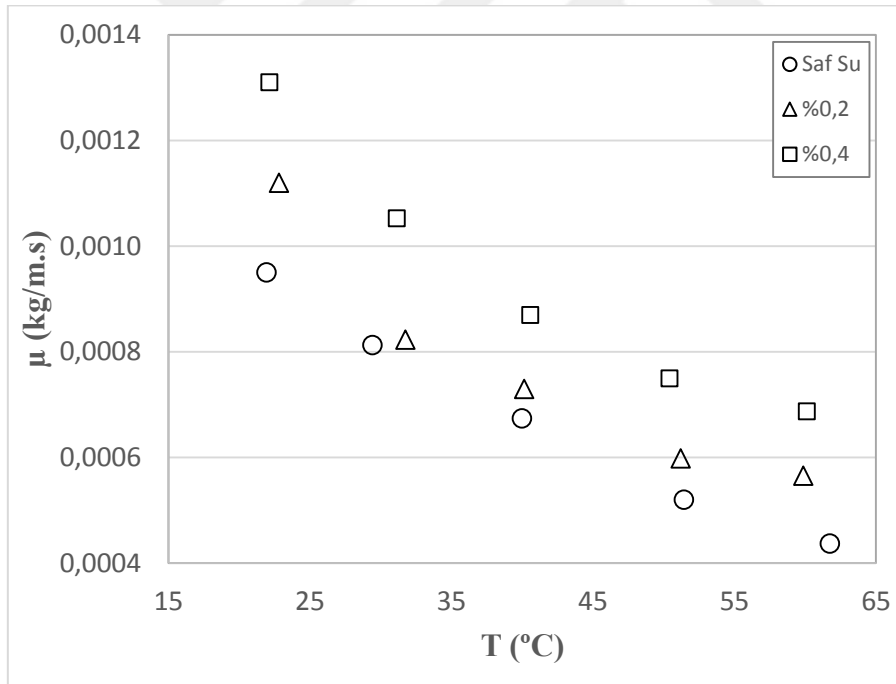
Isıl iletkenlik ölçümleri %0, 0.2 ve 0.4 hacimsel oranlarında ve 20-60°C aralığında yaklaşık olarak 10°C atışla belirlenen sıcaklıklarda alınmıştır. Şekil 3.17’de Farklı hacimsel oranlarda nanoakışkanlar ve saf su için ısı iletkenliğinin sıcaklık ile değişimi gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere saf su ve nanoakışkanların ısı iletkenlikleri sıcaklıktan büyük oranda etkilenmiştir. Sıcaklığın artması ile tüm akışkanlarda ısı iletkenlik değeri artmıştır. Ayrıca nanoakışkanların ısı iletkenlik değerleri saf suyun ısı iletkenlik değerinin üstündedir. Isıl iletkenlikteki en yüksek artış ise %0.4 hacimsel oran için 60°C sıcaklıkta, yaklaşık %8 olarak belirlenmiştir. Isıl iletkenlik değerinde artışın sebebi artan sıcaklıkla beraber akışkan moleküllerindeki yayılım ve çarpışma etkinliklerindeki artıştır. Akışkanlarda ısı iletimi moleküler yayılım ve moleküler çarpışmalarla gerçekleşmektedir. Sıcaklık sebebiyle bu mekanizmaların etkinliklerindeki artış akışkanların ısı iletkenliklerini arttıracaktır.

Şekil 3.18’de ise Farklı sıcaklıklarda akışkanların ısı iletkenlik değerlerinin, hacimsel partikül oranı ile değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere artan hacimsel partikül oranı ile tüm sıcaklıklarda ısı iletkenlik artmıştır. Isıl iletkenlikteki bu artışın sebebi olarak ilk aklı gelen açıklama basit karışım yaklaşımıdır. Bir akışkan içerisine akışkanın ısı iletkenliğinden yüksek ısı iletkenliğe sahip bir başka madde eklendiğinde elde edilen karışımın ısı iletkenliği temel akışkana oranla yüksek olacaktır. Bu sebeple nanoakışkanın ısı iletkenliğinin hacimsel partikül oranındaki artışla artacağından bahsedilebilir. Fakat nanoakışkanlar için bu yaklaşım yeterli değildir. Nanoakışkanlardaki ısı iletkenlik artışına bir başka fenomen büyük oranda katkı sağlar. Brownian hareketi veya Brownian etkisi olarak adlandırılan bu fenomen nanoakışkan içerisindeki partiküllerin rastlantısal hareketlerini ve bu hareket sonucu oluşan momentum ve ısı transferlerini kapsamaktadır. Temel akışkan içerisine nanopartikül ilavesi veya artan hacimsel partikül oranı ile ısı iletkenlikte gözlenen artışa sebep olarak bu etki gösterilebilir.

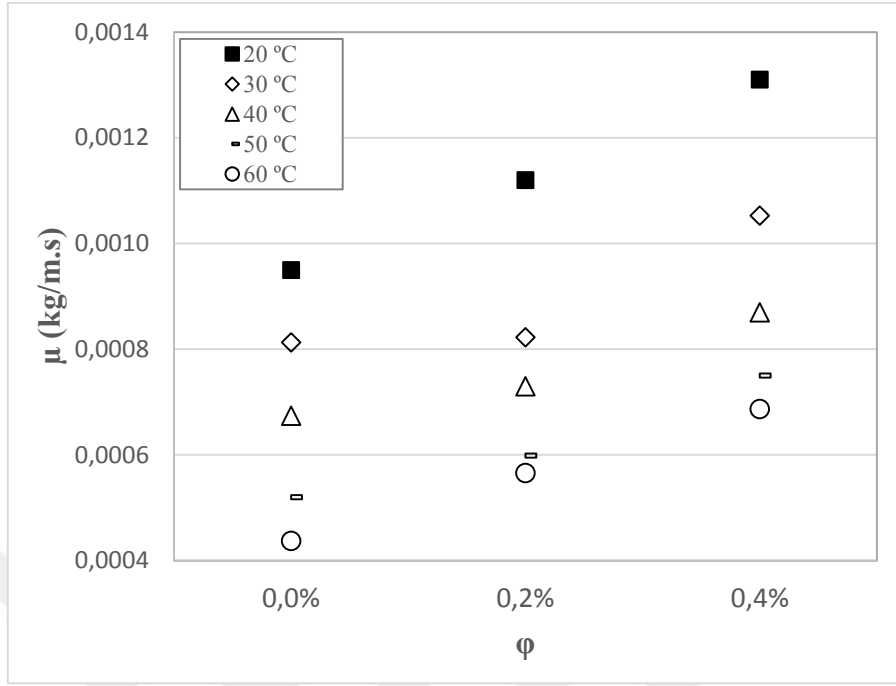
Saf su ve nanoakışkanların viskozite ölçümleri ise A&D marka SV-10 model vibro viskozimetre ile gerçekleştirilmiştir. Viskozite ölçümleri de ısı iletkenlik ölçümleri ile aynı şartlarda yani %0, 0.2 ve 0.4 hacimsel oranlarda ve 20-60°C sıcaklık aralığında alınmıştır. Deneysel verileri doğrulamak amacı ile tüm ölçümlerden önce saf suyun viskozite ölçümleri tekrarlanmıştır. Şekil 3.19’da Farklı hacimsel oranlarda nanoakışkanlar ve saf su için

viskozitenin sıcaklık ile değişimi verilirken, Şekil 3.20’de ise farklı sıcaklıklarda viskozitenin hacimsel oran ile değişimi gösterilmiştir.

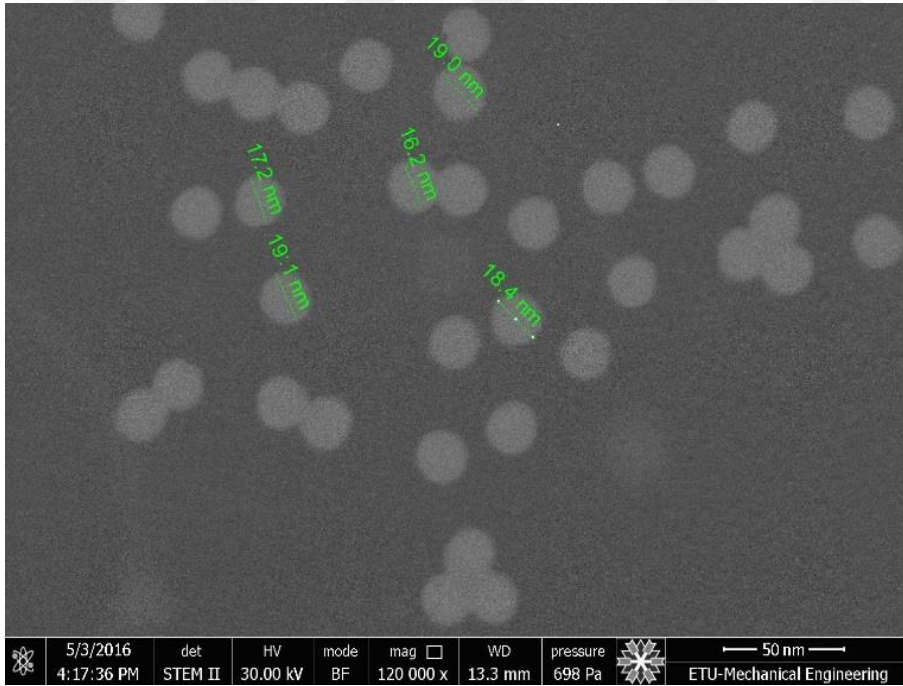
Beklenildiği gibi nanoakışkanların viskozite değerleri saf su viskozite değerlerinin üzerinde çıkmıştır. Şekil 3.19’den açıkça görüldüğü üzere viskozite değeri ile sıcaklık arasında kuvvetli bir ilişki söz konusudur. Tüm akışkanlar için viskozite sıcaklıkla ters orantılı şekilde değişmiştir. Şekil 3.20’de hacimsel partikül oranının viskozite üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Artan hacimsel partikül oranı tüm sıcaklıklarda viskozitenin artışına sebep olmuştur. Bu sebeple en düşük partikül oranı ve en yüksek sıcaklık değerinde iş akışkanı için en düşük viskoziteye ulaşılabacağı söylenebilir. Ayrıca Şekil 3.20’den hacimsel partikül oranının ile akışkan viskozitesi arasındaki ilişkinin linner bir karaktere sahip olduğu gözlenmiştir. %0.4 hacimsel oranda SiO₂-saf su nanoakışkanının viskozite değeri saf suya göre ortalama %40 oranında artmıştır.



Şekil 3. 19. Farklı akışkanlar için viskozitenin sıcaklıkla değişimi



Şekil 3. 20. Farklı sıcaklıklarda viskozitenin hacimsel partikül oranı ile değişimi



Şekil 3. 21. %0.2 hacimsel oranda SiO₂-Su nanoakışkanı için örnek SEM görüntüsü

Çalışmanın bu bölümünde nanoakışkanların hazırlanması ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra, akışkan için SEM görüntülemesi de yapılmıştır. Alınan SEM (Scanning Electronic Microscopy) görüntüleri partikül şekil ve boyutlarının belirlenmesine olanak sağlamıştır. Yani bu görüntülerden faydalanılarak partikül üreticisinin beyan ettiği partiküllerin geometrik özelliklerinin doğruluğu kontrol edilmiştir. Ayrıca 3.21’de de görülebileceği gibi partiküller akışkan içerisinde düzgün bir dağılıma sahiptir ve süspansiyonda topaklanma sorunu gibi stabilizasyon problemleri gözlenmemektedir. Bu sebeple ısı iletkenlik ve viskozite ölçümleri alınan ve de stabilizasyon problemi gözlemlenmeyen akışkan artık ısı transfer deneyleri için hazırdır.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada SiO₂ partikülleri kullanılarak hazırlanan su bazlı nanoakışkanların mikrokanallarda karma taşınım ile ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel parametreleri olarak kütleli debi, kanal eğim açısı ve nanopartikül hacimsel oranı seçilmiştir. Bu parametrelerde yapılan değişikliklerin ısı transferi karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Bu bölümün ilk kısmında saf su için alınan deneysel veriler işlenerek grafik haline getirilmiş ve bu bulgular literatürde sıklıkla kullanılan modeller ile karşılaştırılmıştır. İkinci kısım ise karma taşınım ile ısı transferi karakteristiklerinin incelenmesini içermektedir.

4.1. Isı Transfer Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması

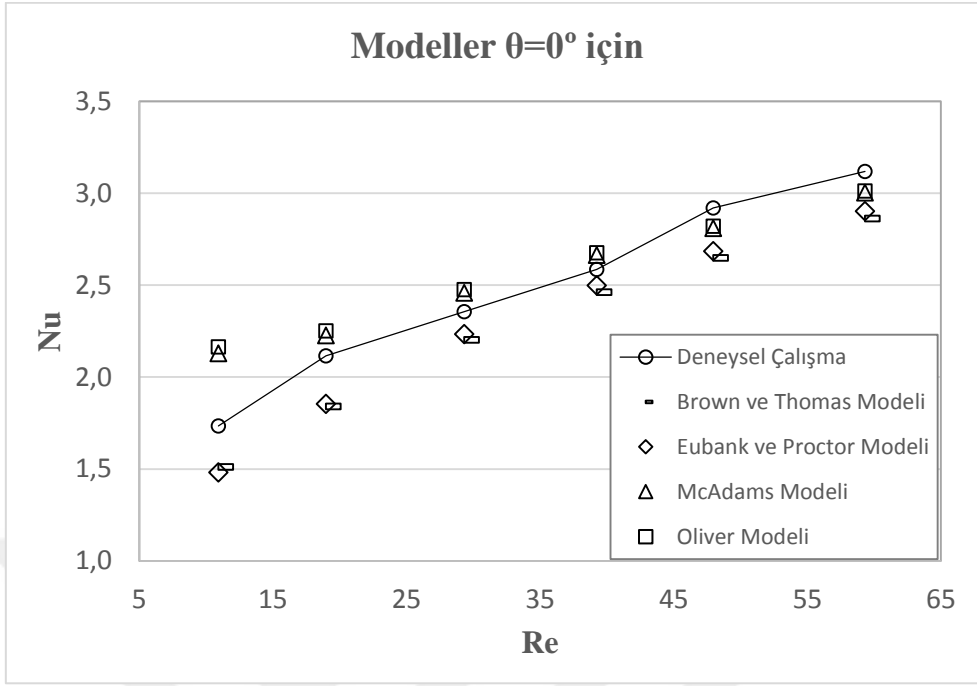
Kurulan deney düzeneğinde sağlıklı veriler alınıp alınmadığının kontrolü daha önce bu konu ile ilgili elde edilmiş modeller ve deneysel verilerin kıyaslanması ile mümkündür. Bu hususta, çalışma sonucunda saf su ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilen Brown-Thomas, Oliver, McAdams ve Eubank-Proctor modelleri ile karşılaştırılmıştır (Olver 1962, Feng ve Li 2013)

$$\text{Nu} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} = 2.11 \left(\text{Gz} + 6.2 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{Gr Pr } L}{D} \right)^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{Eubank ve Proctor Modeli}) \quad (3.24)$$

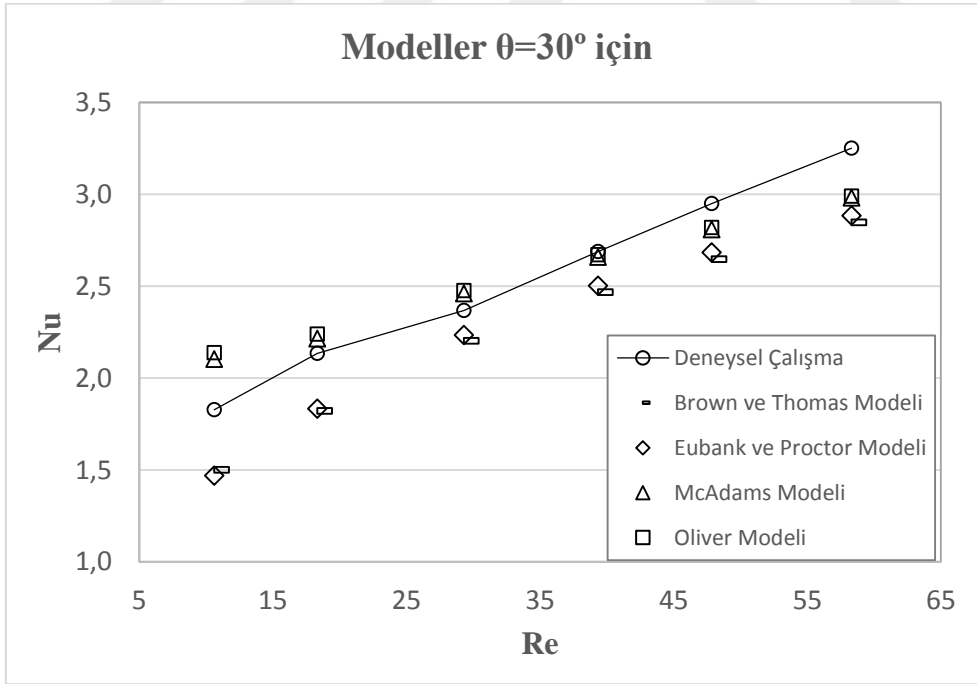
$$\text{Nu} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} = 2.11 \left(\text{Gz} + 0.0273 \left(\frac{\text{Gr Pr } L / D}{\text{Gz} + L / D} \right)^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{Brown ve Thomas Modeli}) \quad (3.25)$$

$$\text{Nu} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} = 2.11 \left(\text{Gz} + 0.0182 (\text{GrPr})^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{McAdams Modeli}) \quad (3.26)$$

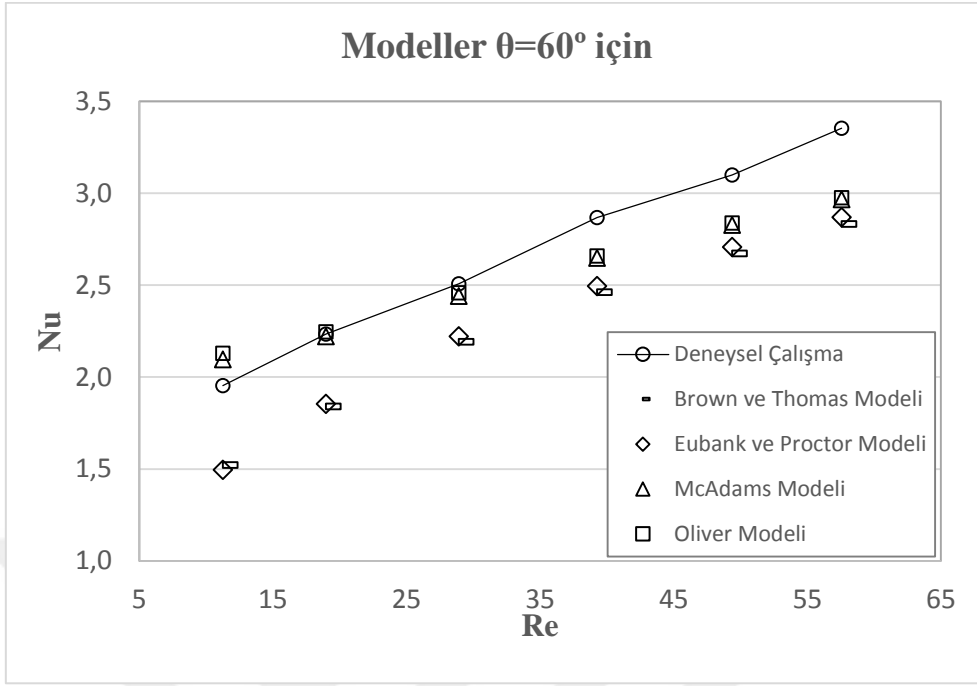
$$\text{Nu} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} = 2.11 \left(\text{Gz} + 0.0083 (\text{GrPr})^{3/4} \right)^{1/3} \quad (\text{Oliver Modeli}) \quad (3.27)$$



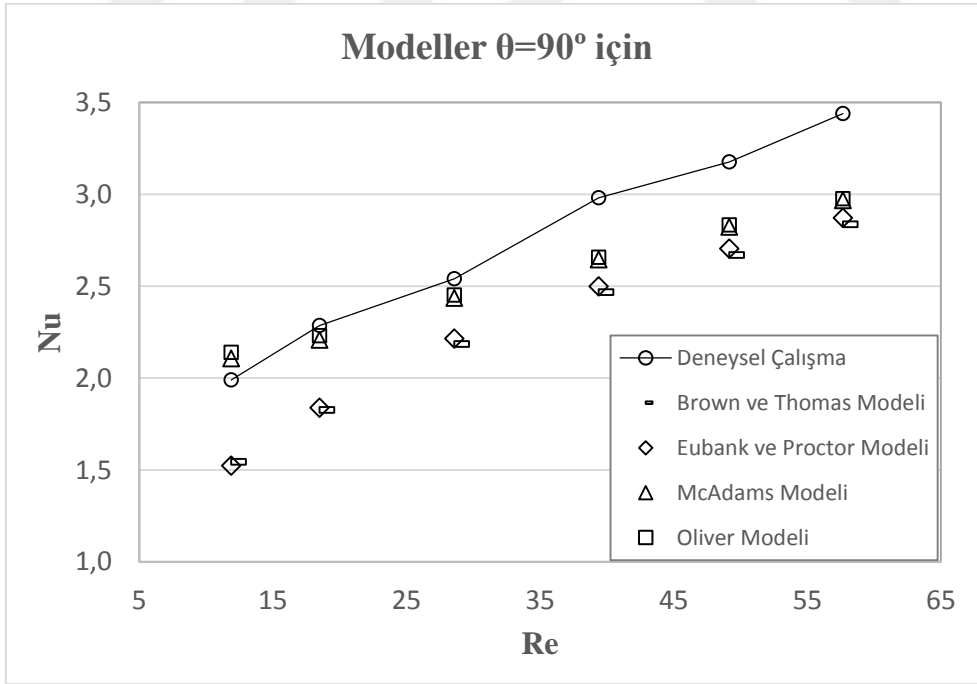
Şekil 4. 1. 0° kanal eğiminde saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması



Şekil 4. 2. 30° kanal eğiminde saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması



Şekil 4. 3. 60° kanal eğiminde saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması



Şekil 4. 4. 90° kanal eğiminde saf su ısı transferi sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması

0°, 30°, 60° ve 90°'lik kanal eğimlerinde saf suyun ısı transferi sonuçlarının literatürle karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir. Bahsi geçen şekillerin tümünde artan Reynolds sayısı ile Nusselt sayısında hem modeller hem de deneysel sonuçlar için artış gözlenmektedir. Bununla birlikte modeller açısından bakıldığında en yüksek ısı transferi sonuçları Oliver Modeli'nde, en düşük sonuçlar ise Brown ve Thomas Modeli'nde elde edilmiştir. Brown ve Thomas Modeli ile Eubank Proctor Modeli ve McAdams Modeli ile Oliver Modeli benzer eğilimde modeller olarak göze çarpmaktadır. Ayrıca düşük Reynolds sayısı değerlerinde modellerin ısı transferi tahminleri birbirlerinden bir miktar uzak iken Reynolds sayısındaki artış ile tahminler birbirine yaklaşmaktadır. Tüm kanal eğimleri için deneysel veriler modeller ile iyi bir uyum içindedir. 0° kanal eğiminde Reynolds sayısı değerinin 45'in altında kaldığı bölgede ısı transferi sonuçlarının karşılaştırma yapılan dört modelin arasında kalırken, Reynolds sayısı değerinin 45'i aştığı bölgede deneysel veriler modellerin bir miktar üzerindedir.

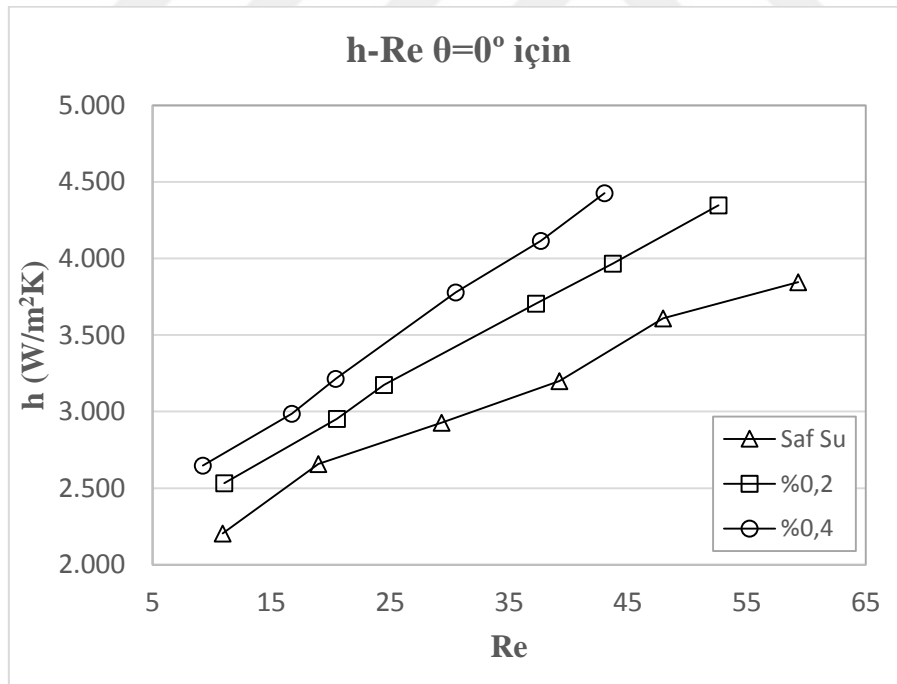
Şekiller incelendiğinde kanal eğimindeki artışın deneysel ısı transferi sonuçlarını bir miktar yukarı taşıdığı göze çarpmaktadır. Bu artış karma taşınım ile ısı transferi mekanizmasındaki ikincil akışların zorlanmış akış yönüne göre hangi durumda olduğu ile alakalıdır. Yatay olarak konumlandırılan kanalda doğal taşınım mekanizmasının oluşturduğu ikincil akışlar, pompa tarafından tahrik edilen akışa diktir. Fakat artan eğim açısı ile bu ikincil akışın pompa tahrikli akışı destekleyen yönde bir bileşenin oluşur ve açının 90°'ye gelmesi ile artık ikincil akış tamamen pompa tahrikli akışı destekleyen yöndedir. Bu durum ek bir tahrik sağlar buda ısı transferini artırır. Bu sebeple kanal eğimindeki artış ısı transferi sonuçlarını bir miktar artırmıştır.

4.2. Karma Taşınım Bulguları

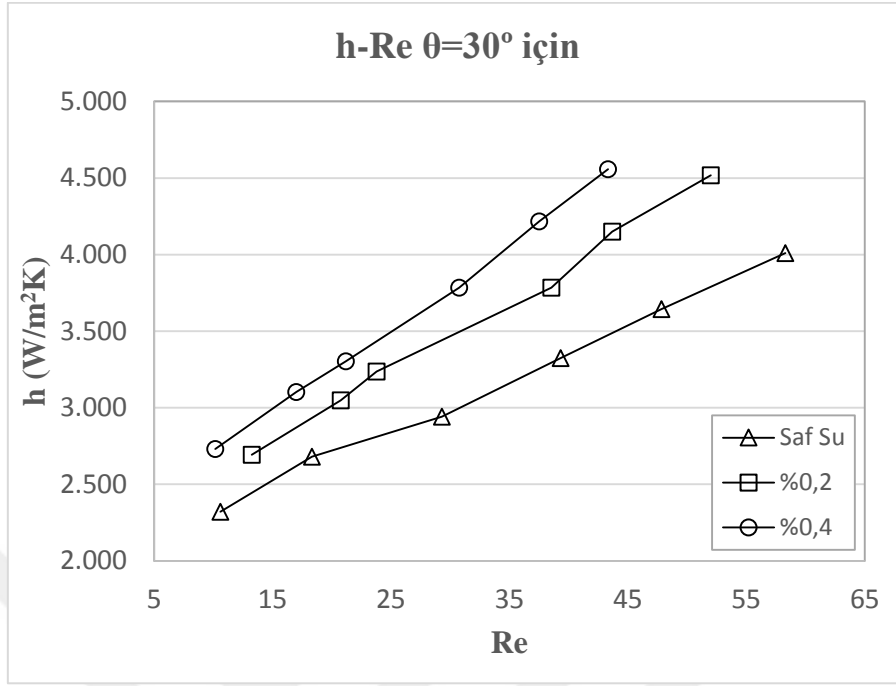
Taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimini veren grafikler devam eden bölümde verilmiştir. Şekillerde öncelikle 0°, 30°, 60° ve 90°'de tutulan kanallarda saf su ve SiO₂-saf su nanoakışkanlarının taşınım katsayısı değerleri verilirken (Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8) devamında belirlenen bir iş akışkanında taşınım katsayısının farklı kanal eğimleri için Reynolds sayısı ile nasıl değiştiği gösterilmiştir (Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11). Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'den de açıkça görüleceği üzere tüm iş akışkanları için taşınım katsayısı Reynolds sayısındaki artış ile

artmıştır. Ayrıca Tüm Reynolds sayısı değerlerinde en düşük taşınım katsayısı saf su için elde edilmiştir. Beklenildiği gibi iş akışkanına nanopartikül ilavesi tüm kanal eğimlerinde taşınım katsayısını arttırmıştır. Nanopartikül ilavesi ile taşınım katsayısında gerçekleşen artış, tüm kanal eğimlerinde Reynolds sayısının artması ile daha belirgin hale gelmiştir.

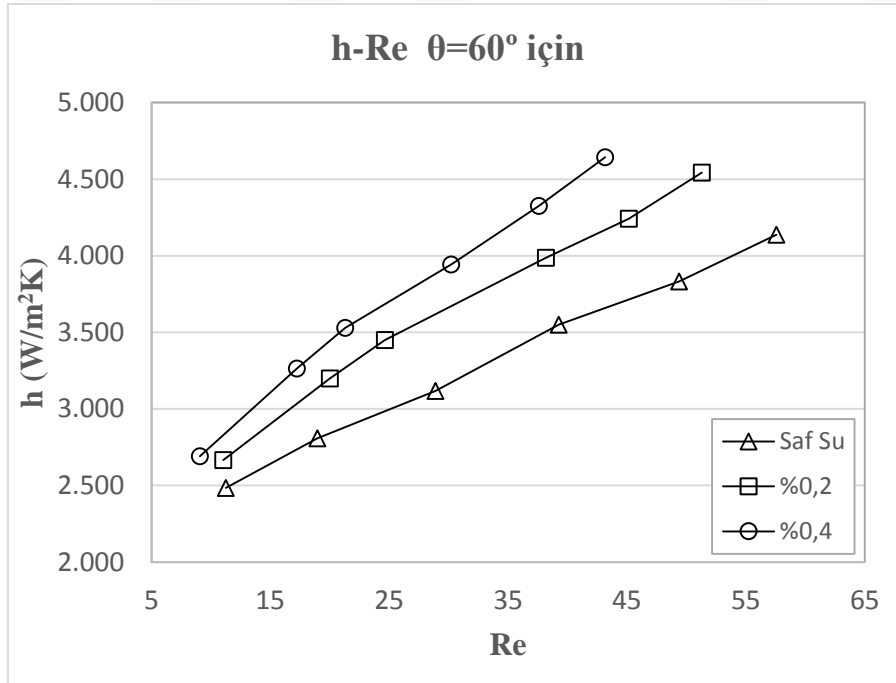
Nanopartikül ilavesinin ısı taşınım katsayısını bir miktar yukarı taşımıştır. ‘‘Nanoakışkanlarda ısı transferini arttıran mekanizmalar’’ başlığı altına verdiğimiz Brownian hareketi, partiküllerin kümelenmesi, partiküller etrafındaki katmanlaşma, yakın alan radyasyonu ve balistik foton iletimi mekanizmaları bu artışı destekler niteliktedir. Bu mekanizmalardan birçoğu halen tartışılmalı da en belirgin etkiye sahip mekanizmanın Brownian hareketi olduğu düşünülmektedir. Brownian hareketini akışkan içerisindeki partiküllerin rastsal hareketi olarak tanımlanmıştır. İşte bu rastsal hareket partiküller etrafında da bir akışkan hareketine yani mikro taşınım etkisine sebebiyet verecektir. Bu da ısı transferini yani taşınım katsayısını arttıracaktır.



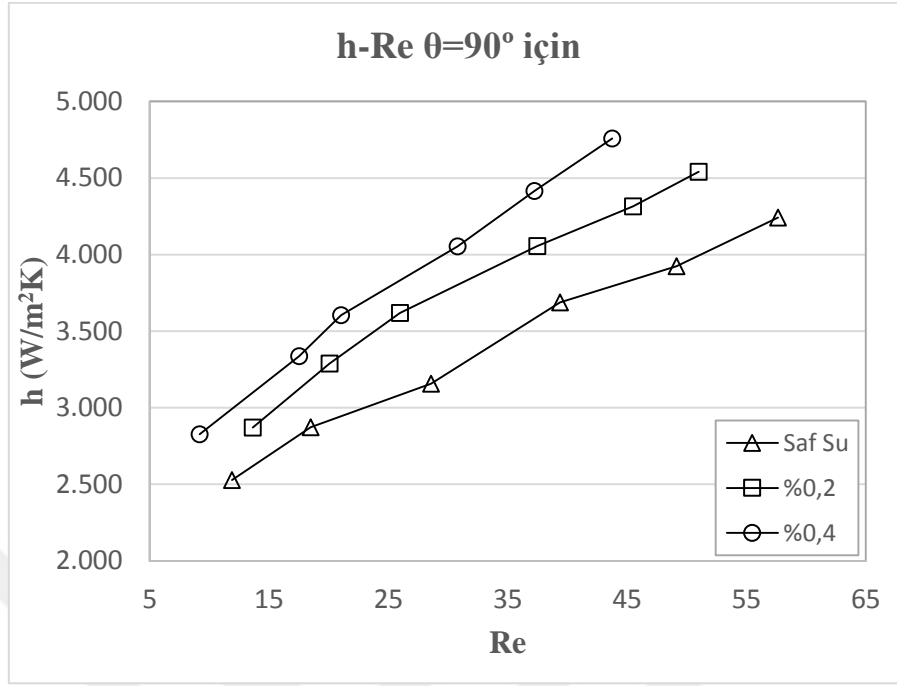
Şekil 4. 5. Farklı akışkanlar için 0° kanal eğiminde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısıyla değişimi



Şekil 4. 6. Farklı akışkanlar için 30° kanal eğiminde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısıyla değişimi

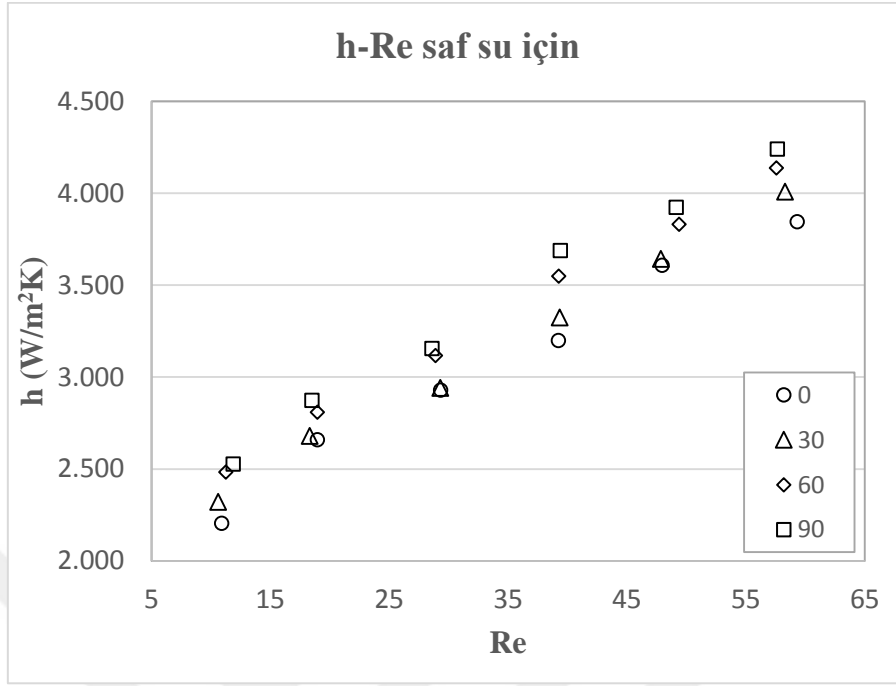


Şekil 4. 7. Farklı akışkanlar için 60° kanal eğiminde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısıyla değişimi

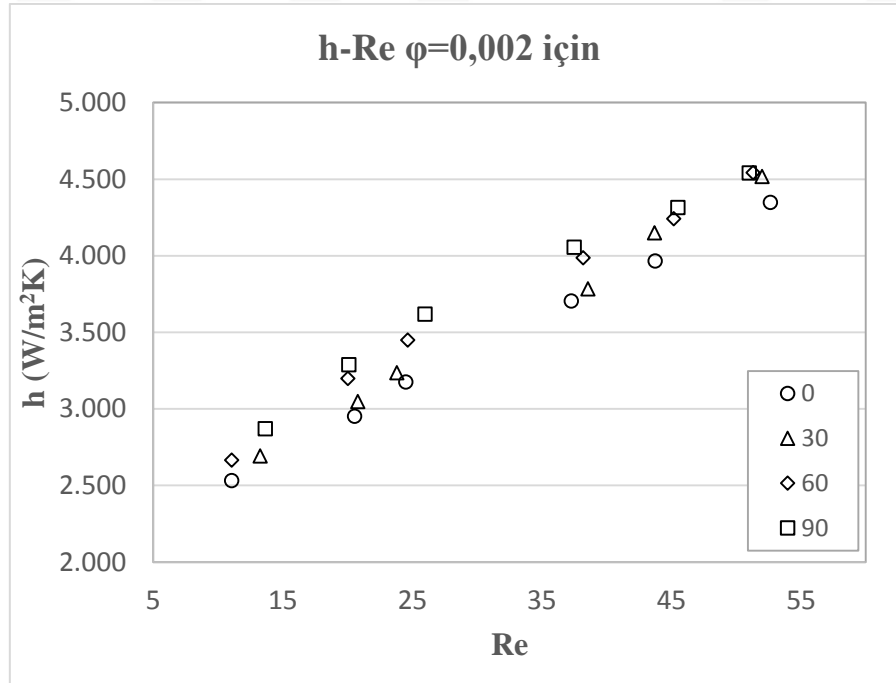


Şekil 4. 8. Farklı akışkanlar için 90° kanal eğiminde ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

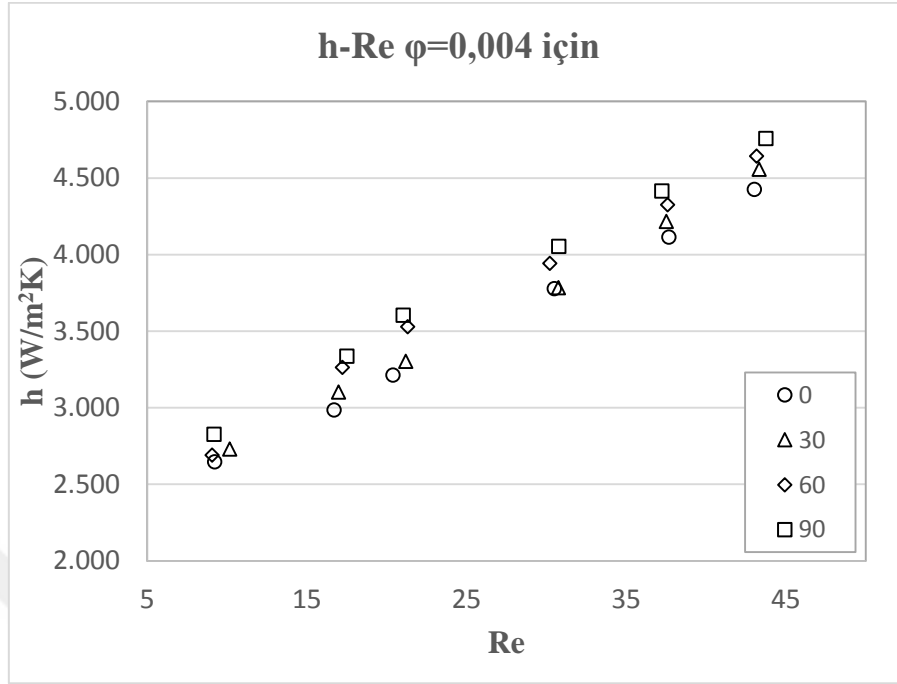
Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 ısı taşınım katsayısının kanal eğimi ile nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar sırası ile saf su, %0.2 ve %0.4 hacimsel oranlardaki nanoakışkanlar içindir. Tüm akışkanlar için en düşük ısı taşınım katsayısı 0° kanal eğiminde gözlenirken en yüksek taşınım katsayısı ise 90°lik kanal eğimindedir. Şekillerin tamamında yani tüm iş akışkanları için kanal eğimindeki artış taşınım katsayısını arttırmıştır. Tüm akışkanlar için bu artışın benzer eğimde olduğu söylenebilir. Bu artışın sebebi ise ısı transfer verilerinin modeller ile karşılaştırılması kısmında da bahsedildiği gibi ikincil akışların zorlanmış akışları destekler yönde gerçekleşmesidir. Kanal eğiminin artması ikincil akışların zorlanmış akış yönünde ek bir tahrik oluşturması demektir. Bu da ısı transferini dolayısı ile ısı taşınım katsayısını arttıracaktır. Ayrıca deney sisteminde bir parametre olarak seçtiğimiz Reynolds sayısının değişimi kütleli debi yani akışkan hızının arttırılması veya azaltılması yolu ile sağlanmıştır. Akış alanındaki hızın artması viskoz alt tabakanın incelmeye ve momentum transferinin artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla Reynolds sayısının artışıyla ısı transferi de belirgin şekilde artmaktadır.



Şekil 4. 9. Farklı kanal eğimlerinde saf su için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

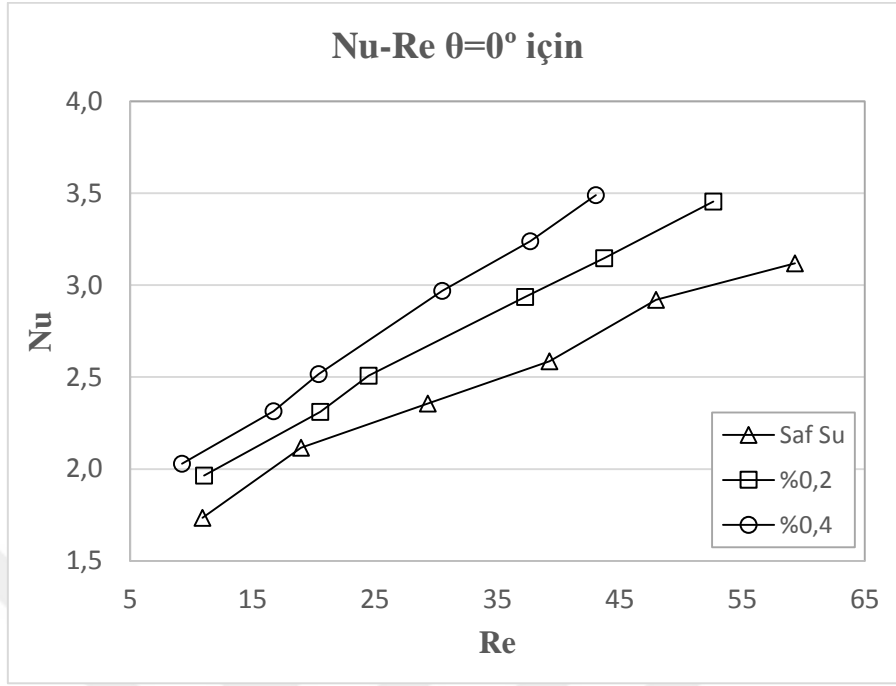


Şekil 4. 10. Farklı kanal eğimlerinde %0.2'lik hacimsel oranda SiO₂-saf su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

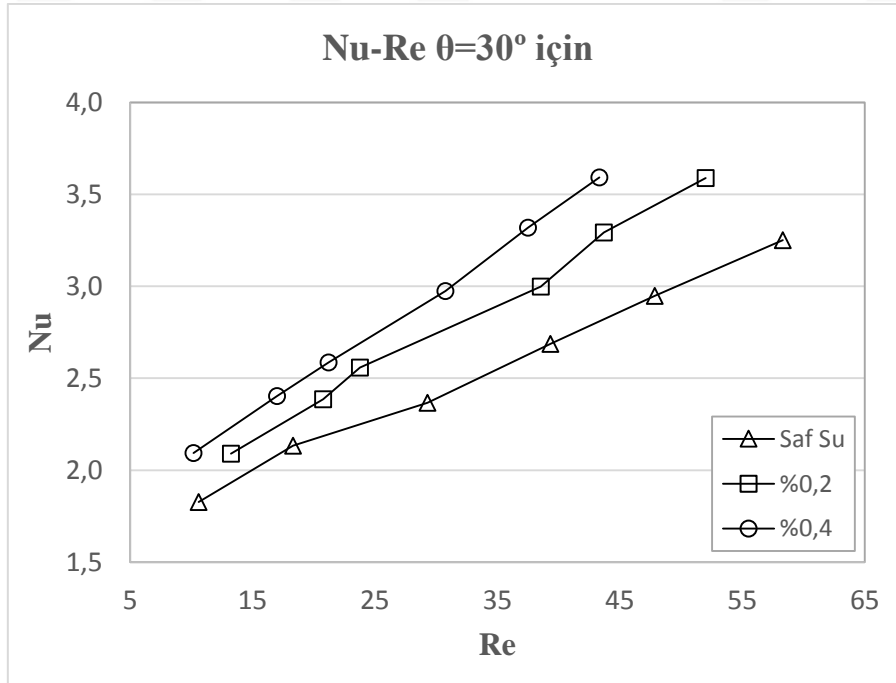


Şekil 4. 11. Farklı kanal eğimlerinde %0.4'lik hacimsel oranda SiO₂-saf su nanoakışkanı için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi

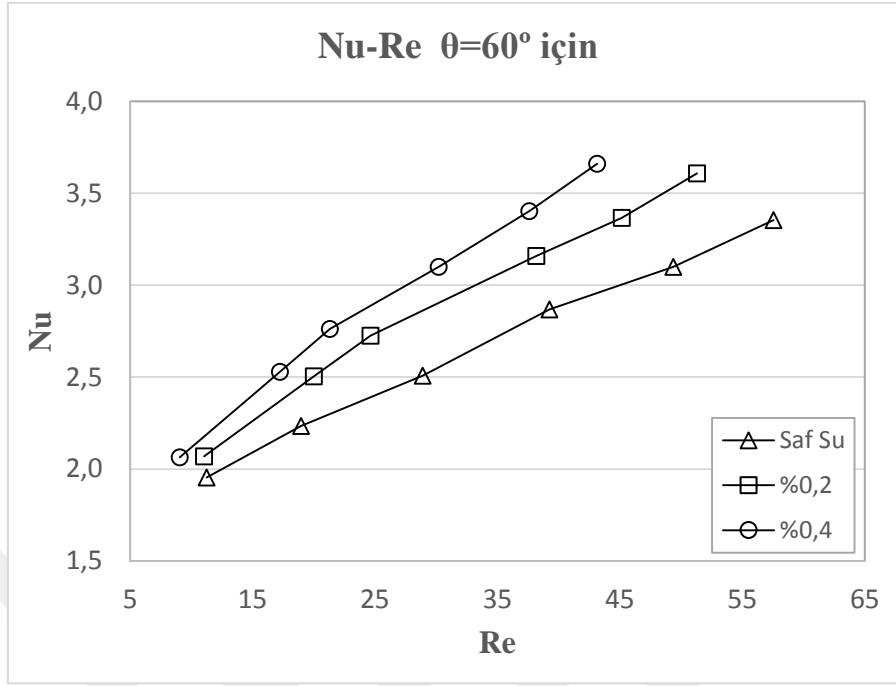
Şekil 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15' de farklı akışkanlar için deneysel Nusselt sayısının, Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Şekillerde verilen bu değişim sırası ile 0, 30, 60 ve 90° derecelik eğim açıları içindir. Şekillerde verilen Nusselt sayısı toplam Nusselt sayısı olup, doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin her ikisinin de içermektedir. Şekillerden de görüleceği üzere saf suya eklenen yüksek ısı iletkenli SiO₂ nanopartikülleri, tüm Reynolds sayısı değerlerinde Nusselt sayısında artışa yani ısı transferinde iyileşmeye neden olmuştur. Bunun yanında ısı transferindeki iyileşme partikül hacimsel oranındaki artışla da artmıştır yani tüm eğim açılarında %0.4 hacimsel oradaki nanoakışkanda en yüksek Nusselt sayısı değerine ulaşılmıştır. Ayrıca Nusselt sayılarındaki artış Reynolds sayısının artması ile daha belirgin hale gelmiştir. 0°'lik kanal eğiminde %0.2 hacimsel oranda nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında %14 artış gözlenirken %0.4 hacimsel oranda nanoakışkan kullanımı ile bu oran %32 civarına ulaşmıştır. 90°'lik kanal eğiminde ise benzer şekilde bu oranlar %0.2 hacimsel oran için %12 iken %0.4 hacimsel oran için %29'dur.



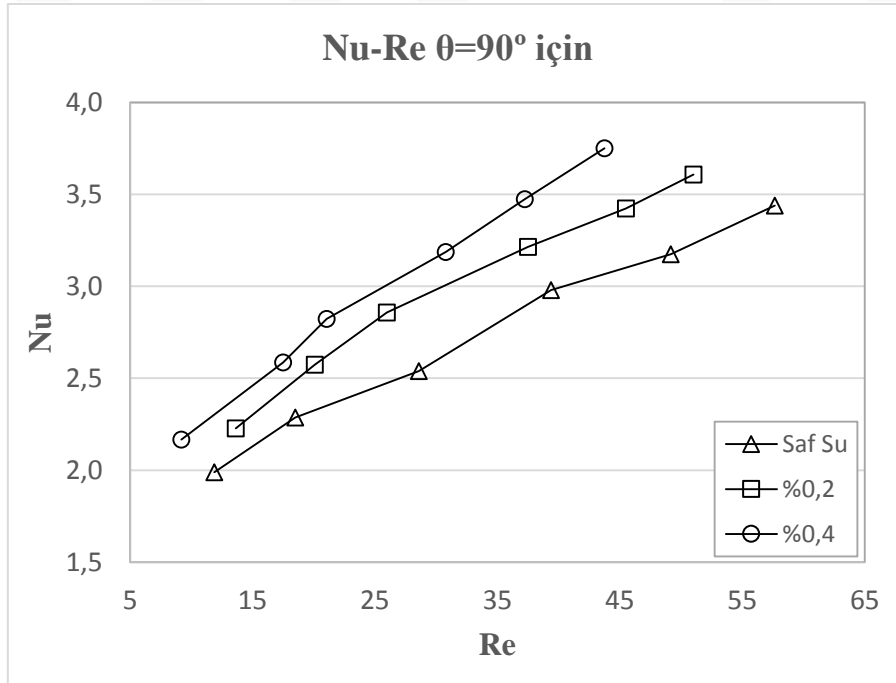
Şekil 4. 12. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4. 13. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

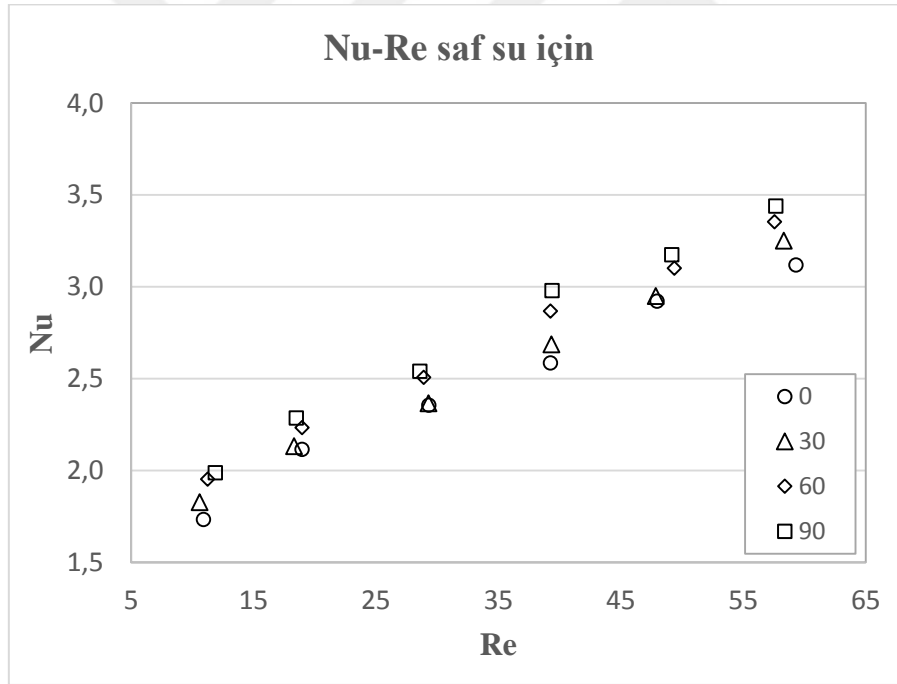


Şekil 4. 14. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

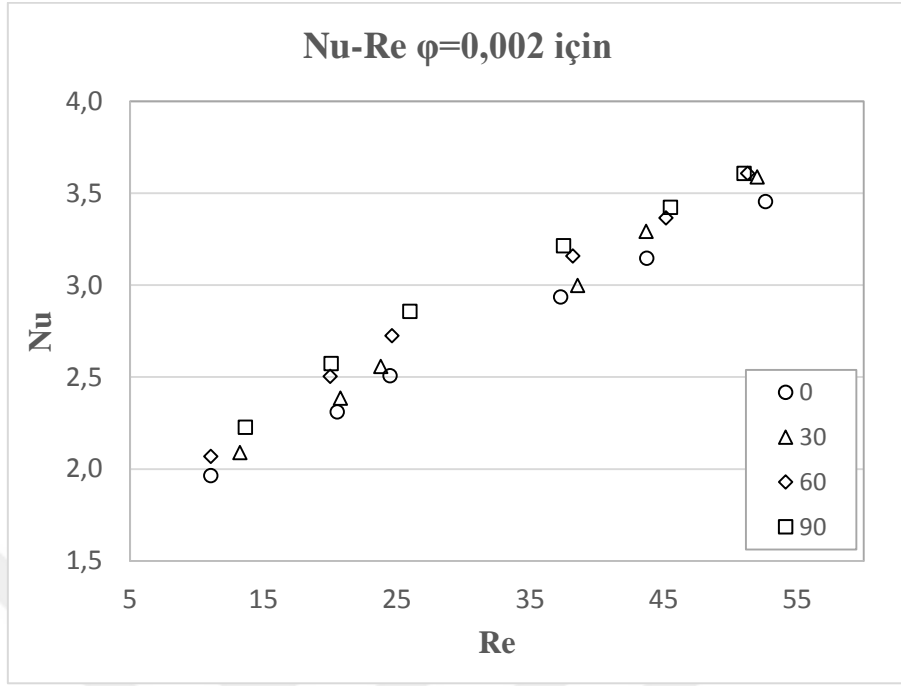


Şekil 4. 15. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

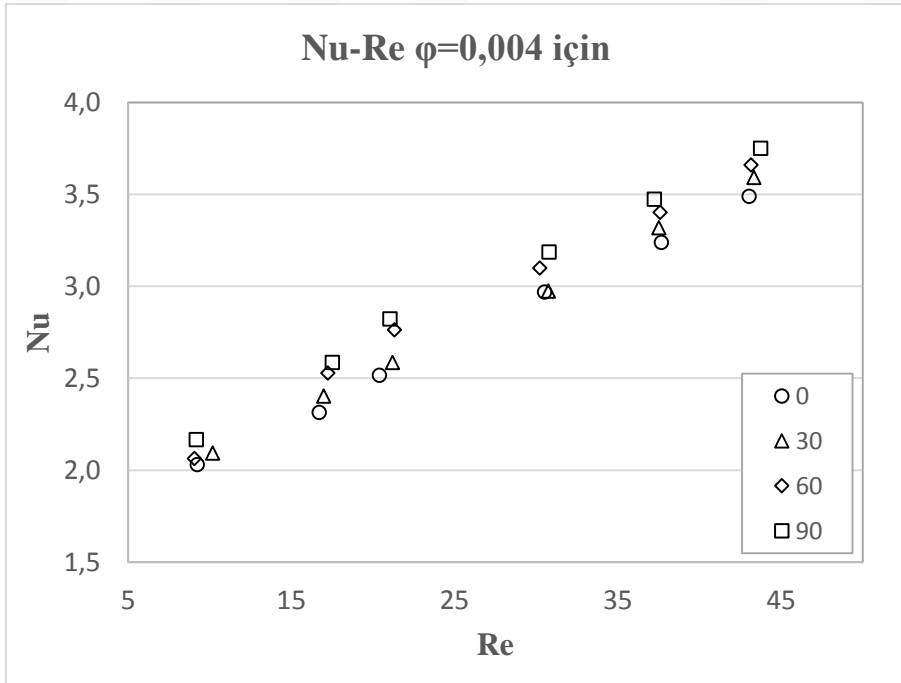
Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18’de ise farklı eğim açıları için deneysel Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi gösterilmektedir. Verilen bu şekiller sırası ile saf su, %0.2 ve 0.4 hacimsel oranda SiO₂-saf su nanoakışkanı içindir. Şekillerden de görüleceği üzere tüm Reynolds sayısı değerlerinde ve tüm akışkanlarda en yüksek Nusselt sayısı 90°’lik açı ile konumlandırılmış kanal içi gözlenmektedir. Ayrıca Tüm eğim açıları için deneysel Nusselt sayısının benzer bir eğilimde arttığından bahsedilebilir. Şimdiye kadar verilmiş grafikler incelendiğinde tüm Reynolds sayılarında, artan hacimsel nanopartikül konsantrasyonu ve eğim açısının, deneysel Nusselt sayısını belirgin şekilde arttırdığı görülmüştür. Bunun yanında en yüksek Nusselt sayısı ise 90°’lik eğim açısında ve %0.4’lük hacimsel konsantrasyonda 4.502 olarak belirlenmiştir. Ayrıca saf su için kanal eğiminde meydana gelen her 30°’lik artış Nusselt sayısını yaklaşık olarak %3 arttırmıştır. Tüm Reynolds sayısı değerlerinde benzer sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 4. 16. Farklı kanal eğimlerinde saf su için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

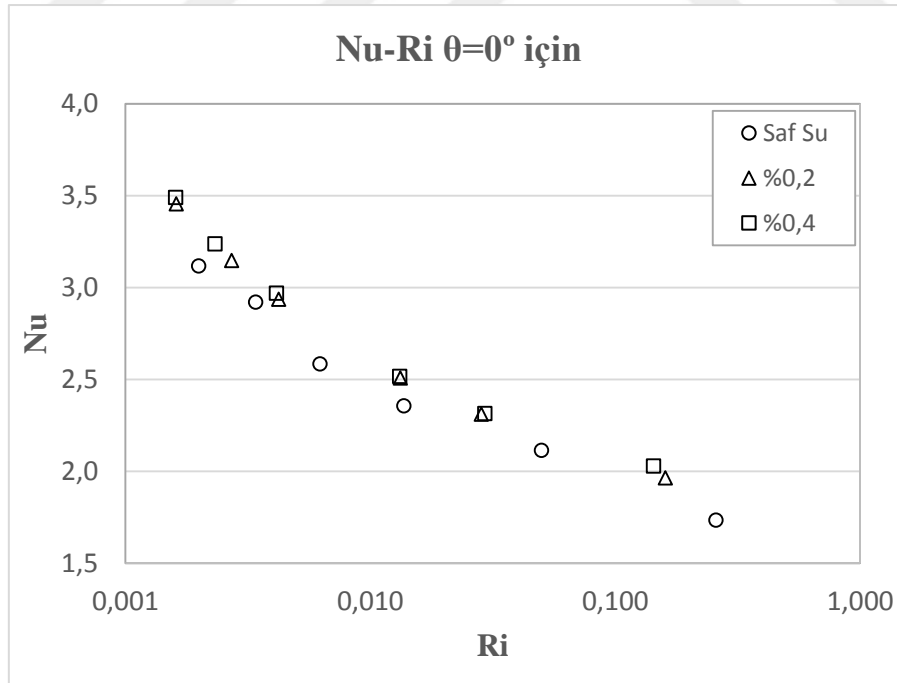


Şekil 4. 17. Farklı kanal eğimlerinde %0.2'lik hacimsel oranda SiO₂ nanoakışkanı için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

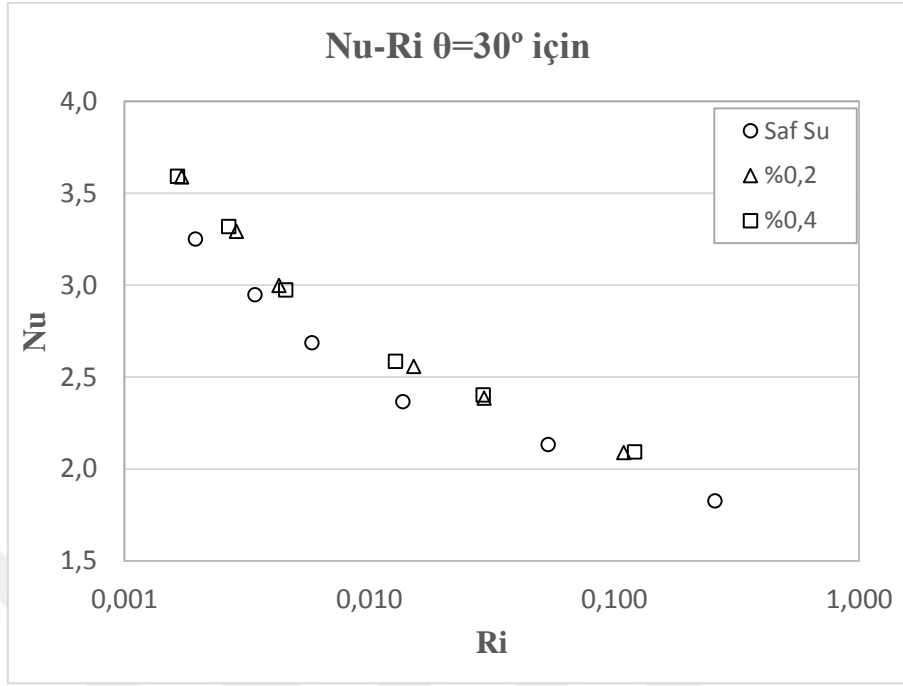


Şekil 4. 18. Farklı kanal eğimlerinde %0.4'lük hacimsel oranda SiO₂ nanoakışkanı için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

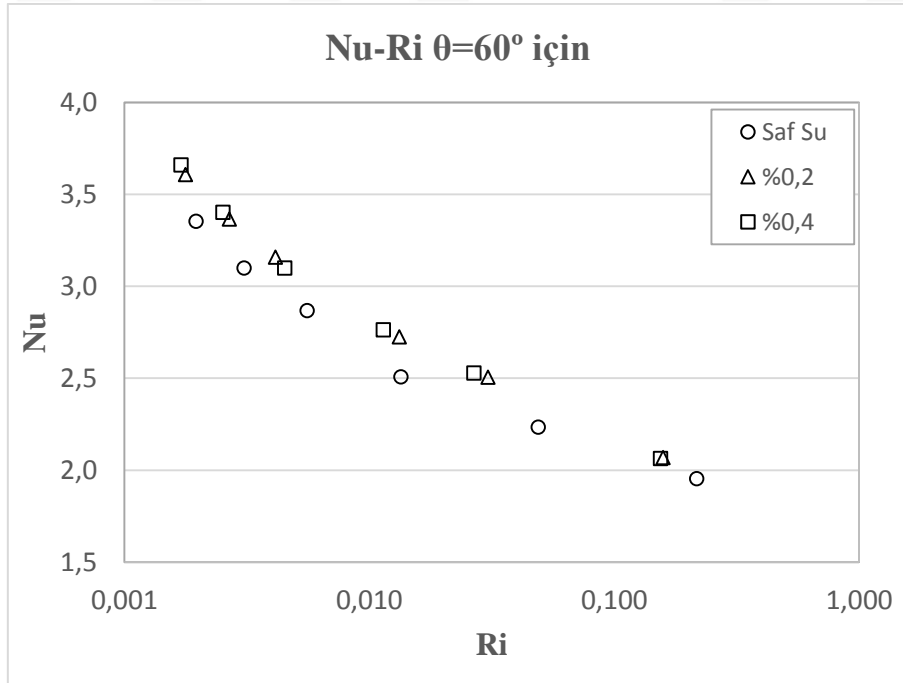
Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi Şekil 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 ve 4.25’de verilmiştir. Verilen bu şekillerden 4.19, 4.20, 4.21 ve 4.22’de kanal eğimi sabit tutulmuş, diğerlerinde kanal eğimi etkisini incelemek amacıyla sonuçlar tek bir akışkan için verilmiştir. Richardson sayısı, kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanır ve Grashof sayısının Reynolds sayısı karesine bölünmesi ile hesaplanır. Griş kısmında da bahsedildiği gibi taşınım mekanizmasının tamamen zorlanmış taşınım olması için Richardson sayısının 1’den çok büyük, tamamen doğal taşınım olması için ise 1’den çok küçük olması gerekmektedir. Şekiller incelendiğinde elde edilen ısı transferi sonuçlarının karma taşınımınla ısı transferi mekanizmasının etkin olduğu Richardson sayısı aralığında kaldığı açıkça görülebilmektedir. Tüm şekillerde Richardson sayısındaki artış ile Nusselt sayısı yani ısı transferi azalmıştır. Richardson sayısının artışı Grashof sayısındaki artışın Reynolds sayısındaki artıştan daha baskın olması ile mümkündür. Reynolds sayısının Grashof sayısından daha az etkili olması ise kaldırma kuvvetlerinin atalet kuvvetlerinden daha baskın olması anlamına gelmektedir. Bu durumda, Richardson sayısı sabit tutulduğunda en yüksek Nusselt sayısına %0.4 hacimsel orandaki nanoakışkanda ve 90° kanal eğiminde ulaşılmıştır.



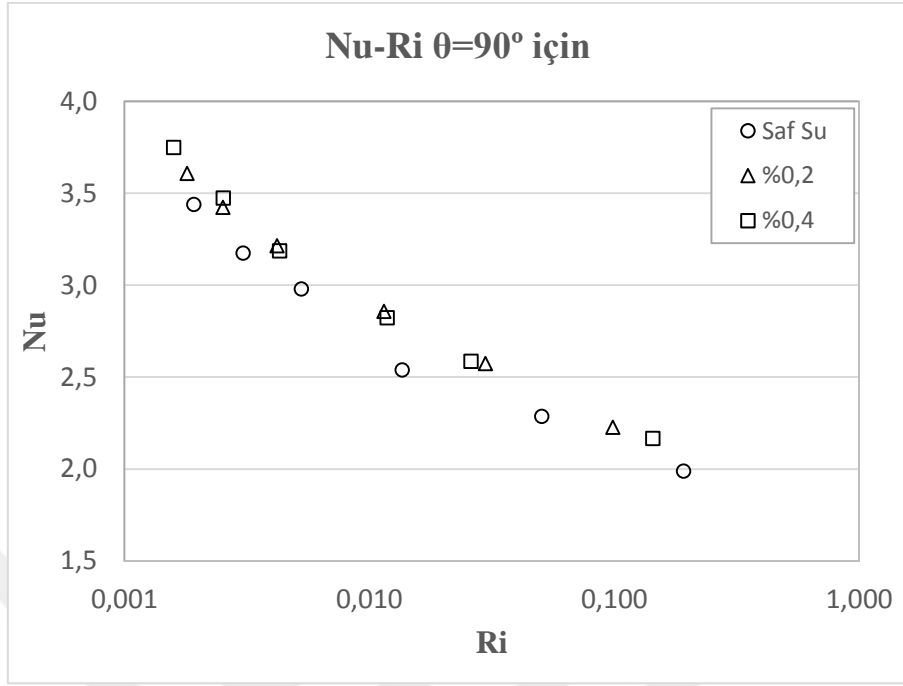
Şekil 4. 19. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



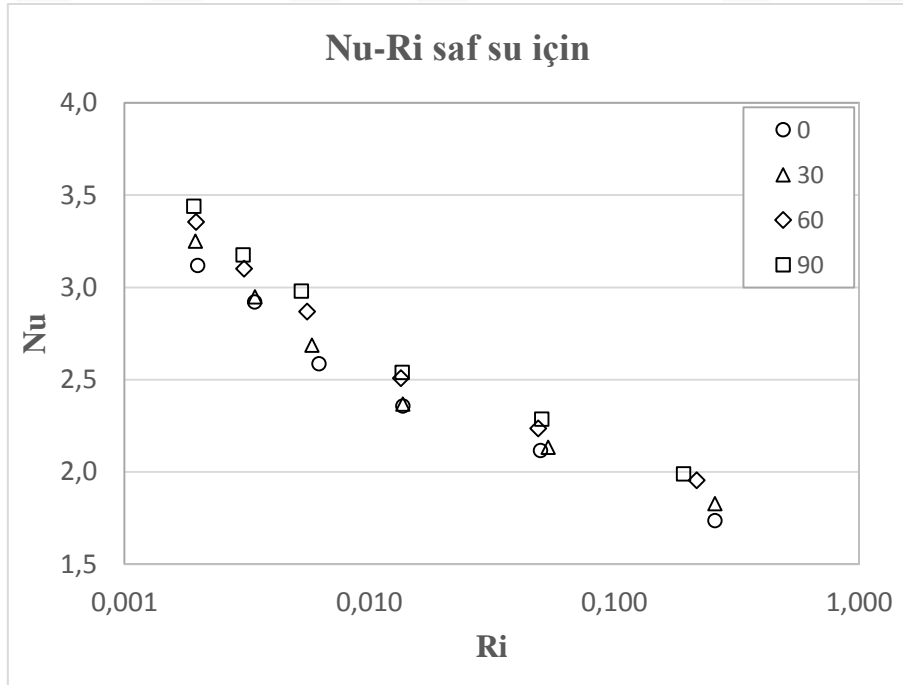
Şekil 4. 20. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



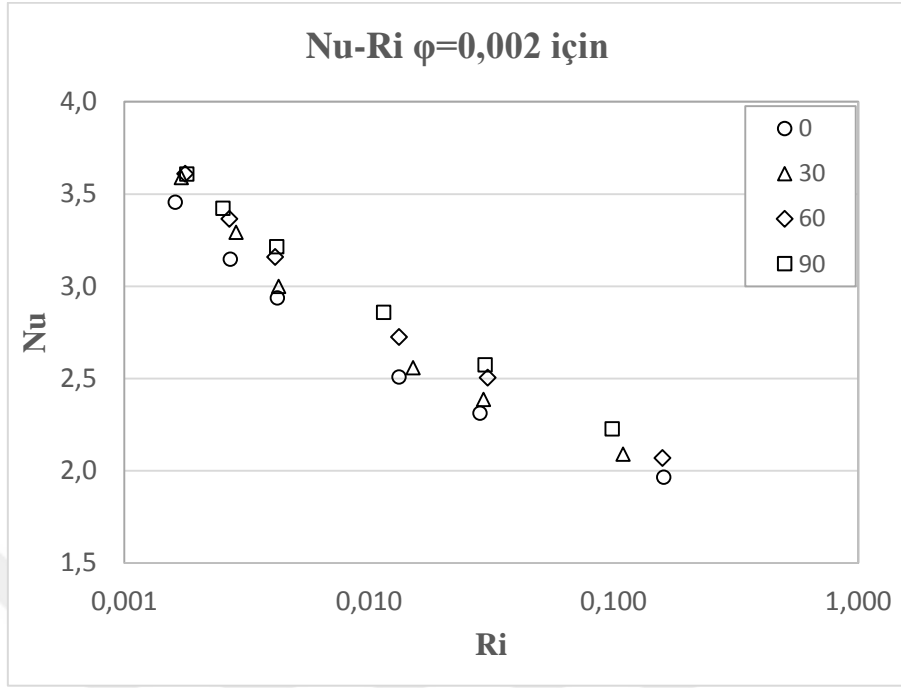
Şekil 4. 21. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



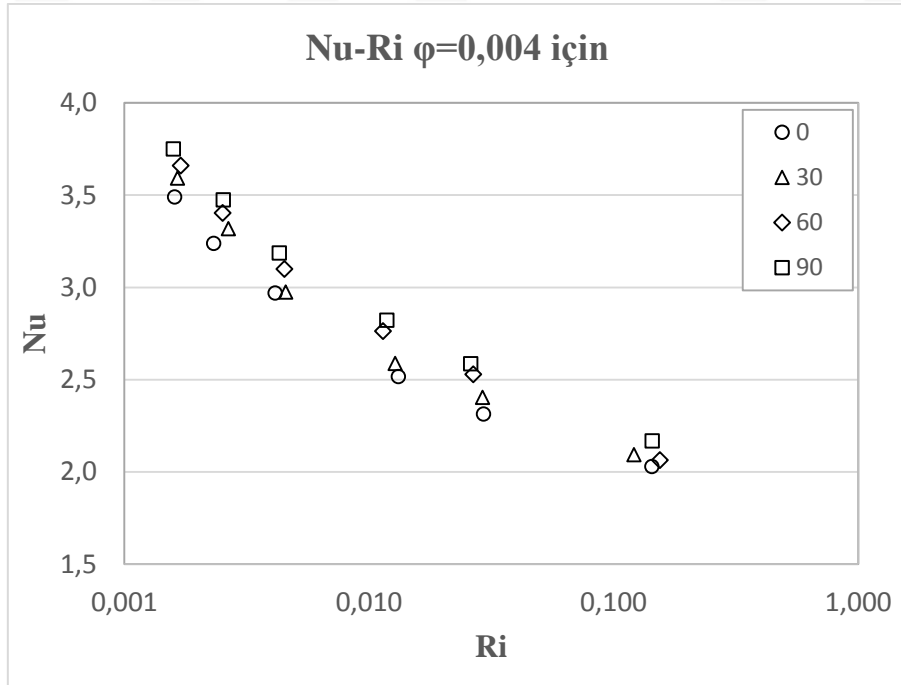
Şekil 4. 22. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi



Şekil 4. 23. Farklı kanal eğimlerinde saf su için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi

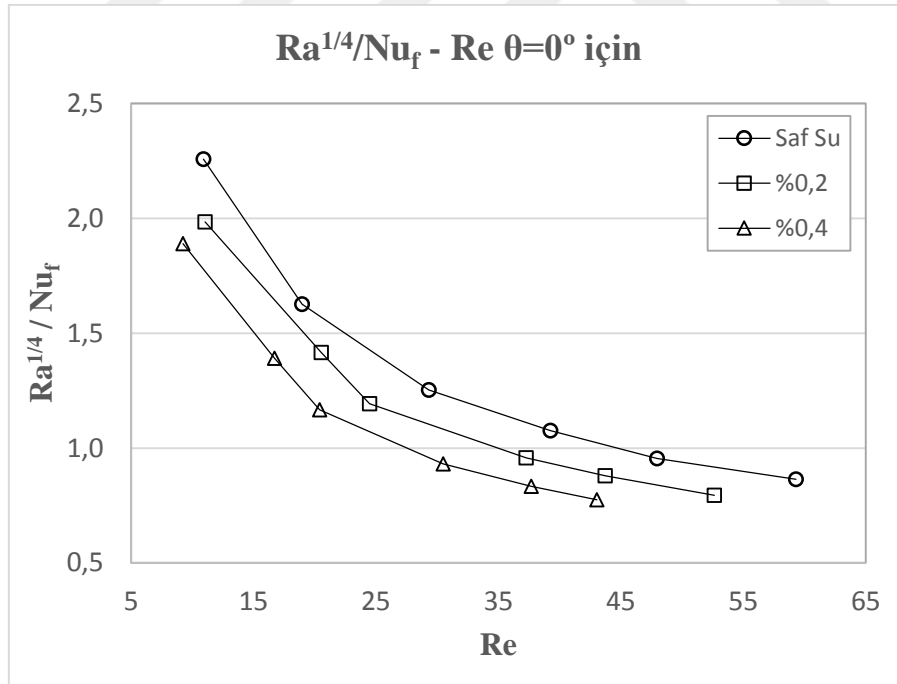


Şekil 4. 24. Farklı kanal eğimlerinde %0.2'lik hacimsel oranda SiO₂ nanoakışkanı için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi

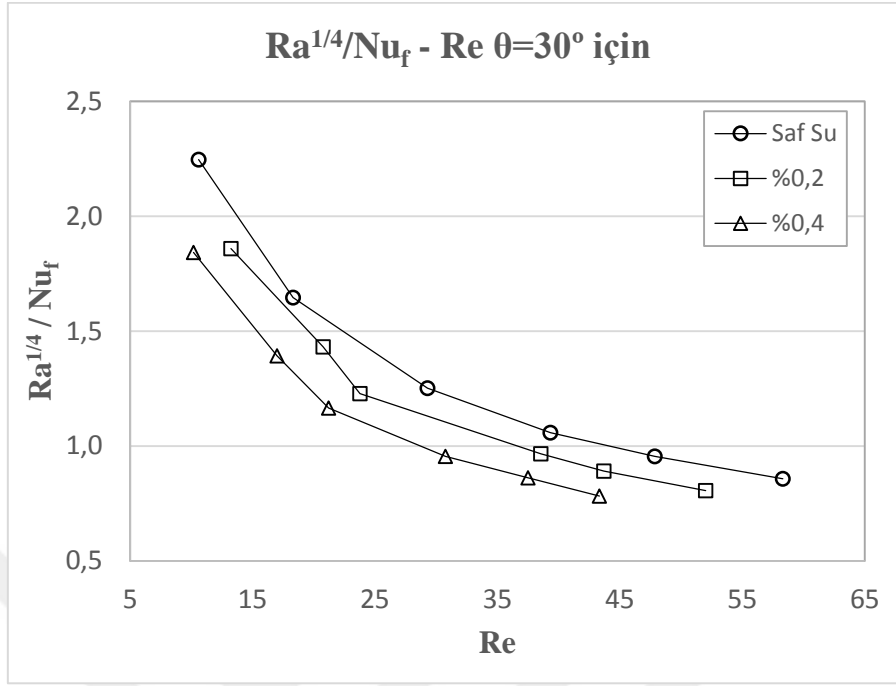


Şekil 4. 25. Farklı kanal eğimlerinde %0.4'lük hacimsel oranda SiO₂ nanoakışkanı için Nusselt sayısının Richardson sayısı ile değişimi

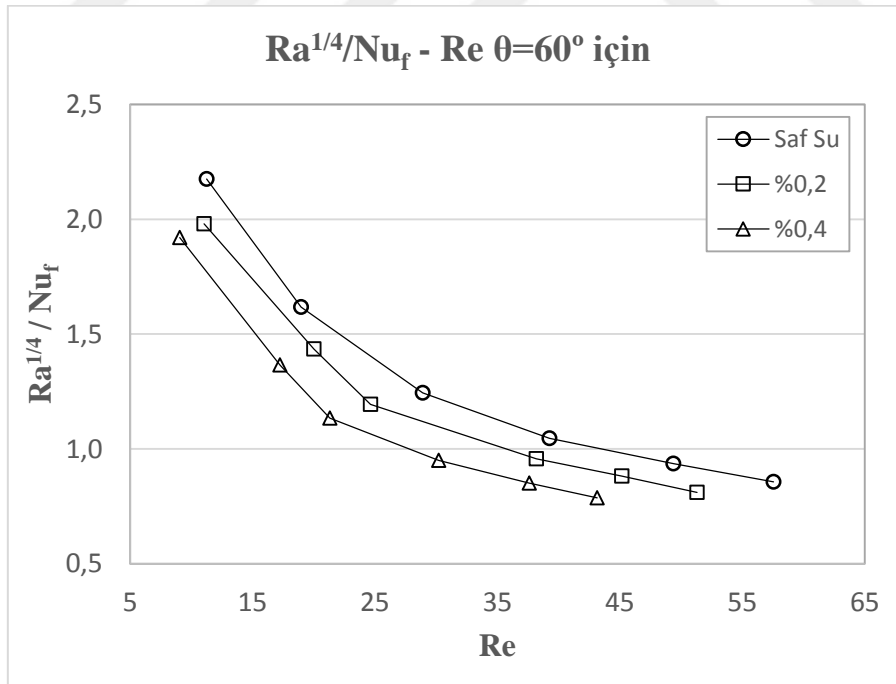
Şekil 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29’da sırası ile 0, 30, 60 ve 90°’lik açılarla konumlandırılmış mikrokanal için Reynolds sayısına karşılık $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin değişimi gösterilmiştir. Bu $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesi, Shannon ve Depew (1969)’in çalışması dikkate alınarak oluşturulmuştur. Burada $Ra^{1/4}$ terimi toplam ısı transferinin yalnızca doğal taşınım bileşenini temsil ederken Nu_f terimi ise Graetz sayısının bir fonksiyonu olarak yalnızca zorlanmış taşınımı temsil etmektedir. Yani bu ifadede toplam ısı transferinde doğal taşınım etkinliği ile zorlanmış taşınım etkinliği oranlanmış olur. Tüm eğim açılarında $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesi değerinin Reynolds sayısının artışı ile hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Bu düşüşün sebebi olarak ise Reynolds sayısının artışı ile Richardson sayısının “0.01” değerine yaklaşması, yani ısı transferi mekanizmasının zorlanmış taşınım şartlarına yönelmesidir. Özellikle $Re=35$ değerinden sonra, hem saf su hem de nanoakışkanlarda zorlanmış taşınım ile ısı transferi daha baskın hale gelmektedir. Reynolds sayısının artışı akış içerisinde atalet kuvvetlerin kaldırma kuvvetlerinden daha baskın hale gelmesine yol açmaktadır. Yani Reynolds sayısındaki artışla doğal taşınım etkileri önemini yitirmektedir.



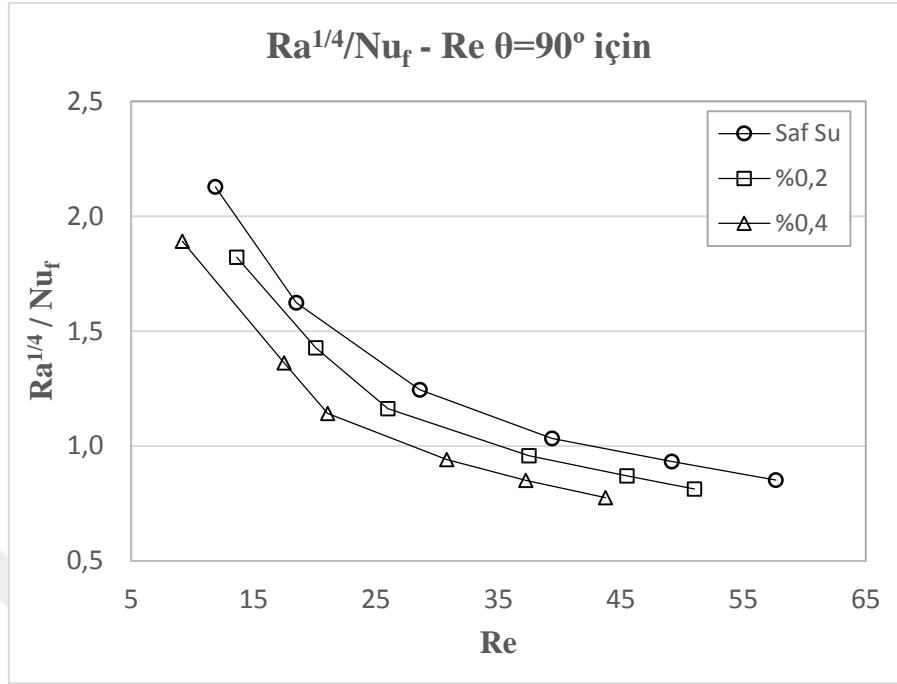
Şekil 4. 26. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Reynolds sayısıyla değişimi



Şekil 4. 27. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Reynolds sayısı ile değişimi

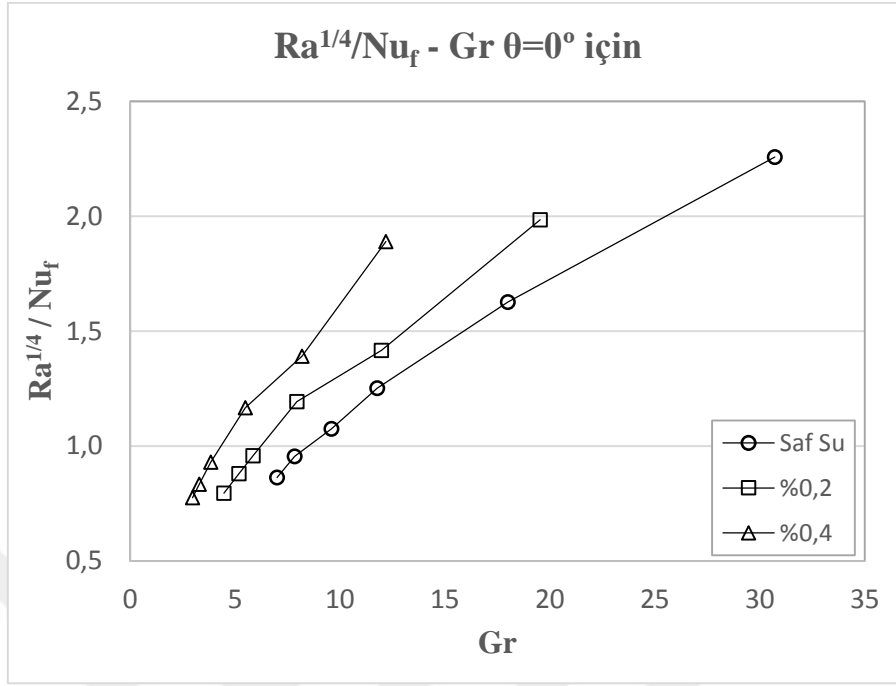


Şekil 4. 28. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Reynolds sayısı ile değişimi

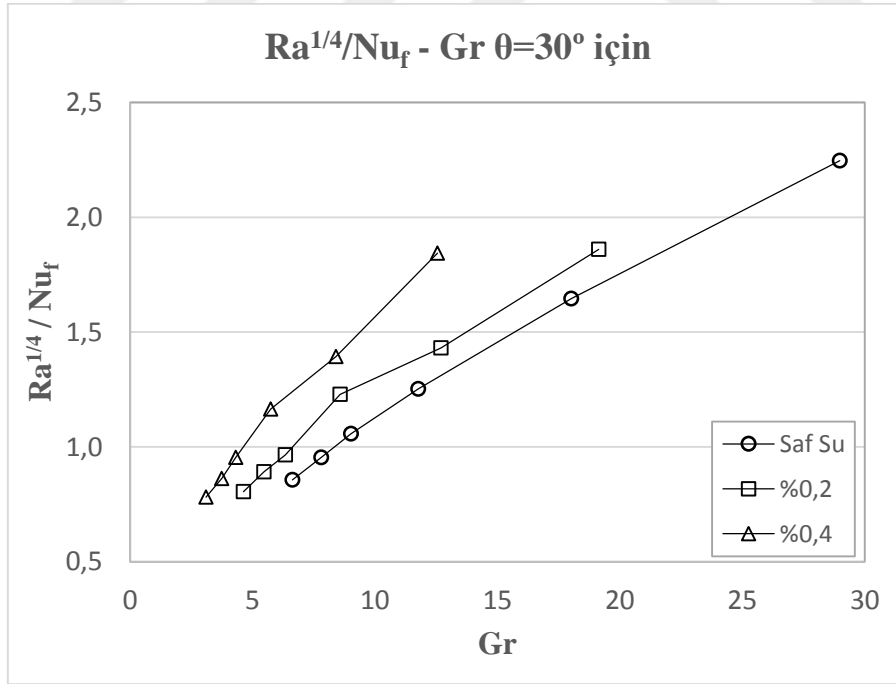


Şekil 4. 29. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Reynolds sayısı ile değişimi

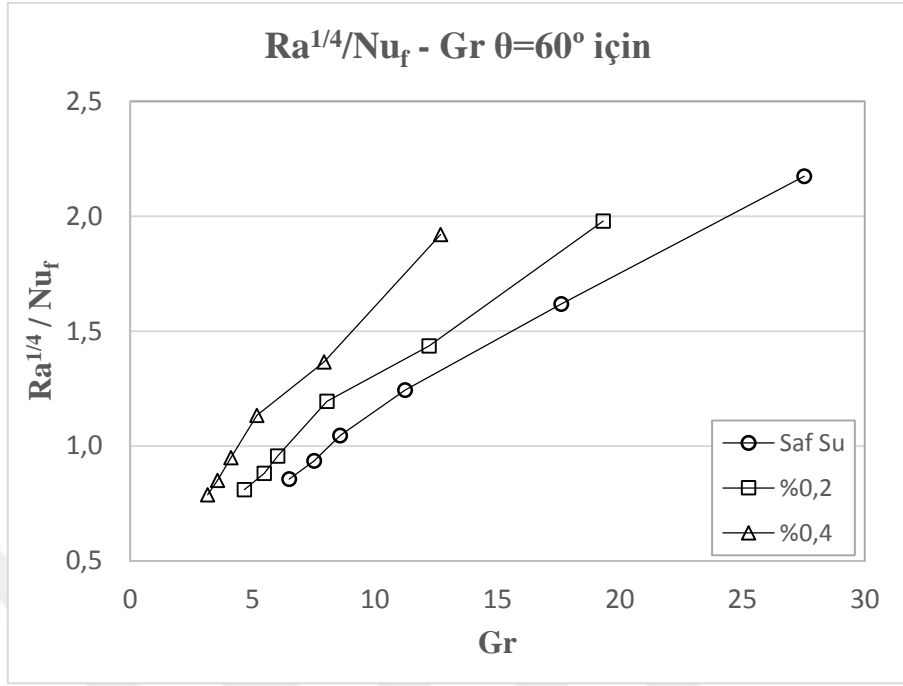
$Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Grashof sayısı ile değişiminin içeren grafikler Şekil 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33'de verilmiştir. Grashof sayısının artışıyla toplam ısı transferinde doğal taşınımın zorlanmış taşınım oranı olarak tanımlanan $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesi artmıştır. Bu durum beklenen bir sonuçtur. Çünkü Grashof sayısı, kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanır ve bu sayıdaki yükselme kaldırma kuvvetlerinin etkinliğinin artması anlamına gelir. Ayrıca şekiller incelendiğinde tüm kanal eğimlerinde sabit bir Grashof sayısında temel akışkan içerisine nanopartikül ilavesi $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin artmasına sebebiyet vermiştir. Bu durum nanoakışkanların Prandtl sayısının, temel akışkanın Prandtl sayısının üstüne çıkmasıyla ilgilidir. SiO_2 nanopartikülü ilavesi ile akışkan viskozitesindeki (viskoz yayını tetikleyen termofiziksel özellik) artış ısı iletkenliğindeki (termal yayını tetikleyen termofiziksel özellik) artıştan büyüktür. Prandtl sayısı viskoz yayının termal yayına oranı olarak tanımlanır ve sabit bir Grashof sayısında Prandtl sayısının artışı Rayleigh sayısını yani doğal taşınım etkinliğini arttırmıştır.



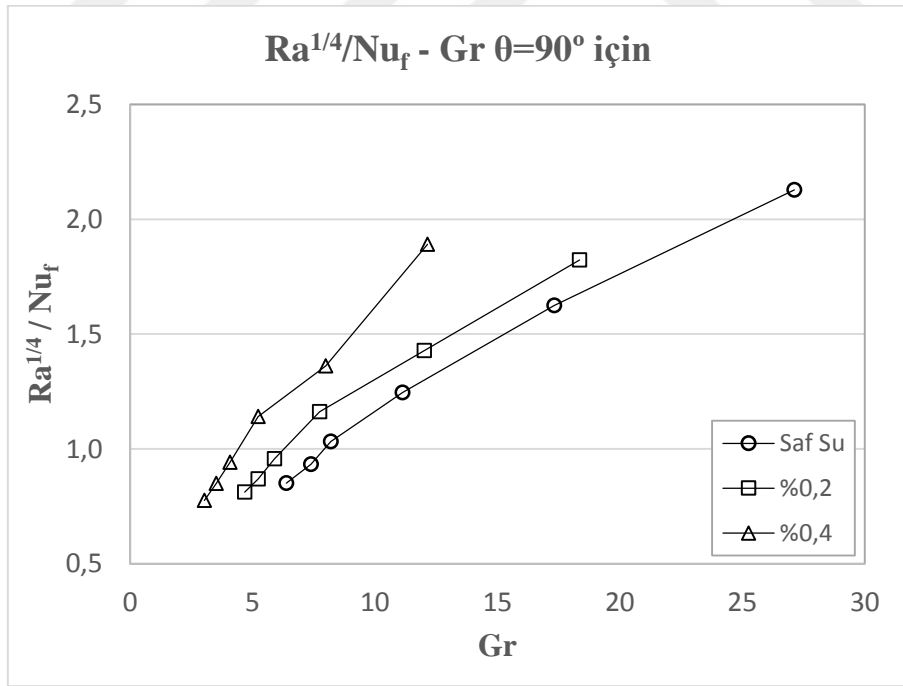
Şekil 4. 30. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Grashof sayısı ile değişimi



Şekil 4. 31. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında $Ra^{1/4}/Nu_f$ 'nin Grashof sayısı ile değişimi

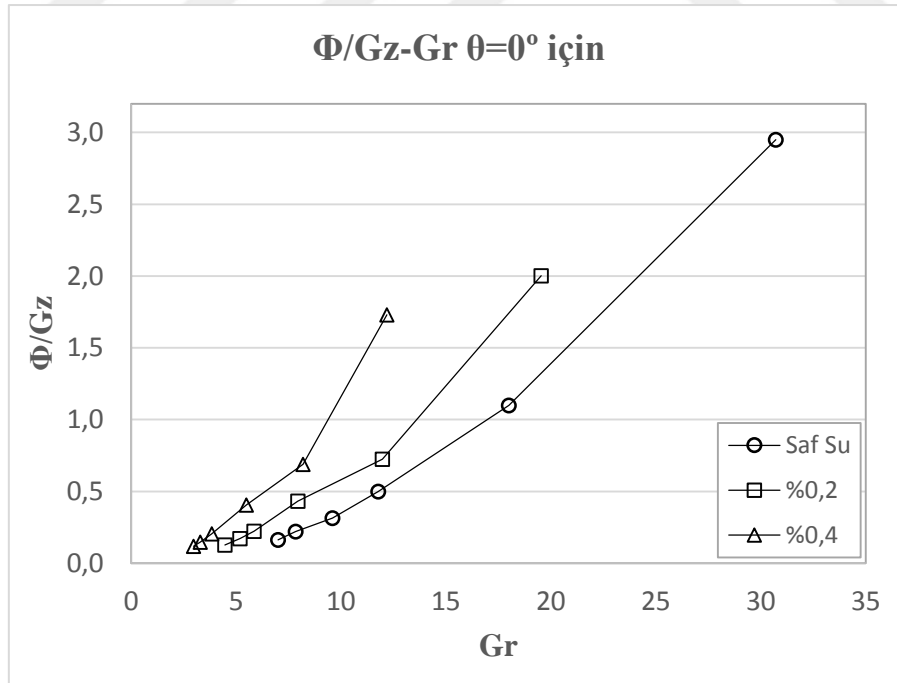


Şekil 4. 32. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında Ra^{1/4}/Nu_f'nin Grashof sayısıyla değişimi

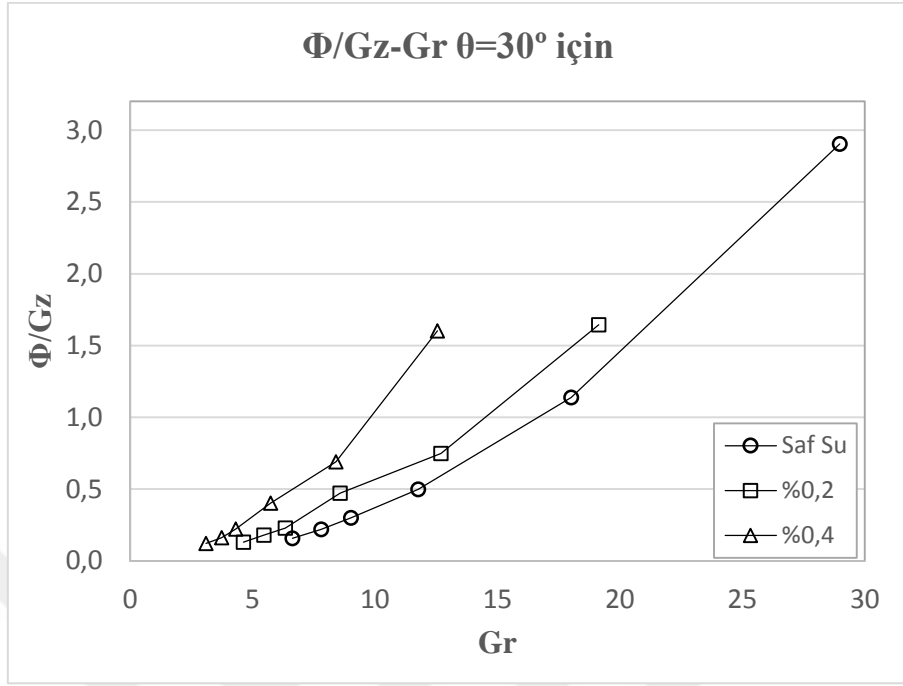


Şekil 4. 33. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında Ra^{1/4}/Nu_f'nin Grashof sayısıyla değişimi

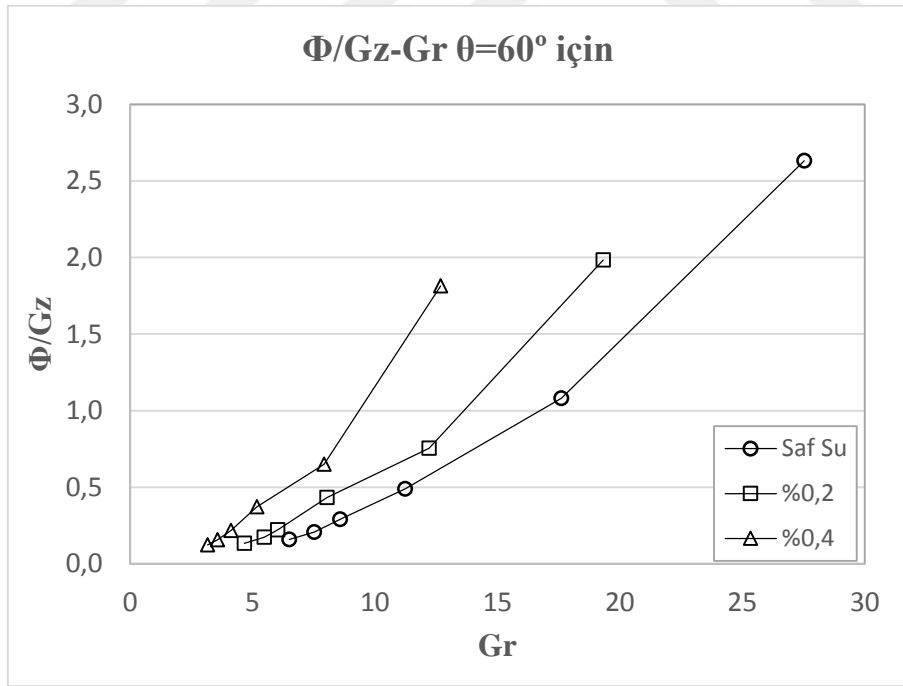
Şekil 4.34, 4.35 4.36 ve 4.37’de Φ/Gz ifadesinin saf su ve farklı hacimsel oranlardaki nanoakışkanlar için Grashof sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Burada Φ/Gz ifadesi doğal taşınımın toplam ısı transferine oranının bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Yani verilen herhangi bir Grashof sayısında Φ/Gz ifadesinin değeri ne kadar büyük olursa, doğal taşınım etkisi de o kadar önemlidir. Şekillerden de görüldüğü üzere Grashof sayısındaki artışla tüm akışkanlarda karma taşınımındaki doğal taşınım bileşeninin önemi yani Φ/Gz değeri de artmıştır. Bu durum tüm kanal eğimleri (0, 30, 60, 90°) için geçerlidir. Çok düşük Grashof sayılarında Φ/Gz değerinin ‘0’ değerine yaklaştığı görülmektedir. Böyle bir durumda taşınım ile ısı transferinde doğal taşınım etkilerinden bahsedilemez. Ayrıca temel akışkan içerisine partikül ilavesi ve partikül hacimsel oranındaki artış da Φ/Gz ifadesinin değerini arttırmıştır. Yüksek Grashof sayılarında, Φ/Gz ifadesindeki artış daha belirginleşmektedir. Φ/Gz değeri sabit bir Grashof sayısında İki fazlı akış yaklaşımı ile incelenirse hacimsel partikül oranındaki artışın doğal taşınım bileşenine olumlu katkıda bulunuşu, Brownian hareketleri ve/veya Termoforez kuramına bağlanabilir. Hacimsel partikül yoğunluğundaki artış bu iki fenomenin etkinliğini artırmakta, dolayısı doğal taşınım etkisi de artmaktadır.



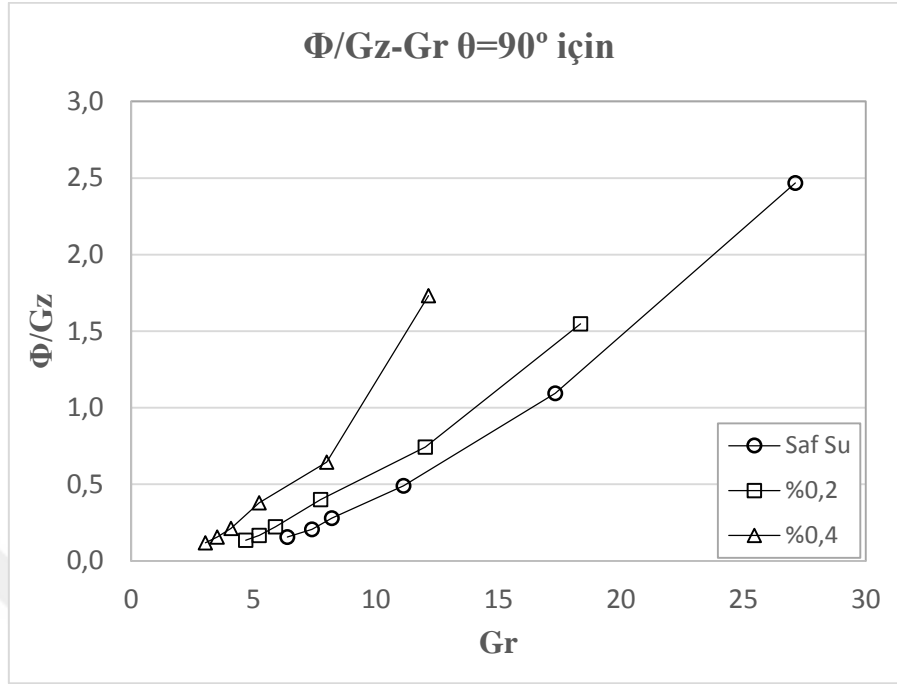
Şekil 4. 34. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında Φ/Gz 'in Grashof sayısıyla değişimi



Şekil 4. 35. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında Φ/Gz 'in Grashof sayısı ile değişimi

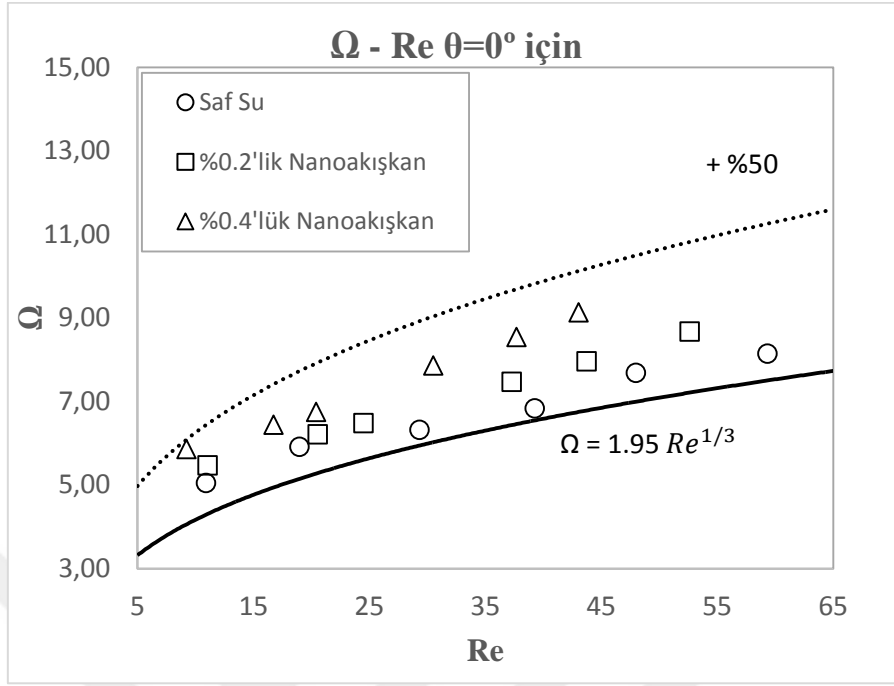


Şekil 4. 36. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında Φ/Gz 'in Grashof sayısı ile değişimi

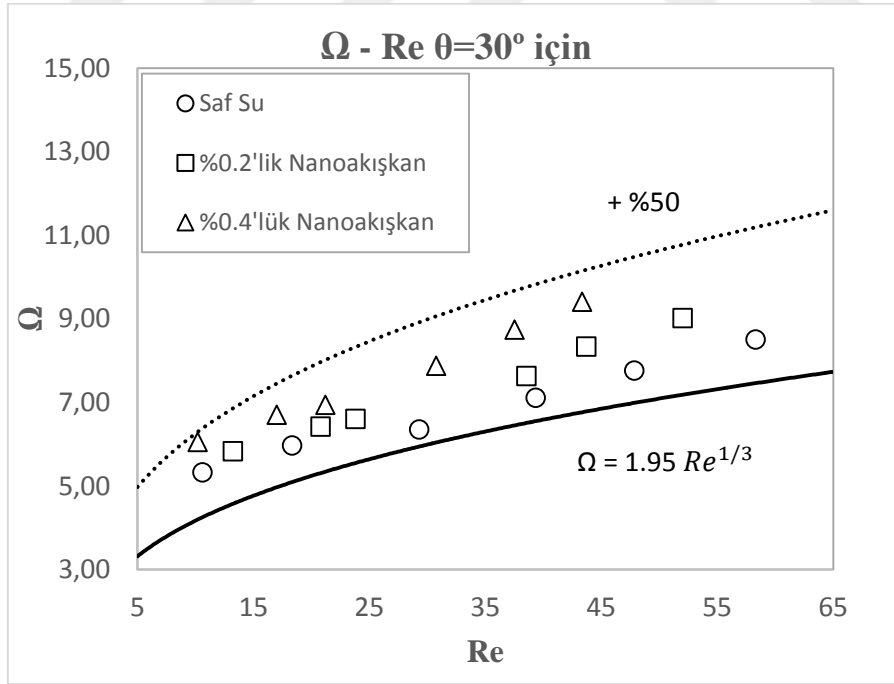


Şekil 4. 37. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında Φ/Gz 'in Grashof sayısıyla değişimi

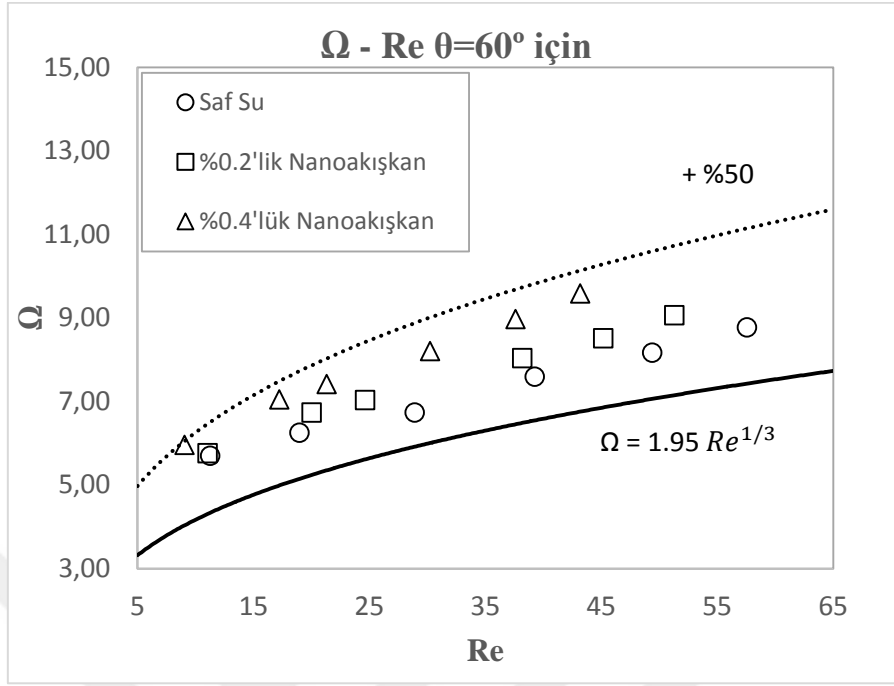
Reynolds sayısının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi olarak tanımlanan Ω ile ilgili sonuçlar ise Şekil 4.38, 4.39, 4.40 ve 4.41'de verilmiştir. Bu sonuçlarda sırası ile 0, 30, 60 ve 90°'lik mikrokanal eğimleri içindir. Şekiller üzerindeki $1.95 \times Re^{1/3}$ eğrileri saf zorlanmış taşınımı temsil eder. Bu eğrinin üzerinde kalan tüm deneysel sonuçlar için doğal taşınım etkisinden bahsetmek mümkündür. Ayrıca şekillerde $1.95 \times Re^{1/3}$ eğrisinin üzerinde kesikli olarak gösterilmiş olan eğri aynı ifadenin %50 arttırımlı halidir. Şekillerden açıkça görüldüğü üzere tüm sonuçlar saf zorlanmış taşınım eğrisinin üzerindedir. Ek olarak en yüksek Ω değeri tüm eğim açılarında ve tüm Reynolds sayılarında %0.4 hacimsel partikül oranındaki SiO_2 -saf su nanoakışkanına aittir. Tüm mikrokanal eğimlerinde %0.4'lük nanoakışkanın sonuçları %50 arttırımlı $1.95 \times Re^{1/3}$ eğrisine yakın seyretmiştir. Bu durum toplam ısı transferinde saf zorlanmış taşınım ile ısı transferinin %50'si ne varan doğal taşınım etkilerinin olduğu anlamına gelir. Ayrıca Şekil 3.38'de yani yatayla 0°'de konumlandırılmış mikrokanalda tüm akışkanlar için ısı transfer verileri saf zorlanmış taşınım eğrisine en yakın durumdadır. Kanal eğimindeki artış ile tüm ısı transferi verilerinde %50 arttırımlı $1.95 \times Re^{1/3}$ eğrisine yaklaşma gözlemlenmiştir. Bu durum sebebi ise eğim açısındaki artışın doğal taşınım bileşenini kuvvetlendirmesidir.



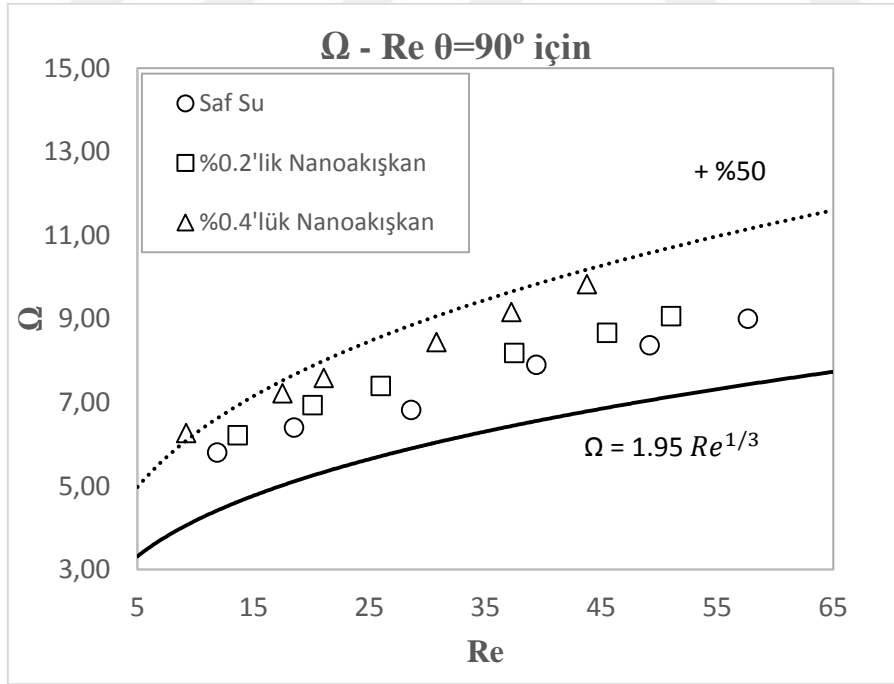
Şekil 4. 38. Farklı akışkanlar için 0° eğim açısında Ω değerinin Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4. 39. Farklı akışkanlar için 30° eğim açısında Ω değerinin Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4. 40. Farklı akışkanlar için 60° eğim açısında Ω değerinin Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 4. 41. Farklı akışkanlar için 90° eğim açısında Ω değerinin Reynolds sayısı ile değişimi

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada 0, 30, 60 ve 90° açılarda konumlandırılmış, 500 µm'lik hidrolik çapa sahip bir mikrokanal içeren test bölgesinde karma taşınım ile ısı transferi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde Reynolds sayısı 5-55 aralığında tutulmuştur. İş akışkanı olarak saf su ve farklı hacimsel oranlarda su bazlı SiO₂ nanoakışkanı kullanılmıştır. Deneyler sonunda elde edilen önemli sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

- İş akışkanı olarak kullanılacak nanoakışkanlar iki adım yöntemi ile hazırlanmıştır. 8 saat süreyle ultrasonik homojenizatörde, karıştırma/dağıtma işlemine tabi tutularak hazırlanan nanoakışkanlarda herhangi bir kararlılık problemi görülmemiştir.
- Saf su ve farklı hacimsel oranlardaki saf su bazlı SiO₂ nanoakışkanlarının 20-60°C sıcaklık aralığında ısı iletkenlik ve dinamik viskozite ölçümleri yapılmıştır.
- Saf suya nanopartikül ilavesinin ısı iletkenliği arttırdığı saptanmıştır. Ayrıca artan hacimsel partikül oranı ile nanoakışkanın ısı iletkenliğinin artacağı belirlenmiştir. Bunun yanında artan sıcaklık ile tüm hacimsel yüzdelerdeki nanoakışkanlarda ve saf suda ısı iletkenliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek partikül oranında sıcaklığın ısı iletkenlik üzerindeki etkisi daha belirgin olmuştur.
- Nanoakışkanlarda hacimsel partikül oranının artış viskoziteyi de arttırmıştır. 20-60°C aralığında yapılan ölçümlerde tüm sıcaklıklar için nanoakışkanların viskozite değerleri saf suyun viskozite değerinin üzerindedir. Ayrıca artan sıcaklıkla saf su ve nanoakışkanların viskozitelerinde düşüş gözlenmiştir. Tüm akışkanlar için viskozitenin sıcaklık ile değişimi hemen hemen aynı eğilimdir.
- En yüksek ısı iletkenlik değeri %0.4 hacimsel oranda ve 60°C'daki nanoakışkanda 0.679 W/m²K olarak okunmuş ve bu durumda saf suya göre ısı iletkenlik katsayısında artış %8 civarında olmuştur.

- En düşük viskozite değeri ise 20°C'deki saf su numunesinde 4.37×10^{-4} kg/m.s olarak ölçülmüştür. Ayrıca tüm sıcaklıklarda %0.4 hacimsel partikül oranına sahip SiO₂-saf su nanoakışkanında saf suya oranla %40 civarında viskozite artışı belirlenmiştir.
- Nanoakışkanlar için SEM (Scanning Electron Microscope) görüntüleri alınmıştır. Alınan görüntüler incelenerek akışkan içerisindeki partiküllerin şekil ve boyutları doğrulanmıştır. Buna ek olarak partiküllerin akışkan içerisinde homojen bir dağılıma sahip oldukları belirlenmiştir.
- Saf su için ısı transferi verileri literatürdeki Brown-Thomas, Oliver, McAdams ve Eubank-Proctor modelleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen ısı transferi sonuçları literatürle iyi bir uyum içindedir.
- Kanal eğim farklı değerlerde sabit tutularak saf su, %0.2 ve %0.4 hacimsel oranda nanoakışkan kullanılan durumlarda ve kullanılan akışkanlardan herhangi biri için kanal eğiminin değiştirildiği durumlarda taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi incelenmiştir. En yüksek taşınım katsayısı kanalın yatay ile 90° açı yaptığı durumda %0.4'lük nanoakışkan için 4757 W/m²K olarak belirlenmiştir.
- Farklı kanal eğimlerinde ve farklı akışkanlar kullanıldığı durumda Nusselt sayısı ile Reynolds sayısı arasındaki ilişki detaylı şekilde incelenmiştir. Sonuç olarak hacimsel partikül konsantrasyonu ve kanal eğimindeki artışın ısı transferini arttırdığı ortaya konmuştur.
- Hacimsel partikül oranındaki artışla ısı transferinde gerçekleşen artışa neden olan fenomen Brownian hareketidir. Brownian hareketi sonucu oluşacak mikrotaşınım etkilerinin ısı transferini arttıracaktır.
- Kanal eğiminin artışı ile ısı transferinde meydana gelen artışın sebebi ise doğal taşınım mekanizmasının oluşturduğu ikincil akışların zorlanmış akış yönünü destekler hale gelmesidir. Kanal yatay durumda iken birbirine dik olan zorlanmış ve doğal akışlar,

kanal eğiminin artması ile bir birbirlerini destekleyen duruma gelir ve kanalın yatay ile 90° yaptığı durumda tamamen aynı yönlü olur. İşte bu durum ısı transferini attırır.

- 0°'lik kanal eğiminde %0.2 hacimsel oranda nanoakışkan kullanımı ile saf suya göre Nusselt sayısında %14 artış gözlenirken %0.4 hacimsel oranda nanoakışkan kullanımı ile bu oran %32 civarına ulaşmıştır. 90°'lik kanal eğiminde ise benzer şekilde bu oranlar %0.2 hacimsel oran için %12 iken %0.4 hacimsel oran için %29'dur.
- Kanal eğimindeki her 30° artışla toplam Nusselt sayısında %3 civarında artış gözlemlenmiştir. Yani mikrokanalın yatay konumdan dikey konuma getirilmesi ile Nusselt sayısında %10 a varan bir artış elde edilmiştir.
- Yapılan tüm deneyler için Richardson sayısı değeri 0.0015 ile 0.2 aralığında kalmıştır. Bu durum etkin ısı transferi mekanizmasının karma taşınım olduğunu göstermektedir. Farklı akışkanlar için Richardson sayısı ile Nusselt sayısı arasındaki ilişki de incelenmiştir. Richardson sayısındaki artış ile tüm kanal eğimlerinde ve hacimsel oranlarında ısı transferinde azalma gözlemlenmiştir.
- Karma taşınım ile ısı transferinde doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin kıyaslanmasında doğal taşınımın zorlanmış taşınım oranının bir ölçüşünü olan $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinden ve yine doğal taşınımın toplam ısı transferine oranını bir ölçüşü olan Φ/Gz ifadesinden faydalanılmıştır.
- $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin Reynolds ve Grashof sayıları ile değişimini veren grafikler sunulmuştur. Grashof sayısındaki artışın toplam ısı transferinde doğal taşınım etkinliğinin artmasına sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca artan Reynolds sayısı ile $Ra^{1/4}/Nu_f$ ifadesinin azaldığı yani doğal taşınım etkisinin azaldığı ve ısı transferinde zorlanmış taşınım şartlarına yaklaşıldığı belirlenmiştir.
- Belirli bir Grashof sayısında Φ/Gz ifadesinin partikül hacimsel oranı ile attığı göze çarpmaktadır. Yani hacimsel partikül oranındaki artış ısı transferi içerisindeki doğal

taşınım bileşenin etkisini attırmıştır. Bu artışa sebebiyet veren fenomenler Brownian hareketleri ve/veya Termoforez kuramıdır.

- Reynolds sayısını Nusselt sayısı üzerindeki etkisi olarak tanımlanan Ω ile ilgili sonuçlar da grafikler halinde sunulmuştur. Grafikler üzerinde $1.95xRe^{1/3}$ eğrileri oluşturulmuştur ve bu eğriler saf zorlanmış taşınımı temsil etmektedir. Tüm sonlar bu eğrilerin belirgin şekilde üzerinde kalmıştır. Yani toplam ısı transferinde büyük oranda doğal taşınım etkisi görülmektedir. %0.4 hacimsel oranda nanoakışkan için Ω ifadesinin değeri saf suya oranla %50 civarında artmıştır.
- Ayrıca artan kanal eğimiyle Ω ifadesinin değeri $1.95xRe^{1/3}$ (saf zorlanmış taşınım) eğrilerinden belirgin şekilde uzaklaşmıştır. Bu durum ikincil akışların zorlanmış akışları destekler yönde etkimesinin bir sonucudur.

KAYNAKLAR

- Agarwal, A., Bandhauer, T.M., Garimella, S., 2010. Measurement and modeling of condensation heat transfer in non-circular microchannels. *International Journal of Refrigeration*, 33, 1169-79.
- Al-Kayiem, H.H., Lin, S.C., Lukmon, A., 2013. Review on nanomaterials for thermal energy storage technologies. *Nanoscience and Nanotechnology-Asia*, 3, 60-71.
- Angayarkanni, S.A., Philip, J., 2014. Effect of Nanoparticles aggregation on thermal and electrical conductivities of nanofluids. *Journal of Nanofluid*, 3, 17-25.
- Angayarkanni, S.A., Philip, J., 2015. Review on thermal properties of nanofluids: recent developments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 225, 146-176
- Anjali, S.P., Suriyakumar, P., 2013. Numerical investigation of mixed convective hydromagnetic nonlinear nanofluid flow past an inclined plate. *International conference on mathematical sciences and statistics, (ICMSS2013) AIP Conference Proceedings*, 1557, 281-285.
- Anoop, K.B., Kabelac, S., Sundararajan, T., Das, S.K., 2009. Rheological and flow characteristics of nanofluids: influence of electroviscous effects and particle agglomeration. *Journal of Applied Physics*, 106(3), 034909.
- Ashok, K.S., 2010. Slip flow heat transfer in an infinite microtube with axial conduction. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 153-60.
- Asthana, A., Zinovik, I., Weinmueller, C., Poulidakos, D., 2011. Significant Nusselt number increase in microchannels with a segmented flow of two immiscible liquids: an experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 1456-64.
- Avcı, M., 2008. Mikroakışkanlar akış ve ısı transferi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Avsec, J., 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, 4331-41.

- Aziz, A., Niedbalski, N., 2011. Thermally developing microtube gas flow with axial conduction and viscous dissipation. *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 332-40.
- Azmi, W.H., Sharma, K.V., Mamat, R., Alias, A.B.S., Izwan, M.I., 2012. Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 36, 1-6.
- Azmi, W.H., Sharma, K.V., Sarma, P.K., Mamat, R., Anuar, S., Dharma R.V., 2013. Experimental determination of turbulent forced convection heat transfer and friction factor with SiO₂ nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 51, 103-11.
- Balandin, A.A., 2011. Thermal properties of graphene, carbon nanotubes and nanostructured carbon materials. *Nature Materials*, 10, 569-581.
- Barlay, E.O., Sara, O.N., Yapıcı, S., Arzutug, M.E., 2009. Pressure drop and point mass transfer in a rectangular microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 618-23.
- Batchelor, G.K., 1977. Effect of Brownian motion on bulk stress in a suspension of spherical-particles. *Journal of Fluid Mechanics*, 83, 97-117.
- Beck, M.P., Yuan, Y., Warriar, P., Teja, A.S., 2009. The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 11(5), 1129-1136.
- Ben-Abdallah, P., 2006. Heat transfer through near-field interactions in nanofluids. *Applied Physics Letters*, 89(11), 113117-3.
- Bertsch, S.S., Groll, E.A., Garimella, S.V., 2009. Effects of heat flux, mass flux, vapor quality, and saturation temperature on flow boiling heat transfer in microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 35, 142-54.
- Bhattacharya, P., Saha, S.K., Yadav, A., Phelan, P.E., Prasher, R.S., 2004. Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 95(11), 6492-6494.
- Bogojevic, D., Sefiane, K., Walton, A.J., Lin, H., Cummins, G., Kenning, D.B.R., Karayiannis, T.G., 2011. Experimental investigation of non-uniform heating effect on flow boiling instabilities in a microchannel-based heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 309-24.

- Braginsky, L., Shklover, V., 2008. Thermal conductivity of low-particle-concentration suspensions: correlation function approach. *Physical Review B*, 78, 224205.
- Branson, B.T., Beauchamp, P.S., Beam, J.C., Lukehart, C.M., Davidson, J.L., 2013. Nanodiamond nanofluids for enhanced thermal conductivity. *ACS Nano*, 7, 3183-9.
- Brinkman, H.C., 1952. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20, 571-81.
- Bruggeman, D.A.G., 1935. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Annalen der Physik*, 416, 636-64.
- Buongiorno, J., 2006. Convective transport in nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 128, 240-50.
- Buongiorno, J., Venerus, D.C., Prahbat, N., McKrell, T., Townsend, J., Christianson, R., 2009. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 106, 094312.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 2014. *Materials science and engineering: An introduction 9th edition*. Wiley Publishing, New Jersey, USA.
- Celata, G.P., Cumo, M., Marconi, V., McPhail, S.J., Zummo, G., 2006. Microtube liquid single-phase heat transfer in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 3538-46.
- Celata, G.P., Cumo, M., McPhail, S., Zummo, G., 2006. Characterization of fluid dynamic behavior and channel wall effects in microtube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27, 135-43.
- Celata, G.P., Cumo, M., McPhail, S.J., Tesfagabir, L., Zummo, G., 2007. Experimental study on compressible flow in microtubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 28-36.
- Celata, G.P., Saha, S.K., Zummo, G., Dossevi, D., 2010. Heat transfer characteristics of flow boiling in a single horizontal microchannel. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 1086-94.

- Chandrasekar, M., Suresh, S., Chandra Bose, B.A., 2010. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3 /water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 210-216.
- Chandrasekar, M., Suresh, S., Ramasamy, S., Bose, A.C., 2009. New analytical models to investigate thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 9, 533.
- Chang, C.W., Han, W.Q., Zettl, A., 2005. Thermal conductivity of B-C-N and BN nanotubes. *Applied Physics Letters*, 86(17), 173102.
- Chen, R., Chuang, J., 2007. Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 57-66.
- Chen, R., Huang, G., 2005. Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 25, 3104-14.
- Chen, C.H., 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, 378-84.
- Chen, G., Yu, W., Singh, D., Cookson, D., Routbort, J., 2008. Application of SAXS to the study of particle-size-dependent thermal conductivity in silica nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 10(7), 1109-1114.
- Chen, H., Ding, Y., Lapkin, A., 2009. Rheological behaviour of nanofluids containing tube/rod-like nanoparticles. *Powder Technology*, 194, 132-141.
- Chen, L., Xie, H., Li, Y., Yu, W., 2008. Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. *Thermochim Acta*, 477, 21-4.
- Chen, Y., Wua, R., Shi, M., Wua, J., Peterson, G.P., 2009. Visualization study of steam condensation in triangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5122-9.
- Chen, Y., Zhang, C., Shi, M., Wu, J., 2009. Three-dimensional numerical simulation of heat and fluid flow in noncircular microchannel heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 917-20.

- Cheng, W., Nam-Trung, N., Wong, T.N., Wu, Z., Yang, C., Ooi, K. T., 2007. Investigation of active interface control of pressure driven two-fluid flow in microchannels. *Sensors and Actuators A: Physical*, 133, 323-8.
- Chiu, H., Jang, J., Yeh, H., Wu, M., 2011. The heat transfer characteristics of liquid cooling heat sink containing microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 34-42.
- Cho, T., Baek, I., Lee, J., Park, S., 2005. Preparation of nanofluids containing suspended silver particles for enhancing fluid thermal conductivity of fluids. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 11, 400.
- Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee S.P., Choi S.U.S., 2005. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letter*, 87(15), 1-3.
- Chong, D., Liu, J., Yan, J., 2007. Experimental investigation of mixed convection in a rectangular duct with a heated plate in the middle of cross section. *Heat Mass Transfer*, 43, 1283-1291.
- Chopkar, M., Das, P.K., Manna, I., 2006. Synthesis and characterization of nanofluid for advanced heat transfer applications. *Scripta Materialia*, 55(6), 549-552.
- Comaklı, O., Yılmaz, M., Bedir, O., Sahin, B., 2007. Isı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi. *Mühendis ve Makina* 48(565).
- Corcione, M., 2011. Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 52, 789-93.
- Cortina-Diaz, M., Schmidt, J., 2007. Experimental investigation of transient boiling heat transfer in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 95-102.
- Cengel, Y., 2014. *Termodinamik - Mühendislik Yaklaşımlarla*. Güven Yayın Kitabevi, İzmir, Türkiye.
- Das, S.K., Putra, N., Roetzel, W., 2003. Poolboiling characteristics of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 851-62.

- Daungthongsuk, W., Wongwises, S., 2007. A critical review of convective heat transfer of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 797-817.
- deBruijn, H., 1942. The viscosity of suspensions of spherical particles (The fundamental η - c and ϕ relations). *Recl Trav Chim Pays-Bas*, 61, 863-74.
- Depew, C.A., August, S.E., 1971. Heat transfer due to combined free and forced convection in horizontal and isothermal tube. *Journal of Heat Transfer*, 93, 380-384.
- Dilek, E.F., 2008. Nanoakışkanların hazırlanması ve ısı iletkenliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Erzurum.
- Ding, Y., Alias, H., Wen, D., Williams, R.A., 2006. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 240-50.
- Dodd, A.D., Murfin, D., 1994. *Dictionary of Ceramics* 3rd edition. Maney Publishing, London, United Kingdom.
- Dogan, M., 2007. Laminar karışık taşınım şartlarında akıma paralel kanatçıklar yerleştirilmiş kapalı kanallarda ısı transferinin sayısal ve deneysel incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Dogan, M., 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, 2149-2158.
- Domingues, G., Volz, S., Joulain, K., Greffet, J., 2005. Heat transfer between two nanoparticles through near field interaction. *Physical Review Letters*, 94(8), 085901.
- Dorin, L., Shigefumi, N., Kiyoshi, T., 2004. The experimental research on microtube heat transfer and fluid flow of distilled water. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47, 2817-30.
- Duangthongsuk, W., Wongwises, S., 2009. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science* 33, 706-714.

- Duangthongsuk, W., Wongwises, S., 2010. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 334-44.
- Duclaux, L., Nysten, B., Issi, J.P., Moore, A.W., 1992. Structure and low temperature thermal conductivity of pyrolytic boron nitride. *Physical Review B*, 46(6), 3362-3367.
- Eastman, J.A., Choi, S.U.S., 2001. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 78, 718-720.
- Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Thompson, L.J., 1997. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, *Proceedings of the Symposium on Nanophase and Nanocomposite Materials II*, Materials Research Society, USA, 457, 3-11.
- Einstein, A., 1906. Eine neue Bestimmung der Molekül dimensionen. *Ann Physik*, 324, 289-306.
- Esfe, M.H., Saedodin, S., Wongwises, S., Toghraie, D., 2015. An experimental study on the effect of diameter on thermal conductivity and dynamic viscosity of Fe/water nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119, 1817-24.
- Evans, W., Fish, J., Keblinski, P., 2006. Role of brownian motion hydrodynamics on nanofluid thermal conductivity. *Applied Physics Letters*, 88(9), 093116-3.
- Evans, W., Prasher, R., Fish, J., Meakin, P., Phelan, P., Keblinski, P., 2008. Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(5-6), 1431-1438.
- Fang, C., David, M., Wang, F., Goodson, K.E., 2010. Influence of film thickness and cross-sectional geometry on hydrophilic microchannels condensation. *International Journal of Multiphase Flow*, 36, 608-19.
- Feng, Y., Yu, B., Xu, P., Zou, M., 2007. The effective thermal conductivity of nanofluids based on the nanolayer and the aggregation of nanoparticles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(10), 3164-3171.
- Frankel, N.A., Acrivos, A., 1967. On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres. *Chemical Engineering Science* 22, 847-53.

- Gamrat, G., Favre-Marinet, M., LePerson, S., 2009. Modelling of roughness effects on heat transfer in thermally fully-developed laminar flows through micro-channels. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 2203-14.
- García-Hernando, N., Acosta-Iborra, A., Ruiz-Rivas, U., Izquierdo, M., 2009. Experimental investigation of fluid flow and heat transfer in a single-phase liquid flow micro-heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5433-46.
- Geiger, G.H., Poirier, D.R., 1973. *Transport phenomena in metallurgy*. Addison - Wesley Company, Reading (Massachusetts).
- Gelis, K., 2013. Şerit eleman kullanılan bir ısı değiştiricide nanoakışkanların ısı transferi ve basınç dűřümünün incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Erzurum.
- Ghosh, S., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Pokatilov, E.P., Nika, D.L., Balandin, A.A., Bao, W., Miao, F., Lau, C.N., 2008. Extremely high thermal conductivity of graphene: Prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits. *Applied Physics Letters*, 92(15), 151911.
- Giulio, C., Paola, D., 2004. Numerical analysis of roughness effect on microtube heat transfer. *Journal of Superlattices and Microstructures*, 35, 601-16.
- Godfrey, D., Herguth, W.R., 1995. Physical and chemical properties of industrial mineral oils affecting lubrication. *Lubrication Engineering*, 51(6), 493-496.
- Godson, L., Raja, B., Mohan, L.D., Wongwises, S., 2010. Experimental investigation on the thermal conductivity and viscosity of silver-deionized water nanofluid. *Experimental Heat Transfer*, 23, 317-332.
- Graham, A.L., 1981. On the viscosity of suspensions of solid spheres. *Journal of Applied Sciences Research*, 37, 275-86.
- Gupta, S.K., Advani, S.G., Huq, P., 1995. Role of micro-convection due to nonaffine motion of particle in mono-disperse suspension. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38, 2945-58.
- Hammerschmidt, U., Meier, V., 2006. New transient hot-bridge sensor to measure thermal conductivity, thermal diffusivity and volumetric specific heat. *International Journal of Thermophysics*, 27(3), 840-865

- Hamilton, R.L., Crosser, O.K., 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1, 187-91.
- Harirchian, T., Garimella, S.V., 2008. Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 3724-35.
- Hashin, Z., Shtrikman, S., 1962. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. *Journal of Applied Physics*, 33, 3125.
- Hassan, M., Sadri, R., Ahmadi, G., Dahari, M.B., Kazi, S.N., Safaei, M.R., 2013. Numerical study of entropy generation in a flowing nanofluid used in micro and minichannels. *Entropy*, 15, 144-55.
- Hatami, M., Ganji, D., 2014. Thermal and flow analysis of microchannel heat sink (MCHS) cooled by Cu-water nanofluid using porous media approach and least square method. *Energy Conversion and Management*, 78, 347-58.
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., Lu, H., 2007. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(11-12), 2272-2281.
- Heris, S.Z., Etemad, S.G., Nasr, Esfahany, M., 2006. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, 529-35.
- Hesselman, D.P.H., Johnson, L.F., 1987. Effective thermal conductivity of nanocomposites with interfacial thermal barrier resistance. *Journal of Composite Materials*, 21, 508-15.
- Ho, C., Chen, W.C., Yan, W.M., 2014. Correlations of heat transfer effectiveness in a minichannel heat sink with water-based suspensions of Al₂O₃ nanoparticles and/or MEPCM particles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 69, 293-9.
- Ho, C.J., Wei, L., Li, Z., 2010. An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 30, 96-103.
- Hong, C., Asako, Y., 2008. Heat transfer characteristics of gaseous flows in microtube with constant heat flux. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1375-85.

- Hong, H., Zheng, Y., Roy, W., 2007. Nanomaterials for efficiently lowering the freezing point of anti-freeze coolants. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 7(9), 3180-3184.
- Hong, K.S., Hong, T.K., Yang, H.S., 2006. Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 88(3), 1-3.
- Hong, T.K., Yang, H.S., Choi, C.J., 2005. Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 97, 1-4.
- Huaqing, X., Jinchang, W., Tonggeng, X., Yan L., 2001. Study on the thermal conductivity of SiC nanofluids. *The Journal of the Chinese Ceramic Society*, 29, 361-364.
- Hung, T.C., Yan, W.M., Wang, X.D., Chang, C.Y., 2012. Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2559-70.
- Hwang, K.S., Jang, S.P., Choi, S.U.S., 2009. Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed laminar flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 193-9.
- Hwang, Y., Lee, J.K., Lee, C.H., Jung, Y.M., Cheong, S.I., Lee, C.G., Ku, B.C., Jang, S.P., 2007. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. *Thermochim Acta*, 455(1-2), 70-74.
- Hwang, Y.J., Ahn, Y.C., Shin, H.S., Lee, C.G., Kim, G.T., Park, H.S., Lee, J.K., 2006. Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. *Current Applied Physics*, 6(6), 1068-1071.
- Iijima, S., 1991. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56-58.
- Ijam, A., Saidur, R., Ganesan, P., 2012. Cooling of minichannel heat sink using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 1188-94.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 2010. *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri 4. Basım'dan Çeviri*. Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye.
- Jana, S.P., Khojin, A.S., Zhong, W.H., 2007. Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition of single and hybrid nano-additives. *Thermochim Acta*, 462, 45.

- Jang, S.P., Choi, S.U.S., 2006. Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 26, 2457-63.
- Jang, S.P., Choi, S.U.S., 2004. Role of brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. *Applied Physics Letters*, 84, 4316.
- Ji, Y., Yuan, K., Chung J.N., 2004. Numerical simulation of wall roughness on gaseous flow and heat transfer in a microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 1241-53.
- Jiang, H., Xu, Q., Huang, C., Shi, L., 2015. Effect of temperature on the effective thermal conductivity of n-tetradecane-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Particuology*, 22, 95-9.
- Jung, J.Y., Oh, H.S., Kwak, H.Y., 2009. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 466-72.
- Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A., 2016. Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids - A state of the art review. *International Journal of Thermal Sciences*, 100, 75-97.
- Kalteh, M., Abbassi, A., Saffar-Avval M., Frijns, A., Darhuber, A., Harting, J., 2012. Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 36, 260-8.
- Kandlikar, S.G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King, M.R., 2006. *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels*, Elsevier, Oxford, England.
- Kandlikar, S.G., Grande, W.J., 2004. Evaluation of singlephaseflow in microchannels for high heat flux chip cooling-thermo hydraulic performance enhancement and fabrication technology. *Heat Transfer Engineering*, 25, 5-16.
- Kang, H.U., Kim, S.H., Oh, J.M., 2006. Estimation of thermal conductivity of nanofluid using experimental effective particle volume. *Experimental Heat Transfer*, 19(3), 181-191.
- Keblinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S., Eastman, J.A., 2002. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(4), 855-863.

- Keblinski, P., Prasher, R., Eapen, J., 2008. Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over. *Journal of Nanoparticle Research*, 10(7), 1089-1097.
- Khadem, M.H., Shams, M., Hossainpou, S., 2009. Numerical simulation of roughness effects on flow and heat transfer in microchannels at slip flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 69-77.
- Kihm, K.D., Chon, C.H., Lee, J.S., Choi, S.U.S., 2011. A new heat propagation velocity prevails over Brownian particle velocities in determining the thermal conductivities of nanofluids. *Nanoscale Research Letters*, 6, 1-9.
- Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., McEuen, P.L., 2001. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. *Physical Review Letters*, 87(21), 215502.
- Kim, S.H., Choi, S.R., Kim, D., 2006. Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: Particle size dependence and effect of laser irradiation. *Journal of Heat Transfer*, 129(3), 298-307.
- Kim, S.H., Choi, S.R., Kim, D., 2007. Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: particle size dependence and effect of laser irradiation. *ASME Journal of Heat Transfer*, 129(3), 298-307.
- Kohl, M.J., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S.M., Sadowski, D.L., 2005. An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 1518-33.
- Kole, M., Dey, T.K., 2010 Thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃ nanofluid based on carengine coolant. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, 315501.
- Kole, M., Dey, T.K., 2010. Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(6), 677-683.
- Koo, J., Kleinstreuer, C., 2004. Viscous dissipation effects in microtubes and microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 3159-69.
- Koo, J., Kleinstreuer, C., 2005. Laminar nanofluid flow in microheat-sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 2652-61.
- Kosar, A., 2010. Effect of substrate thickness and material on heat transfer in microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 635-42.

- Krieger, I.M., Dougherty, T.J., 1959. A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of The Society of Rheology* 3, 137-52.
- Krishnamurthy, S., Bhattacharya, P., Phelan, P.E., Prasher, R.S., 2006. Enhanced mass transport in nanofluids. *Nano Letters*, 6, 419-423.
- Kroto, H.W., Heath, J.R., O'Brien, S.C., Curl, R.F., Smalley, R.E., 1985. C60: Buckminsterfullerene. *Nature*, 318(6042), 162-163.
- Kumar, D.H., Patel, H.E., Kumar, V.R.R., Sundararajan, T., Pradeep, T., Das, S.K., 2004. Model for heat conduction in nanofluids. *Physical Review Letters*, 93, 4301-4304.
- Lam, N.T., Kato, Y., Nikitin, K., Ishizuka, T., 2007. Heat transfer and pressure drop correlations of microchannels heat exchangers with S-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 560-70.
- Lee, D., 2007. Thermophysical properties of interfacial layer in nanofluids. *Langmuir*, 23(11), 6011-6018.
- Lee, D., Kim, J.W., Kim, B.G., 2006. A new parameter to control heat transport in nanofluids: surface charge state of the particle in suspension. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(9), 4323-4328.
- Lee, J., 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., Mudawar, I., 2007. Assessment of the effectiveness of nanofluids for singlephase and two-phase heat transfer in micro-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 452-63.
- Lee, J.H., Hwang, K.S., Jang, S.P., Lee, B.H., Kim, J.H., Choi, S.U.S., 2008. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 2651-2656.
- Lee, P., Garimella, S.V., 2008. Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannels arrays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 789-806.

- Lee, P., Garimella, S.V., Liu, D., 2005. Investigation of heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 1688-704.
- Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A., 1999. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, 121, 280-289.
- Lee, S., Park, S.D., Kang, S., Bang, I.C., 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, 433-438.
- Lelea, D., 2010. Effects of temperature dependent thermal conductivity on Nu number behavior in microtubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 245-9.
- Lelea, D., Eugen, C.A., 2010. The viscous dissipation effect on heat transfer and fluid flow in micro-tubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 1208-14.
- Leong, K.C., Yang, C., Murshed, S.M.S., 2006. A model for the thermal conductivity of nanofluids - the effect of interfacial layer. *Journal of Nanoparticle Research*, 8, 245-4.
- Li, C., Peterson, G., 2007. Mixing effect on the enhancement of the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(23-24), 4668-4677.
- Li, J., Kleinstreuer, C., 2008. Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29, 1221-32.
- Li, Q., Xuan, Y., Wang, J., 2005. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 109-116.
- Li., Y., Zhou., J., Tung, S., Schneider, E., Xi, S., 2009. A review on development of nanofluid preparation and characterization, *Powder Technology*, 196, 89-101.
- Liu, D., Yu, L., 2011. Single-phase thermal transport of nanofluids in a minichannel. *Journal of Heat Transfer*, 133, 031009.
- Liu, M.S., Lin, M.C., Tsai, C.Y., Wang, C., 2006. Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 3028-3033.

- Liu, M.S., Lin, M.C., Huang, I.T., Wang, C.C., 2005. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32, 1202-1210.
- Lundgren, T.S., 1972. Slow flow through stationary random beds and suspension of spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, 51, 273-99.
- Ma, L., Wang, J., Marconnet, A.M., Barbati, A.C., McKinley, G.H., Lui, W., Chen, G., 2014. Viscosity and Thermal Conductivity of Stable Graphite Suspensions Near Percolation. *Nano Letters*, 15, 127-33.
- Mahbubul, I.M., Saidur, R., Amalina, M.A., 2012. Latest developments on the viscosity of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 874-885.
- Mahbubul, I.M., Saidur, R., Amalina, M.A., 2013. Influence of particle concentration and temperature on thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/R141b nanorefrigerant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 43, 100-104.
- Maiga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N., Roy, G., 2004. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. *Superlattices Microstruct*, 35, 543-57.
- Manay, E., 2014. Mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristiklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, Erzurum.
- Manay, E., Sahin, B., Akyürek, E.F., Comaklı, O., 2012. Mikrokanallarda nanoakışkanların kullanımı. *Mühendis ve Makine*, 53 (627), 38-42.
- Mariano, A., Pastoriza-Gallego, M.J., Lugo, L., Mussari, L., Piñeiro, M.M., 2015. Co₃O₄ ethylene glycol-based nanofluids: thermal conductivity, viscosity and high pressure density. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 54-60.
- Marquis, F.D.S., Chibante, L.P.F., 2005. Improving the heat transfer of nanofluids and nanolubricants with carbon nanotubes. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 57(12), 32-43.
- Masoumi, N., Sohrabi, N., Behzadmehr, A., 2009. A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42, 055501.

- Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., Hishinuma, N., 1993. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine Particles (Dispersion of γ -Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ Ultra-Fine Particles). *Netsu Bussei*, 7, 227-33.
- Maughan, J.R., Incropera, F.P., 1987. Experiments on Mixed Convection Heat Transfer for Airflow in a Horizontal and Inclined Channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30, 1307-1318.
- Maxwell, J.C., 1881. A treatise on electricity and magnetism 2nd edition. Clarendon Press, Oxford, England.
- Megahed, A., 2011. Experimental investigation of flow boiling characteristics in a cross-linked microchannel heat sink. *International Journal of Multiphase Flow*, 37, 380-93.
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S.T., Kazi, S.N., Mehrali, M., Bin-Mohd-Zubir, M.N., Metselaar, H.S.C., 2014. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets. *Nanoscale Research Letters*, 9, 1-12.
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S.T., Mehrali, M., Togun, H., Zubir, M.N.M., Kazi, S.N., Metselaar, H.S.C., 2014. Preparation, characterization, viscosity, and thermal conductivity of nitrogen-doped graphene aqueous nanofluids. *Journal of Materials Science*, 49, 7156-71.
- Meibodi, M.E., Sefti, M.V., Rashidi, A.M., Amrollahi, A., Tabasi, M., Kalal, H.S., 2010. A model for thermal conductivity of nanofluids. *Materials Chemistry and Physics*, 123, 639-43.
- Minea, A.A., 2013. Effect of microtube length on heat transfer enhancement of an water/Al₂O₃ nanofluid at high Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62, 22-30.
- Mlcak, J.D., Anand, N.K., Rightley, M.J., 2008. Three-dimensional laminar flow and heat transfer in a parallel array of microchannels etched on a substrate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 5182-91.
- Mohammed, H., Gunnasegaran, P., Shuaib, N., 2011. The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 767-73.

- Mohammed, H.A., 2007. The effect of different inlet geometries on laminar flow combined convection heat transfer inside a horizontal circular pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, 581-590.
- Mohammed, H.A., Salman, Y., 2007. Combined convection heat transfer for thermally developing aiding flow in an inclined circular cylinder with constant heat flux. *Applied Thermal Engineering*, 27, 1236-1247.
- Mokrani, O., Bourouga, B., Castelain, C., Peerhossaini, H., 2009. Fluid flow and convective heat transfer in flat microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 1337-52.
- Mooney, M., 1951. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *Journal of Colloid Science*, 6, 162-70.
- Muhammad, M.R., Shevade, S.S., Ojada, E., 2010. Convective heat transfer in a composite trapezoidal microchannels during magnetic heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 1175-81.
- Murshed, S.M.S., Leong, K.C., Yang, C., 2005. Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 44, 367-373.
- Murshed, S.M.S., Leong, K.C., Yang, C., 2008. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 560-8.
- Murshed, S.M.S., Leong, K.C., Yang, C., 2008. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids - A critical review. *Applied Thermal Engineering*, 28, 2109-2125.
- Namburu, P.K., Kulkarni, D.P., Dandekar, A., Das, D.K., 2007. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicodioxide nanofluids. *Nano-Micro Letters*, 2, 67-71.
- Namburu, P.K., Kulkarni, D.P., Misra, D., Das, D.K., 2007. Viscosity of copperoxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 397-402.
- Nguyen, C.T., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Mare, T., Boucher, S., 2008. Viscosity data for Al₂O₃/water nanofluid-hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable. *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 103-111.

- Nguyen, C.T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S., 2007. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids-hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 1492-506.
- Niazmand, H., Renksizbulut, M., Saeedi, E., 2008. Developing slip-flow and heat transfer in trapezoidal microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 6126-35.
- Nie, C., Marlow, W., Hassan, Y., 2008. Discussion of proposed mechanisms of thermal conductivity enhancement in nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(5-6), 1342-1348.
- Nielsen, L.E., 1970. Generalized equation for the elastic moduli of composite materials. *Journal of Applied Physics*, 41, 4626-7.
- Nitiapiruk, P., Mahian, O., Dalkilic, A.S., Wongwises, S., 2013. Performance characteristics of a microchannel heat sink using TiO₂/water nanofluid and different thermophysical models. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 47, 98-104.
- Osman, M.A., Srivastava, D., 2001. Temperature dependence of the thermal conductivity of single-wall carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 12(1), 21.
- Owhaib, W., Martin, C.C., Palm, B., 2004. Evaporative heat transfer in vertical circular microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 24, 1241-53.
- Özerinç, S., 2010. Heat transfer enhancement with nanofluids. Master Thesis, Middle East Technical University School of Natural and Applied Sciences, Mechanical Engineering Department, Ankara.
- Pak, B.C., Cho, Y.I., 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11, 151-70.
- Pang, C., Jung, J.Y., Lee, J.W., Kang, Y.T., 2012. Thermal conductivity measurement of methanol based nanofluids with Al₂O₃ and SiO₂ nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 5597-602.
- Parekh, K., Lee, H.S., 2010. Magnetic field induced enhancement in thermal conductivity of magnetite nanofluid. *Journal of Applied Physics*, 107, 09A310.

- Park, H.S., Punch, J., 2008. Friction factor and heat transfer in multiple microchannels with uniform flow distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 4535-43.
- Pastoriza-Gallego, M.J., Casanova, C., Legido, J.L., Piñeiro, M.M., 2011. CuO in water nanofluid: influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity. *Fluid Phase Equilibria*, 300(1-2), 188-196.
- Pastoriza-Gallego, M.J., Casanova, C., Paramo, R., Barbes, B., Legido, J.L., Pineiro, M.M., 2009. A study on stability and thermophysical properties ~ (density and viscosity) of Al₂O₃ in water nanofluid. *Journal of Applied Physics*, 106, 064301.
- Patel, H.E., Das, S.K., Sundararajan, T., Nair, A.S., Geoge, B., Pradeep, T., 2003. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. *Applied Physics Letters*, 83, 2931-2933.
- Patel, H.E., Sundararajan, T., Das, S.K., 2010. An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(3), 1015-1031.
- Peimyoo, N., Shang, J., Yang, W., Wang, Y., Cong, C., Yu, T., 2014. Thermal conductivity determination of suspended mono- and bilayer WS₂ by Raman spectroscopy. *Nano Research*, 8(4), 1210-1221.
- Peng-Fei, H., Xi-Wen, Z., Zhao-Hui, Y., Feng, H., 2007. Transitional and turbulent flow in a circular microtube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 423-31.
- Perry, R.H., Green, D.W., 2007. *Perry's chemical engineers handbook 8th edition*. McGraw-Hill Education, New York, USA
- Ponmani, S., William, J.K.M., Samuel, R., Nagarajan, R., Sangwai, J.S., 2014. Formation and characterization of thermal and electrical properties of CuO and ZnO nanofluids in xanthan gum. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 443, 37-43.
- Prasher, R., Bhattacharya, P., Phelan, P.E., 2005. Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluids). *Physical Review Letters*, 94(2), 025901.

- Prasher, R., Phelan, P.E., Bhattacharya, P., 2006. Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid). *Nano Letters*, 6(7), 1529-1534.
- Putra, N., Roetzel, W., Das, S., 2003. Natural convection of nano-fluids. *Heat and Mass Transfer*, 39, 775-84.
- Qi, S.L., Zhang, P., Wang, R.Z., Xu, L.X., 2007. Flow boiling of liquid nitrogen in microtubes: Part I-The onset of nucleate boiling, two-phase flow instability and two-phase flow pressure drop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 4999-5016.
- Quan, X., Dong, L., Cheng, P., 2010. Determination of annular condensation heat transfer coefficient of steam in microchannels with trapezoidal cross section. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 3670-6.
- Renqiang, X., Chung, J.N., 2010. A new model for three-dimensional random roughness effect on friction factor and heat transfer in microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 3284-91.
- Roland, B., Michel, F., LePerson, S., 2006. Bias effectson heat transfer measurements in microchannel flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 3325-37.
- Romano, J.M., Parker, J.C., Ford, Q.B., 1997. Application opportunities for nanoparticles made from the condensation of physical vapors. *International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Chicago, 2, 12-13.
- Rustum, I.M., Soliman, H.M., 1988. Experimental investigation of laminar mixed convection in tubes with longitudinal internal fins. *Journal of Heat Transfer*, 110, 366-372.
- Sahin, B., Comaklı, K., Comaklı, O., Yılmaz, M., 2006. Nanoakışkanlarla ısı transferinin iyileştirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 47(559), 29-34.
- Salman, B., Mohammed, H., Kherbeet, A., 2012. Heat transfer enhancement of nanofluids flow in microtube with constant heat flux. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 1195-1204.
- Sara, O.N., Barlay, E.Ö., Arzutug, M.E., Yapıcı, S., 2009. Experimental study of laminar forced convective mass transfer and pressure drop in microtubes. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 1894-900.

- Selinger, J., Timofeeva, E.V., Gavrilov, A., McClosket, J.M., Tolmachev, Y.V., 2007. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. *Physical Review E*, 76, 061203.
- Serebryakova, M.A., Dimov, S.V., Bardakhanov, S.P., Novopashin, S.A., 2015. Thermal conductivity, viscosity and rheology of a suspension based on Al₂O₃ nanoparticles and mixture of 90% ethylene glycol and 10% water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 187-91.
- Shannon, R.L., Depew, C.A., 1969. Forced laminar flow convection in a horizontal tube with variable viscosity and free-convection effects. *Journal of Heat Transfer*, 91, 251-258.
- Sharma, K.V., Sarma, P.K., Azmi, W.H., Mamat, R., Kadirgama, K., 2012. Correlations to predict friction and forced convection heat transfer coefficients of water based nanofluids for turbulent flow in a tube. *International Journal of Microscale and Nanoscale Thermal and Fluid Transport Phenomena*, 3, 1-25 Special Issue in Heat and Mass transfer in Nanofluids.
- Shawn, A.P., David, G.C., Paul, V.B., 2006. Thermal conductivity of nanoparticle suspensions. *Journal of Applied Physics*, 99, 1-6.
- Shen, S., Xu, J.L., Zhou, J.J., Chen, Y., 2006. Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface. *Energy Conversion and Management*, 47, 1311-25.
- Shevade, S.S., Muhammad R.M., 2007. Heat transfer in rectangular microchannels during volumetric heating of the substrate. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34, 661-72.
- Shima, P.D., Philip, J., Raj, B., 2010. Influence of aggregation on thermal conductivity in stable and unstable nanofluids. *Applied Physics Letters*, 97, 153113.
- Shin, S., Lee, S.H., 2000. Thermal conductivity of suspensions in shear flow fields. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 4275-84.
- Shokouhmand, H., Bigham, S., 2010. Slip-flow and heat transfer of gaseous flows in the entrance of a wavy microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 695-702.

- Singh, D., Timofeeva, E., Yu, W., Routbort, J., France, D., Smith, D., Lopez-Cepero, M., 2009. An investigation of silicon carbide-water nanofluid for heat transfer applications. *Journal of Applied Physics*, 105, 064306.
- Slack, G.A., Tanzilli, R.A., Pohl, R.O., Vandersande, J.W., 1987. The intrinsic thermal conductivity of AlN. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 48(7), 641-647.
- Sohel, M., Saidur, R., Hassan, N., Elias, M., Khaleduzzaman, S., Mahbul, I., 2013. Analysis of entropy generation using nanofluid flow through the circular microchannel and minichannel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 46, 85-91.
- Sohel, M., Saidur, R., Sabri, M.F.M., Kamalisarvestani, M., Elias, M., Ijam, A., 2013. Investigating the heat transfer performance and thermophysical properties of nanofluids in a circular microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42, 75-81.
- Speight, J.G., 2004. *Lange's handbook of chemistry* 16th edition. McGraw-Hill Education, New York, USA.
- Sui, Y., Teo, C.J., Lee, P.S., Chew, Y.T., Shu, C., 2010. Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2760-72.
- Sundar, L.S., Sharma, K.V., Naik, M.T., Singh, M.K., 2013. Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 670-686.
- Sundar, L.S., Singh, M.K., Ramana, E.V., Singh, B., Gracio, J., Sousa, A.C.M., 2014. Enhanced thermal conductivity and viscosity of nanodiamond-Nickel nanocomposite nanofluids. *Scientific Reports*, 4, 14.
- Sun-Xiao, Z., Ya-Ling, H., Guy, L., Wen-Quan, T., 2010. Numerical studies of simultaneously developing laminar flow and heat transfer in microtubes with thick wall and constant outside wall temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 3977-89.
- Taha-Tijerina, J., Narayanan, T.N., Gao, G., Rohde, M., Tsentalovich, D.A., Pasquali, M., Ajayan, P.M., 2012. Electrically insulating thermal nano-oils using 2D fillers. *ACS Nano*, 6(2), 1214-1220.

- Taha-Tijerina, J., Peña-Parás L., Maldonado-Cortés, D., 2016. 2D-Based Nanofluids: Materials evaluation and performance. Two-dimensional Materials: Synthesis, Characterization and Potential Applications, Dr. Pramoda Nayak (Ed.).
- Tang, G.H., Li, Z., He, Y.L., Tao, W.Q., 2007. Experimental study of compressibility, roughness and rarefaction influences on microchannel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 2282-95.
- Tavman, I., Turgut, A., Chirtoc, M., Hadjov, K., Fudym, O., Tavman, S., 2010. Experimental study on thermal conductivity and viscosity of water-based nanofluids. *Heat Transfer Research*, 41, 339-51.
- Tillman, P., Hill, J.M., 2007, Determination of nanolayer thickness for a nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34(4), 399-407.
- Timofeeva, E.V., Yu, W., France, D.M., Singh, D., Routbort, J.L., 2011. Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene glycol/H₂O and H₂O nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 109, 014914.
- Tseng, W.J., Lin, K.C., 2003 Rheology and colloidal structure of aqueous TiO₂ nanoparticle suspensions. *Materials Science and Engineering: A*, 355, 186-92.
- Turgut, A., Tavman, I., Chirtoc, M., Schuchmann, H.P., Sauter, C., Tavman, S., 2009. Thermal conductivity and viscosity measurements of water-based TiO₂ nanofluids. *International Journal of Thermophysics*, 30, 1213-26.
- Vafaei, S., Wen, D., 2012. Convective heat transfer of aqueous alumina nanosuspensions in a horizontal mini-channel. *Heat and Mass Transfer*, 48, 349-57.
- Vajjha, R.S., Das, D.K., 2009. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 4675-82.
- Vand, V., 1948, Viscosity of solutions and suspensions, I. Theory. *Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 52, 277-99.
- Wan, M., Yadav, R.R., Yadav, K.L., Yadav, S.B., 2012. Synthesis and experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids containing functionalized Polyaniline nano-fibers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 41, 158-64.

- Wang, B.X., Sheng, W.Y., Peng, X.F., 2009. A novel statistical clustering model for predicting thermal conductivity of nanofluid. *International Journal of Thermophysics*, 30, 1992-8.
- Wang, B.X., Zhou, L.P., Peng, X.F., 2003. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 2665-2672.
- Wang, G., Cheng, P., 2008. An experimental study of flow boiling instability in a single microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, 1229-34.
- Wang, H., Wang, Y., 2007. Influence of three-dimensional wall roughness on the laminar flow in microtube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, 220-8.
- Wang, J., Lee, C.H., Bando, Y., Golberg, D., Yap, Y.K., 2009. Multiwalled Boron Nitride nanotubes: growth, properties, and applications. *B-C-N Nanotubes and related Nanostructures*, New York: Springer, 23-44.
- Wang, W., Lin, L., Feng, Z.X., Wang, S.Y., 2012. A comprehensive model for the enhanced thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Advanced Research in Physics*, 3, 021209.
- Wang, X., Mujumdar, A.S., 2007. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 1-19.
- Wang, X., Mujumdar, A.S., 2008. A review on nanofluids - part I: theoretical and numerical investigations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25, 613-630
- Wang, X., Xu, X., Choi, S.U.S., 1999. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 13, 474-480.
- Wang, Z.L., Tang, D.W., Liu, S., Zheng, X.H., Araki, N., 2007. Thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of nanofluids by 3ω method and mechanism. *International Journal of Thermophysics*, 28(4), 1255-1268.
- Wojtan, L., Revellin, R., Thome, J.R., 2006. Investigation of saturated critical heat flux in a single, uniformly heated microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 765-74.

- Wu, H.W., Perng, S.W., 1999. Effect of an oblique plate on the heat transfer enhancement of mixed convection over heated blocks in a horizontal channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 1217-1235.
- Wu, H.Y., Cheng, P., 2003. An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 2547-56.
- Wu, J., Shi, M., Chen, Y., Li, X., 2010. Visualization study of steam condensation in wide rectangular silicon micro channels. *International Journal of Thermal Sciences*, 49, 922-30.
- Wu, X., Wu, H., Cheng, P., 2009. Pressure drop and heat transfer of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluids through silicon microchannels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19, 105020.
- Xie, H., Fujii, M., Zhang, X., 2005. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(14), 2926-2932.
- Xie, H., Fujii, M., Zhang, X., 2005. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 2926-32.
- Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F., Wu, Q., 2002. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles. *Journal of Applied Physics*, 91(7), 4568-4572.
- Xu, Y., Chung, D.D.L., 2000. Increasing the thermal conductivity of boron nitride and aluminum nitride particle epoxy-matrix composites by particle surface treatments. *Composite Interfaces*, 7(4), 243-256.
- Xuan, Y., Li, Q., 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21, 58-64.
- Xuan, Y., Li, Q., 2003. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 125, 151-5.

- Xue, L., Keblinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S., Eastman, J.A., 2004. Effect of liquid layering at the liquid-solid interface on thermal transport. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(19-20), 4277-4284.
- Yamada, E., Ota, T., 1980. Effective thermal conductivity of dispersed materials. *Heat and Mass Transfer*, 13, 27-37.
- Yan, R., Simpson, J.R., Bertolazzi, S., Brivio, J., Watson, M., Wu, X., Kis, A., Xing, H.G., 2014. Thermal conductivity of monolayer molybdenum disulfide obtained from temperature dependent raman spectroscopy. *ACS Nano* 8(1), 986-993.
- Yang, B., 2008. Thermal conductivity equations based on Brownian motion in suspensions of nanoparticles (nanofluids). *Journal of Heat Transfer*, 130, 042408.
- Yang, B., Han, Z.H., 2006. Thermal conductivity enhancement in water-in-FC72 nanoemulsion fluids. *Applied Physics Letters*, 88, 1-3.
- Yang, C.Y., Lin, T.Y., 2007. Heat transfer characteristics of water flow in microtubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 432-9.
- Yang, Y., Zhong, Z.G., Grulke, E.A., Anderson, W.B., Wu, G., 2005. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersion (nanofluids) in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 1107–1116.
- Yoo, D.H., Hong, K.S., Yang, H.S., 2007. Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids. *Thermochim Acta*, 455, 66-9.
- Yu, C., Richter, A.G., Datta, A., Durbin, M.K., Dutta, P., 1999. Observation of molecular layering in thin liquid films using X-ray reflectivity. *Physical Review Letters*, 82(11), 2326-2329.
- Yu, W., Choi, S.U.S., 2003. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *Journal of Nanoparticle Research*, 5(1), 167-171.
- Yu, W., Choi, S.U.S., 2004. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Hamilton-Crosser model. *Journal of Nanoparticle Research*, 6, 355-61.

- Yu, W., France, D.M., Smith, D.S., Singh, D., Timofeeva, E.V., Routbort, J.L., 2009. Heat transfer to silicon carbide/water nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 3606-12.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L., Li, Y., 2009. Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid, *Thermochimica Acta*. 491, 92-96.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L., Li, Y., 2010. Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe₃O₄ nanofluids prepared via phase-transfer method. *Colloids and Surfaces A*, 355, 109-13.
- Yu, W., Xie, H., Li, Y., Chen, L., 2001. Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of aluminum nitride nanofluid. *Particuology*, 9, 187-191.
- Yu, W., Xie, H., Li, Y., Chen, L., Wang, Q., 2001. Experimental investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol based nanofluids containing low volume concentration diamond nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 380, 1-5.
- Zhang, P., Fu, X., 2009. Two-phase flow characteristics of liquid nitrogen in vertically upward 0.5 and 1.0 mm microtubes: visualization studies. *Cryogenics*, 49, 565-75.
- Zhang, T.J., Peles, Y., Wena, J.T., Tong, T., Chang, J., Prasher, R., Jensen, M.K., 2010. Analysis and active control of pressure-drop flow instabilities in boiling microchannels systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2347-60.
- Zhang, X., Gu, H., Fujii, M., 2006. Experimental study on the effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluid. *International Journal of Thermophysics*, 27, 569-580.
- Zhi-Gang, L., Shi-Qiang, L., Masahiro, T., 2007. Experimental study on forced convective heat transfer characteristics in quartz microtube. *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 139-48.
- Zhu, H., Zhang, C., Liu, S., 2006. Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe₃O₄ aqueous nanofluids. *Applied Physics Letters*, 89, 1-3.
- Zhu, X., Liao, Q., 2006. Heat transfer for laminar slip flow in a microchannels of arbitrary cross-section with complex thermal boundary conditions. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1246-56.

Zhuo, L., Ya-Ling, H., Gui-Hua, T., Wen-Quan, T., 2007. Experimental and numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 3447-60.



ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Balıkesir ilinin Edremit ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Balıkesir Akçay Nihat Tansoy Okulu'nda, lise öğrenimini ise Edremit Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2009 yılında yerleştiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında, İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2015 yılında tamamladı. 2014 yılında Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlayan Emre MANDEV 2014 Kasım ayından beri Erzurum Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Arş. Gör. Olarak çalışmaktadır.

