



**MİNİKANALLARDA MANYETİK ALAN ETKİSİ
ALTINDA MANYETİK NANOAKIŞKANLARIN
ZORLANMIŞ TAŞINIMLA ISI TRANSFERİ
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Burak MURATÇOBANOĞLU

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Eyüphan MANAY**

2023

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MİNİKANALLARDA MANYETİK ALAN ETKİSİ ALTINDA MANYETİK
NANOAKIŞKANLARIN ZORLANMIŞ TAŞINIMLA ISI TRANSFERİ
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Burak MURATÇOBANOĞLU

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Eyüphan MANAY

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2023

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

04 / 08 / 2023

Burak MURATÇOBANOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MINİKANALLARDA MANYETİK ALAN ETKİSİ ALTINDA MANYETİK NANOAKIŞKANLARIN ZORLANMIŞ TAŞINIMLA ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Burak MURATÇOBANOĞLU

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Eyüphan MANAY

Bu tez çalışmasında, minikanallarda su bazlı manyetik nanoakışkanların alternatif ve sabit manyetik alan etkisi altında ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. Deneyler, sabit ısı akısı sınır şartlarında ve laminar akış rejiminde gerçekleştirilmiştir. Saf su içerisine %0,5 ve %1 hacimsel oranlı olmak üzere $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$ nanopartikülleri dağıtılarak nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Deneyler, 300 – 1.300 Reynolds sayısı aralığında yapılmıştır. 22, 30 ve 38 mT yoğunluklarında olmak üzere üç farklı sabit manyetik alan ve alternatif manyetik alan da ise, 50 Hz frekansa sahip 3 ve 5 mT yoğunluklarının ısı transferi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda, nanoakışkan kullanımı ile ısı transferinin yanı sıra basınç düşümü ve buna bağlı olarak sürtünme faktöründe de önemli derecede artış gözlemlenmiştir. Isı transferi katsayısı ve Nusselt sayısı, nanoparçacık hacimsel oranı, Reynolds sayısı ve manyetik alan yoğunluğu ile birlikte kayda değer artışlar sergilemiştir. Manyetik alan etkisi düşük Reynolds sayılarında belirgin bir haldeyken, Reynolds sayısı arttıkça bu etki giderek azalmıştır. Ayrıca yüksek hacimsel oranlı nanoakışkanın ısı transferi performansı manyetik alandan diğerine göre çok daha fazla etkilenmiştir.

2023, 134 sayfa

Anahtar Kelimeler: $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$, Manyetik alan, Minikanal, Zorlanmış taşınım

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF MAGNETIC NANOFLUIDS WITH FORCED CONVECTION IN MINICHANNELS UNDER MAGNETIC FIELD EFFECT

Burak MURATÇOBANOĞLU

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Eyüphan MANAY

In this thesis, the heat transfer characteristics of water-based magnetic nanofluids in minichannel under the effect of alternating and constant magnetic fields were investigated. The experiments were carried out at constant heat flux boundary conditions and laminar flow regime. Nanofluids were prepared by dispersing $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$ nanoparticles in pure water at 0.5% and 1% volumetric ratios. The experiments were carried out in the range of 300 – 1,300 Reynolds numbers. The effect of three different constant magnetic fields, with intensities of 22, 30 and 38 mT, on heat transfer was researched. In addition, the effect of alternating magnetic field with frequency 50 Hz and intensities of 3 and 5 mT on heat transfer was investigated. As a consequence of the experiments, a considerable increase was observed in the pressure drop and accordingly the friction factor as well as the heat transfer with the use of nanofluids. The heat transfer coefficient and Nusselt number exhibited remarkable increases with the nanoparticle volumetric ratio, Reynolds number and magnetic field intensity. While the magnetic field effect was more evident at low Reynolds numbers, this effect gradually decreased with increasing Reynolds number. In addition, the heat transfer performance of the nanofluid with a high volumetric ratio was affected by the magnetic field much more than the other.

2023, 134 Page

Keywords: $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$, Magnetic field, Minichannel, Forced convection

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda, yardım ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, tecrübe ve bilgilerinden çokça faydalandığım danışman hocam Sayın Doç. Dr. Eyüphan MANAY’a şükranlarımı sunarım. Ayrıca, çalışmalarımı yaparken karşılaştığım her sorunla yakından ilgilenen ve bana birçok konuda zamanını ayırarak destek olan Dr. Öğr. Üyesi Emre MANDEV hocama teşekkür ederim.

Yine tez çalışmalarım sırasında manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim bölümümdeki çok değerli hocalarıma ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmamın her aşamasında yanımda olduğunu hissettiğim ve bana olan desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşim Maide Kübra’ya şükranlarımı sunarım. Ayrıca her türlü maddi-manevi desteklerinden ve dualarıyla yanımda olmalarından dolayı başta anne babam olmak üzere bütün kıymetli büyüklerime teşekkür ederim.

Burak MURATÇOB AOĞLU
Ağustos 2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Isı Transferi	3
1.1.1. İletim (Kondüksiyon) ısı transferi	4
1.1.2. Taşınım (Konveksiyon) ısı transferi	5
1.1.3. Işınım (Radyasyon) ısı transferi	7
1.1.4. Isı transferini artırma yöntemleri	8
2. KAYNAK ÖZETLERİ	10
2.1. Minikanallarda Isı Transferi.....	10
2.2. Nanoakışkanlar.....	11
2.2.1. Nanoakışkanların hazırlanması	12
2.2.2. Nanoakışkanların kararlılıkları.....	15
2.2.2.1. Nanopartikül türünün etkisi.....	18
2.2.2.2. Baz akışkan türünün etkisi	18
2.2.2.3. Nanoparçacık miktarının etkisi	19
2.2.2.4. Yüzey aktif madde kullanımının etkisi	20
2.2.2.5. Ultrasonikasyon süresinin etkisi.....	22
2.2.2.6. Asitlik derecesinin (pH) etkisi.....	25
2.2.2.7. Yüzey modifikasyonunun etkisi.....	27
2.2.3. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri	28
2.2.3.1. Nanoakışkanların termal iletkenlikleri	32
2.2.3.2. Nanoakışkanların viskoziteleri	40
2.2.4. Manyetik nanoakışkanlar	46
2.2.4.1. Manyetik alanın ferroakışkanlar üzerindeki etkileri	50

3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	59
3.1. Deneysel Materyaller	61
3.1.1. Hassas terazi.....	61
3.1.2. Ultrasonik homojenizatör	62
3.1.3. Isıl iletkenlik ölçer.....	63
3.1.4. Viskozimetre	64
3.1.5. Dişli pompa	64
3.1.6. Debimetre	65
3.1.7. Su banyosu ve serpantin	65
3.1.8. Güç kaynakları	66
3.1.9. Elektromıknastıslar	68
3.1.10. Basınç transdüzeri ve dijital indükatör	69
3.1.11. Veri okuma kartı.....	69
3.1.12. Isıl çiftler	70
3.2. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi ve Hesaplamalar	72
3.2.1. Nanoakışkanların hazırlanması işlemlerinde kullanılan hesaplamalar	72
3.2.2. Isı transferi ve basınç kaybının değerlendirilmesi için gerekli hesaplamalar	74
3.2.3. Belirsizlik analizi	76
3.3. Nanoakışkanların Sentezlenmesi ve Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	77
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	82
4.1. Saf Suya Ait Isı Transferi ve Basınç Düşümü	82
4.2. Nanoakışkanların Isı Transferleri ve Basınç düşümleri	85
4.3. DC Manyetik Alan ile Manipüle Edilen Nanoakışkanların Isı Transferleri	89
4.4. AC Manyetik Alan ile Manipüle Edilen Nanoakışkanların Isı Transferleri	97
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR	107

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\forall$	Hacim (m ³)
μ	Dinamik viskozite (kg/ms)
A	Alan (m ²)
B	Manyetik alan yoğunluğu (mT)
C_p	Özgül ısı kapasitesi (j/kgK)
d	Nanoparçacık çapı (nm)
D_h	Hidrolik çap (m)
f	Sürtünme faktörü
Gr	Grashof sayısı
Gz	Graetz sayısı
h	Isı transfer katsayısı (W/m ² K)
I	Akım (A)
κ	Boltzman sabiti (kJ/kmolK)
k	Isıl iletkenlik (W/mK)
L	Uzunluk (m)
m	Kütle (kg)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
M	Moleküler ağırlık (g/mol)
Nu	Nusselt sayısı
P	Basınç (Pa)
Pr	Prandtl sayısı
$\dot{q}$	Isı akısı (W/m ²)
$\dot{Q}$	Isı transfer hızı (W)
Re	Reynolds sayısı
Ri	Richardson sayısı
T	Sıcaklık (°C)
t	Zaman (s)
v	Hız (m/s)
V	Voltaj (V)

V_b	Brownian hızı (m/s)
γ	Arayüzey tabaka kalınlığı ve nanoparçacık yarıçapı oranı
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
σ	Stefan-Boltzman sabiti (W/m ² K ⁴)
ϕ	Hacimsel nanoparçacık oranı
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)

<u>Alt indisler</u>	<u>Açıklama</u>
----------------------------	------------------------

∞	Ortam
b	Kaynama noktası
bf	Temel akışkan
c	Kesit
ç	Çıkış
fr	Donma noktası
g	Giriş
h	Hidrolik
lr	Arayüzey tabakası
nf	Nanoakışkan
np	Nanoparçacık
s	Yüzey
t	Termal

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Isı transferi mekanizmaları (Anonim 2023).....	4
Şekil 2.1.	Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan nanomateriyallerin sınıflandırılması ve yaygın kullanılan türleri (Babar and Ali 2019)	12
Şekil 2.2.	İki adımlı nanoakışkan hazırlama yönteminin şeması (Muhammad et al. 2021).....	14
Şekil 2.3.	Nanoakışkanların kararlı ve farklı şekillerde kararsız durumları (Ilyas et al. 2017).....	15
Şekil 2.4.	Nanoakışkanın zeta potansiyeli (Mukherjee and Paria 2013).....	16
Şekil 2.5.	Nanoakışkanların kararlılıklarını etkileyen faktörler (Afshari et al. 2022)	17
Şekil 2.6.	Yüzey aktif madde kaplı bir nanopartikül (Miyazawa et al. 2021).....	20
Şekil 2.7.	Nanoakışkanın doğrudan (a) ve dolaylı (b) ultrasonikayona maruz bırakılması	23
Şekil 2.8.	Manyetik alan etkisi altında akışkan içerisindeki nanopartiküllerin hareketleri (Philip et al. 2007).....	51
Şekil 3.1.	Deney sisteminin şematik görüntüsü ve kullanılan ekipmanların görevleri	60
Şekil 3.2.	Kanal yüzeyine yerleştirilen ısıl çiftlerin konumları.....	60
Şekil 3.3.	Deney sistemi ve kullanılan cihazlar.....	61
Şekil 3.4.	Hassas terazi (Anonim 2023b)	62
Şekil 3.5.	Hielscher marka ultrasonik homojenizatör (Anonymous 2023a)	63
Şekil 3.6.	THB-100 ısıl iletkenlik ölçer (Anonymous 2023b)	63
Şekil 3.7.	Viskozimetre (Anonymous 2023c)	64
Şekil 3.8.	Mikro dişli pompa (Anonymous 2023d).....	65
Şekil 3.9.	Debimetre (Anonymous 2023e)	65
Şekil 3.10.	Bakır serpantin	66
Şekil 3.11.	Statik su banyosu.....	66
Şekil 3.12.	Doğru akım güç kaynağı ve analizörü.....	67
Şekil 3.13.	Alternatif akım güç kaynağı.....	67
Şekil 3.14.	Doğru akım güç kaynağı	68
Şekil 3.15.	Elektromıknatıs	68
Şekil 3.16.	Basınç transdüzeri ve indükatörü	69

Şekil 3.17. Veri okuma kartı.....	69
Şekil 3.18. Isıl çiftlerin kalibrasyon eğri ve denklemleri	71
Şekil 3.19. $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$ nanoparçacıklarının sıcaklığa bağlı DSC eğrisi	74
Şekil 3.20. Ölçülen viskozite ve ısı iletkenlik değerlerinin literatürdeki veriler kullanılarak doğrulanması	79
Şekil 3.21. Kullanılan akışkanların ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi.....	80
Şekil 3.22. Kullanılan akışkanların viskozitelerinin sıcaklıkla değişimi	81
Şekil 4.1. Saf suyun deneysel Nusselt sayısı değeri ile literatürde bulunan koralasyonların karşılaştırılması	84
Şekil 4.2. Teorik ve deneysel sürtünme faktörlerinin karşılaştırılması	84
Şekil 4.3. Saf su ile nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması	86
Şekil 4.4. Saf su ile nanoakışkanların Nusselt sayılarının karşılaştırılması	87
Şekil 4.5. Saf su ve nanoakışkanların farklı Reynolds sayılarında basınç düşümleri ..	88
Şekil 4.6. Saf su ve nanoakışkanların farklı Reynolds sayılarında sürtünme faktörleri	88
Şekil 4.7. 22 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması	90
Şekil 4.8. 30 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması	90
Şekil 4.9. 38 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması	91
Şekil 4.10. 22 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması	92
Şekil 4.11. 30 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması	92
Şekil 4.12. 38 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması	93
Şekil 4.13. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan yoğunluklarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	94
Şekil 4.14. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan yoğunluklarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	95
Şekil 4.15. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan yoğunluklarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	96

Şekil 4.16. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan yoğunluklarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	96
Şekil 4.17. 3 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması	98
Şekil 4.18. 5 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması	98
Şekil 4.19. 3 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması	99
Şekil 4.20. 5 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması	100
Şekil 4.21. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı AC manyetik alan yoğunluklarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	101
Şekil 4.22. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı AC manyetik alan yoğunluklarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.....	101
Şekil 4.23. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı AC manyetik alan yoğunluklarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	102
Şekil 4.24. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı AC manyetik alan yoğunluklarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi	102

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Kanalların hidrolik çaplarına göre sınıflandırılması (Dixit and Ghosh 2015)	1
Çizelge 1.2. Isı transfer oranını arttırmada aktif ve pasif yöntemler (Sheikholeslami et al. 2015).....	9
Çizelge 2.1. Nanoakışkan türleri ve hazırlanma işlemleri özet tablosu	14
Çizelge 2.1. (devam).....	15
Çizelge 2.2. Çeşitli nanoakışkanlar için maksimum zeta potansiyelinin elde edildiği pH değerleri	26
Çizelge 2.3. Eşitlik 2.5 için katsayılar ve kısıtlamalar.....	31
Çizelge 2.4. Nanoakışkanların termal iletkenlikleri üzerine literatür özeti	35
Çizelge 2.4. (devam).....	36
Çizelge 2.5. Nanoakışkanların termal iletkenliklerinin tahmini için literatürde yer alan korelasyonlar	36
Çizelge 2.5. (devam).....	37
Çizelge 2.5. (devam).....	38
Çizelge 2.5. (devam).....	39
Çizelge 2.6. Nanoakışkanların viskozite artışları üzerine kısa literatür özeti.....	43
Çizelge 2.6. (devam).....	44
Çizelge 2.7. Nanoakışkanların viskozite tahmini için çeşitli korelasyonlar	44
Çizelge 2.7. (devam).....	45
Çizelge 2.7. (devam).....	46
Çizelge 2.8. Manyetik nanoakışkanlara manyetik alan uygulanması üzerine literatür özeti	55
Çizelge 2.8. (devam).....	56
Çizelge 2.8. (devam).....	57
Çizelge 2.8. (devam).....	58
Çizelge 3.1. Belirsizlik analizi sonuçları	77
Çizelge 3.2. Nanoakışkanları hazırlamak için gerekli akışkan ve nanopartikül miktarları	78
Çizelge 3.3. NiZnFe ₄ O ₄ nanopartiküllerinin özellikleri (Anonymous 2023g).....	78

1. GİRİŞ

Endüstriyel ve teknolojik gelişmeler ile birlikte mikro işlemciler, yakıt hücreleri, bataryalar, kompleks ısı değiştiriciler vs. gibi çok sayıda yüksek miktarlarda ısı üreten cihazlar hayatımızın bir parçası olmaktadır. Bahsedilen sistemlerin çoğunun düzgün ve daha uzun vadeli işletilebilmeleri için bu üretilen ısının sistemden uzaklaştırılması bir mecburiyet olarak karşımıza çıkmaktadır. Hem soğutulmak istenilen sistemlerin küçük boyutlarda olmaları hem de mini kanal ve mikro kanalların, makro kanallara göre daha yüksek ısı transfer oranı sağlamaları tercih edilmelerinin en önemli sebepleridir. Kanalların hidrolik çaplarına göre sınıflandırılması iki farklı araştırmacı tarafından yapılmış ve Çizelge 1.1’de sunulmuştur.

Çizelge 1.1. Kanalların hidrolik çaplarına göre sınıflandırılması (Dixit and Ghosh 2015)

Mehendale et al. (2000)		Kandlikar (2002)	
İsimlendirme	Hidrolik çap	İsimlendirme	Hidrolik çap
Standart kanallar	$D_h > 6 \text{ mm}$	Standart kanallar	$D_h > 3 \text{ mm}$
Kompakt geçişler	$1 \text{ mm} < D_h \leq 6 \text{ mm}$	Mini kanallar	$200 \text{ } \mu\text{m} < D_h \leq 3 \text{ mm}$
Mezo kanallar	$100 \text{ } \mu\text{m} < D_h \leq 1 \text{ mm}$	Mikro kanallar	$10 \text{ } \mu\text{m} < D_h \leq 200 \text{ } \mu\text{m}$
Mikro kanallar	$1 \text{ } \mu\text{m} < D_h \leq 100 \text{ } \mu\text{m}$	Geçiş kanalları	$0,1 \text{ } \mu\text{m} < D_h \leq 10 \text{ } \mu\text{m}$
-	-	Moleküler nano kanallar	$0,1 \text{ } \mu\text{m} > D_h$

Mikrokanallar küçük hidrolik çaplara sahip olduklarından dolayı geniş bir ısı transfer yüzey alanı ve yüksek konvektif ısı transfer katsayısı elde edilmesini kolaylaştırır. Bu avantajlarının yanı sıra mikro kanallardaki karşılaşılan en büyük zorluk çalışma akışkanının kanallarda sirküle etmek için gerekli pompa gücünün sağlanmasıdır. Çünkü mikro kanallarda oluşan basınç kaybı diğer kanal tiplerine göre oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Standart bir kanalda basınç düşümü mikro kanallardaki kadar fazla olmasa da mikro kanal kadar ısı transfer oranı sağlayamamaktadır. Bu da hem yüksek ısı transfer performansı hem de mikro kanallara göre daha az basınç kaybı olan

mini kanalları önemli kılmaktadır. Bahsedilen konuyla ilgili bir çalışma Dang and Teng (2011) tarafından gerçekleştirilmiştir. Mini ve mikro kanallara sahip ısı değiştiricilerinin ısı transferi ve basınç düşümü performanslarının incelendiği çalışmada, mikro kanalların ısı transferi açısından daha üstün performans sergilediği, ancak mini kanallara göre daha fazla basınç kaybına sebep olduğu belirlenmiştir.

Kanallarda ısı transfer etmek için kullanılan akışkanların ısı iletkenliğini arttırmak ve bu sayede ısı alıcıların termal performanslarını iyileştirilmesi için nanoakışkanlar son birkaç on yıldır kullanılmaktadır. Bu amaçla Ho and Chen (2013) tarafından minikanallı bir ısı alıcının performansı Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılarak artırılması hedeflenmiştir. Bir başka çalışmada minikanallı ısı alıcının basınç düşümü ve ısı transferi karakteristiği incelenmiş, akışkan olarak $TiO_2+Al_2O_3$ -su hibrit nanoakışkanı kullanılmıştır (Kumar and Sarkar 2019).

Nanoakışkanlar içerisinde hem sıvı özellikleri hem yüksek ısı iletkenlikleri hem de manyetik özellik göstermelerinden dolayı sıklıkla tercih edilen ve manyetik nanopartiküller kullanılarak elde edilen ferroakışkanlar olarak isimlendirilen özel bir grup mevcuttur. Bu grup genellikle demir ve demirin oksit formlarından oluşmaktadır. Literatürde en çok tercih edilen kolay ulaşılabilmesinden dolayı Fe_3O_4 nanopartikülleri ile elde edilen nanoakışkanlardır. Fe_3O_4 -su nanoakışkanları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal bir çalışmada, serpantin ve spiral mini kanallı ısı alıcılar modellenmiştir. Geleneksel teorik modeller ve deneysel olarak elde edilen termofiziksel özellikler kullanılmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, nanoakışkanların saf sudan daha fazla ısı transferi oranı sağladığı tespit edilmiştir (Afshari and Muratçobanoğlu 2023).

Ferroakışkanlar üstün ısı transferi performanslarının yanı sıra gösterdikleri manyetik özellikler tercih edilmelerinin en önemli sebepleri arasındadır. Manyetik nanopartiküller manyetik alana maruz kaldıklarında akışkan içerisine dağıtılmış bu partiküller manipüle olarak hem birbiri ile hem de kanal yüzeyi ile etkileşime girmekte bu sayede ısı transferi artmaktadır. Bu konuda çeşitli araştırmalar yapılmakta ve farklı parametreler kullanılarak ısı transferi ve basınç düşümü üzerine manyetik alanın etkileri incelenmektedir. Ferroakışkanlara sabit manyetik alan uygulanmasının ısı transferi

üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada, CoFe_2O_4 -su ve Fe_3O_4 -su nanoakışkanları kullanılmıştır. Laminer akış şartlarında 2 farklı yoğunluktaki manyetik alan uygulanarak gerçekleştirilen çalışmada Nusselt sayısındaki artış gösterilmiştir (Dinarvand et al. 2023).

Bu tez çalışmasında, minikanallarda nanoakışkanların manyetik alan etkisi altındaki ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri incelenmiştir. Nanoakışkan olarak literatürde ısı transferi çalışmalarında örneği olmayan düşük yoğunluklu $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$ nanopartikülleri tercih edilmiştir. Nanoakışkanların stabilite problemleri kullanımlar önündeki en büyük engel olarak görülmektedir. Bunun da en önemli sebebi yoğunluğu yüksek partiküllerin baz akışkan içerisinde çok çabuk çökelmeleridir. Özellikle manyetik alan etkisi ile manipüle olan nanopartiküllerin birçoğunun yoğunluğu çok yüksektir. Bu sebeple deneysel çalışmalarda çökme problemi ile sıklıkla karşılaşmaktadır. Bu çalışmada yoğunluğu düşük nanopartiküller seçilerek bu problemin önüne geçilmeye çalışılacaktır. Manyetik alan etkisi elektromıknatıs kullanılarak alternatif ve sabit olarak farklı manyetik alan yoğunluklarında incelenecektir. Bütün deneyler laminer akış rejiminde yapılacak ve farklı hacimsel oranlarda hazırlanan nanoakışkanların manyetik alana tepkisi araştırılacaktır.

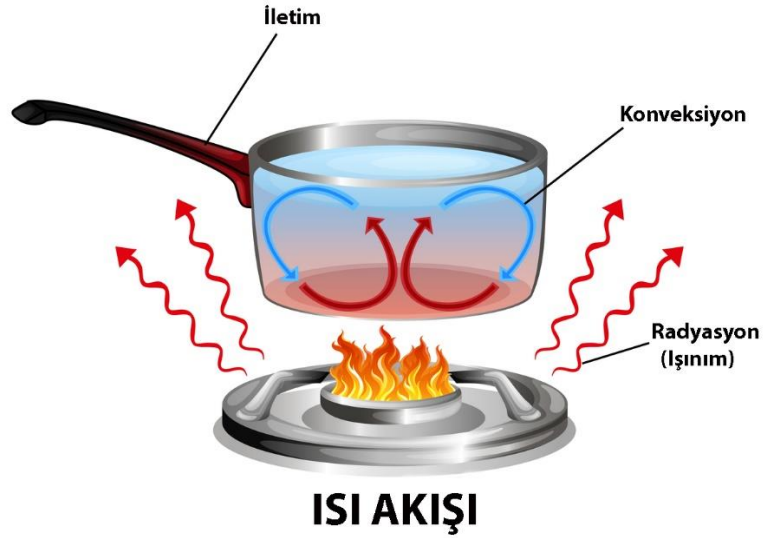
1.1. Isı Transferi

Isı, sıcaklık farkından dolayı aktarılan enerji olarak tanımlanır. Daima daha yüksek sıcaklıktaki bölgelerden daha düşük sıcaklıktaki bölgelere doğru akar. Mühendislik alanında ısı transfer hızlarının hesaplanması ve belirlenmesiyle ilgilenilmektedir. Çünkü bu parametre, mühendisler tarafından ısı transferinin meydana geldiği bileşenleri ve sistemleri tasarlamak için kullanılır. Isı transferi, teknolojinin hemen hemen tüm alanlarında önemlidir. Bununla birlikte mühendislik alanında, ısı transferi ile başta ısının bir akışkandan diğerine aktarıldığı ısı değiştiricilerde, motorlarda, ısıtma-soğutma sistemlerinde, kazanlarda, türbinlerde, radyatörlerde vs. gibi çok sayıda uygulamada karşılaşılmaktadır. Isı transferi her yerde ve sürekli olarak meydana gelmektedir. Isı transferinin olmadığı düşünülebilecek tek alan tamamen izole edilmiş ortamlardır. Ancak tamamen izole bir ortam elde etmek mümkün değildir. Isı transfer hızı çeşitli malzemeler kullanılarak azaltılabilir. Bu sebeple birçok termal tasarım, uygun

1. GİRİŞ

yalıtım sağlanarak ısı transfer hızlarının azaltılmasını öngörmektedir. Buna en iyi örnek binaların yalıtımı olarak gösterilebilir, ancak daha pek çok örnek sunmak mümkündür.

Mühendislik açısından ısı transferi, ısıнын bir ortam içinde, bir ara yüz boyunca veya bir yüzeyden diğerine aktığı hızın yanı sıra ilgili sıcaklıkların hesaplanmasını da kapsamaktadır. Isı transfer işlemlerinin analizi, bazı termodinamik kavramlarının kullanılmasını gerektirir. Özellikle termodinamiğin birinci yasası olan enerjinin korunumu ilkesinden sıklıkla faydalanılmaktadır. Isı transferinde, enerjinin korunumu ilkesine hiçbir iş yapılmadığında bir enerji veya ısı dengesi olarak yararlanmak yaygın bir uygulamadır. Termodinamikte ısı, sıcaklık gradyanları veya sıcaklık farklarından kaynaklanan enerji transferi olarak tanımlanır (Mills and Coimbra 2015). Isı transferinin iletim, taşınım ve ışıyım olarak isimlendirilen 3 temel mekanizması vardır. Şekil 2.1’de bu mekanizmalar gösterilmiştir ve aşağıda alt başlıklar halinde açıklanmıştır.



Şekil 1.1. Isı transferi mekanizmaları (Anonim 2023a)

1.1.1. İletim (Kondüksiyon) ısı transferi

Isı iletimi, yüksek enerjiye sahip parçacıklardan bitişiklerinde bulunan daha düşük enerjili parçacıklara termal enerjinin aktarılması olarak tanımlanmaktadır. Isı iletimi katı maddelerde olduğu gibi sıvı ve gaz halde bulunan maddelerde de meydana gelebilir. Ancak bunun gerçekleşmesinin bağlı olduğu şart yığın hareketinin olmamasıdır. İletim ile ısı transferi belirli miktar enerjiye sahip moleküllerin birbiriyle etkileşimleriyle

doğrudan ilişkilidir. Mikroskobik düzeyde iletim mekanizmaları karmaşıktır. Gazlardaki molekül çarpışmaları, kristallerdeki kafes titreşimleri ve katılardaki serbest elektron akışı gibi çeşitli fenomenleri kapsar (Nellis and Klein 2008; Cengel and Ghajar 2011).

Isı iletiminin teorisi 1822 yılında Fransız matematiksel fizikçi J. B. Fourier tarafından yayınlanan bir kitapta ampirik bir yasa formüle edilmiştir. Bu yasaya göre ısı iletimden kaynaklanan ısı akısı, sıcaklık gradyanının büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Bu yasa kararlı hal ve tek boyutlu ısı akısına ilişkin problemlerde kullanılmaktadır (Lienhard and John 2005; Mills and Coimbra 2015). Fourier ısı iletim yasası olarak adlandırılan ampirik ifade Eşitlik 2.1’de sunulmuştur. Bu eşitlikte dT/dx sıcaklık gradyanını, k ise ısı transferinin gerçekleştiği ortamın ısı iletkenlik katsayısını ifade etmektedir.

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

1.1.2. Taşınım (Konveksiyon) ısı transferi

Basit bir ifade ile taşınım ısı transferi, bir yüzey ile ona bitişik, hareket eden akışkan arasındaki enerji aktarımı olarak tanımlanabilir. İletim ve akışkan hareketinin etkilerinin birleştiği bir ısı transferi durumudur. Yüzeye temas eden akışkanın hareket hızı ile taşınım ısı transferi arasında bir orantı vardır. Yani akışkan hızı ne kadar yüksek olursa ısı transferi de o kadar büyük olur. Yüzeyden akmakta olan akışkan sınır tabaka adı verilen yavaşlatılmış ince bir bölge oluşturur. Yüzeyden çekilen ısı bu katmana aktarılır ve yüzeyden uzaklaştırılır (Lienhard and John 2005; Cengel and Ghajar 2011).

Akış, borudan pompalanan bir sıvı veya hava içerisinde itilerek hareket eden uçak durumunda olduğu gibi zorlanabilir. Öte yandan, akış, radyatörden ortamın ısıtıldığı durumunda olduğu gibi, yoğunluk farkından kaynaklanan kaldırma kuvvetleri tarafından yönlendirilerek (doğal) olabilir. Her iki akış türü de boru akışı gibi dâhili veya araç üzerinden akış gibi harici olabilir. Ayrıca hem zorlanmış hem de doğal akışlar laminar veya türbülanslı olabilir. Laminer akışlar daha düşük hızlarda ve daha küçük boyutlarda karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca viskozitesi yüksek akışkanlar için baskındır. Ayrıca doğal ve zorlanmış taşınım etkilerinin bir arada görüldüğü karma taşınım da bir üçüncü sınıfı teşkil etmektedir. Genellikle zorlanmış taşınımlarda doğal taşınım etkileri ihmal

1. GİRİŞ

edildiğinden karma taşınım konusundan çokça bahsedilmez. Ancak özellikle düşük Reynolds sayılarına sahip akışlarda doğal taşınımı ihmal etmek hatalı bir yaklaşım olabilir. Doğal taşınımın ihmal edilemeyecek boyutta olup olmadığı Richardson sayısı (Ri) olarak bilinen aşağıdaki oran ile tespit edilmektedir.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (1.2)$$

Bu sayı $0,1 < Ri < 10$ aralığında olduğu zaman doğal taşınım ve zorlanmış taşınımın etkileri bir arada görülmektedir. Bu denklemde Gr , Grashof sayısıdır ve akışkan üzerine etkiyen kaldırma kuvvetinin viskoz kuvvete oranını gösterir. Re sayısı ise akış rejimini belirleyen ve akışkan üzerine etkiyen atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olan boyutsuz bir parametredir (Incropera and Dewitt 2010).

Bütün bunlara ek olarak, kaynama ve yoğunlaşma gibi faz değişikliklerinin meydana geldiği ısı transferi işlemleri de taşınım olarak düşünülür. Bunun sebebi yoğunlaşma sırasında sıvı damlalarının yağması, kaynama sırasında ise kabarcıkların yükselmesi bir akışkan hareketi oluşturmaktadır.

Konveksiyon yoluyla ısı transferi hızı genellikle yüzeyin geometrisi ve sıcaklığının, akışkan sıcaklığı ve hızının ve akışkanın termofiziksel özelliklerinin kompleks bir fonksiyonudur. Taşınımın bu kompleks yapısına rağmen, taşınım ısı transfer hızının sıcaklık farkıyla orantılı olduğu fark edilebilir. 1701 yılında Isaac Newton tarafından taşınım ısı transferi incelenmiş ve Newton soğuma yasası olarak bilinen aşağıdaki ifade öne sürülmüştür (Mills and Coimbra 2015).

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (1.3)$$

Burada h ısı transfer katsayısını, A_s taşınımın olduğu yüzeyin alanını, T_s yüzey sıcaklığını ve T_∞ ise yüzeyden yeteri kadar uzakta olan akışkanın sıcaklığını ifade etmektedir. Ayrıca burada verilen ısı transfer katsayısı değeri akışkanın bir özelliği değildir. Taşınım katsayısı deneysel olarak belirlenebilmektedir.

1.1.3. Işınım (Radyasyon) ısı transferi

Isıl radyasyon, bir maddenin molekül, atom ve elektronlarının enerjilerindeki değişme sonucu yayılan mikroskobik düzeydeki aktivitelerdir. Bu aktivitelerin şiddetinin ölçüsü sıcaklık değerleridir ve sıcaklık arttıkça ısı ışınım yayılımı artmaktadır. Mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklığa sahip bütün cisimler sürekli olarak bir elektromanyetik radyasyon vasıtasıyla enerji yayarlar. Böyle bir enerji akışının yoğunluğu cismin yüzey yapısına ve sıcaklığına bağlıdır (Lienhard and John 2005; Cengel and Ghajar 2011). Diğer ısı transferi mekanizmaları ile ısı transferinin gerçekleşmesi maddesel bir ortam gerektirirken, ışıınım ile ısı transferi ortamda madde bulunmasına ihtiyaç duymaz. Aslında radyasyon ısı transferi maddenin olmadığı vakum ortamlarında daha verimli bir şekilde gerçekleşir.

Isıl ışıınım, yaklaşık 30 ila 30.000 K sıcaklık aralığı ve 0,1 – 100 µm dalga boyu aralığı ile ilişkilidir. Ancak, pratik kullanımda yaklaşık 0,4 – 15 µm dalga boyu aralığı ile ilgilenilmektedir. Bu dalga boyu ve sıcaklık aralığına karşılık gelen fotonların enerjileri, üzerinde bulundukları maddenin atomlarının ve moleküllerinin dönme, titreşim ve elektronik enerji durumlarını değiştirebilirler. Bunun sonucunda, malzemenin iç enerjisi ve buna karşılık gelen sıcaklık değerleri de değişir (Rohsenow et al. 1998).

Bir yüzeye gelen toplam ışıınım akısının (G) bir kısmı yüzey tarafından soğurulur, bir kısmı geri yansıtılır ve bir kısmı da geçirilir. Gelen ışıınım akısının yüzey tarafından geçirilen miktarına geçirgenlik (τ), soğurulan miktarına soğurganlık (α) ve yüzey tarafından yansıtılan miktarına yansıtıcılık (ρ) ismi verilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Cengel and Ghajar 2011).

$$\tau = \frac{\text{Geçirilen ışıınım}}{\text{Gelen ışıınım}} = \frac{G_{tr}}{G}, \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (1.4)$$

$$\alpha = \frac{\text{Soğurulan ışıınım}}{\text{Gelen ışıınım}} = \frac{G_{abs}}{G}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1.5)$$

$$\rho = \frac{\text{Yansıtılan ışınlm}}{\text{Gelen ışınlm}} = \frac{G_{\text{ref}}}{G}, \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (1.6)$$

Burada yüzeye gelen toplam ışınlm akısı G ile bunun geçirilen kısmı G_{tr} ile yansıtılan kısmı G_{ref} ile ve son olarak da soğurulan kısmı G_{abs} ile gösterilmektedir. Termodinamiği birinci kanununa göre geçirilen, yansıtılan ve soğurulan ışınlmların toplamının gelen toplam ışınlm akısına eşit olması gerekir.

$$G_{\text{ref}} + G_{\text{abs}} + G_{\text{tr}} = G \quad (1.7)$$

T_s sıcaklığına sahip bir yüzeyin çevresine yayabileceği maksimum ışınlm hızı Stefan-Boltzman yasası ile tespit edilir. Bu kanunun Eşitlik 2.8’de sunulmuştur. Burada, $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ değeri Stefan-Boltzman sabitidir.

$$\dot{Q} = \sigma A_s T_s^4 \quad (1.8)$$

1.1.4. Isı transferini arttırma yöntemleri

Hayatın her alanında ihtiyaç duyulan enerjinin verimliliği ve tasarrufu önemli bir konudur. Bu sebeple ısı transferi uygulamalarında da enerji verimliliği oldukça önem arz etmektedir. Isı transferi hızını arttırmak üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmektedir. Genellikle, ısı transferi geliştirme teknikleri aktif yöntem, pasif yöntem ve bileşik yöntem olmak üzere üç kategoride sınıflandırılır. Bileşik yöntem, karmaşık tasarımlarda kullanır, bu nedenle sınırlı uygulamaları vardır.

Aktif metotlar, ısı transferi oranını arttırmak için, sisteme bir miktar harici güç girişi gerektirirler. Ekstra ekipman gerektirdiğinden bu yöntemler birçok pratik uygulamada sınırlı kalmaktadır. Pasif yöntemler ise harici bir güç girişine ihtiyaç duymadan geometrik değişimler, yüzey modifikasyonları ve ek cihazlar kullanarak ısı transferi hızını arttırmaktadır. Yaygın olarak kullanılan aktif ve pasif ısı transferini arttırma yöntemleri Çizelge 1.2’de sunulmaktadır.

1. GİRİŞ

Çizelge 1.2. Isı transfer oranını arttırmada aktif ve pasif yöntemler (Sheikholeslami et al. 2015).

Aktif yöntemler	Pasif Yöntemler
Mekanik Yardımcılar	Genişletilmiş yüzeyler
Yüzey titreşimi	Pürüzlü yüzeyler
Akışkan titreşimi	Girdap akış cihazları
Elektrostatik alanlar	Sarmal Tüpler
Enjeksiyon ve İndüksiyon (Emme)	Yüzey kesintileri ve çıkıntıları
Manyetik alanlar	Katkı Maddeleri

Termal iletkenliği sıvılardan daha yüksek olan nano boyuttaki katı partiküllerin akışkan içerisine çeşitli yöntemler ile dağıtılarak hazırlanan nanoakışkanlar, pasif ısı transferini arttırma yöntemleri içerisinde çokça kullanılmakta ve çeşitli parametreler ile test edilmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Minikanallarda Isı Transferi

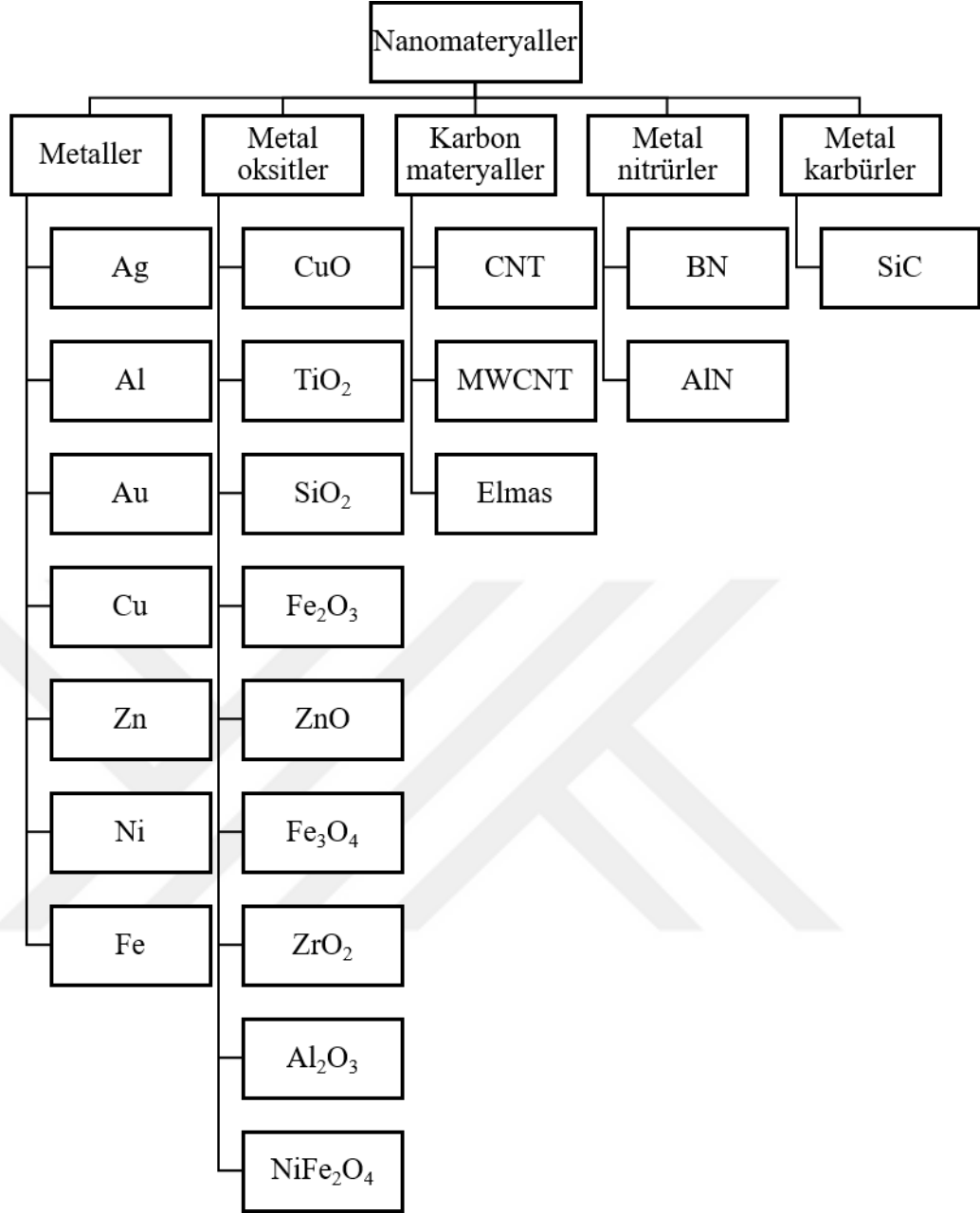
Küçük hidrolik çaplara sahip kanallar daha yüksek ısı transferi hızı sağladıkları için, gelişen teknolojiyle birlikte yüksek ısı akısı üreten cihazların kullanımı çoğalmış ve bu yüzden bu cihazların soğutulmasında mikro ve minikanal soğutma önem kazanmıştır. Mikrokanallarda meydana gelen yüksek basınç düşümü, onların kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Bu sebeple, standart kanallardan daha yüksek konvektif ısı transfer katsayısına sahip ve mikrokanallardan daha düşük basınç kaybı yaratan minikanalların kullanılmaları gerekli olmaktadır. Araştırmacılar farklı akış rejimlerinde ve farklı iş akışkanları kullanarak minikanallarda ısı transferi üzerinde araştırmalar gerçekleştirmektedirler. Bütün bunların yanı sıra, dalgalı kanalların kullanımı (Mohammed et al. 2011), yüzey pürüzlülüğünün artırılması (Mandev and Manay 2022), harici manyetik alan uygulanması (Afrand et al. 2015), kanal şeklinin modifiye edilmesi (Gunnasegaran et al. 2010), iş akışkanının daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip akışkanların kullanılması (Saeed and Kim 2018) gibi ısı transferi artırma yöntemleri literatürde benimsenmektedir.

Minikanallarda ısı transferi ile ilgili çok sayıda çalışma literatürde mevcuttur. Bahsedilen bu çalışmalara örnek olarak sabit ısı akısı koşullarında ve laminar akış rejiminde Xie et al. (2009) Tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışma gösterilebilir. Bu çalışmada araştırmacılar, kanal boyutlarının, kanal duvar kalınlığının, taban kalınlığının ve akışkan hızının basınç düşüşü, termal direnç ve maksimum ısı akısı üzerindeki etkilerini sunmuşlardır. Bir başka çalışmada, minikanallı bir ısı emicinin farklı ısı akılarında ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri incelenmiş ve TiO_2 -su nanoakışkanının kullanımı ile ısı transferi oranının artırılması hedeflenmiştir (Arshad and Ali 2017). Vajravel et al. (2019) yeni bir minikanal ısı alıcı tasarımı gerçekleştirmiş ve konvansiyonel olarak sıklıkla kullanılan çoklu bir mini kanal ile yaptıkları tasarımın ısı performansını deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Tasarımda dört bölmeden oluşan bir minikanal üretmişler, aynı hidrolik çapa sahip iki kanalın performansını değerlendirmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda, tasarladıkları ve üretimini yaptıkları minikanalın daha yüksek Nusselt sayılarına sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

2.2. Nanoakışkanlar

Etilen glikol, su, yağ, hava, helyum, freon gibi yaygın olarak kullanılan ısı transfer akışkanları, yüksek ısı transferi istenilen alanlarda, termal özelliklerinin kısıtlı olması sebebiyle yetersiz kalmaktadır (Ding et al. 2006). Isı transferinin geliştirilmesi için genişletilmiş yüzeyler, akış alanında türbülans oluşturan ekipmanlar gibi pasif yöntemlere ek olarak, kullanılan akışkanların da ısıl performanslarını arttırma fikri ortaya atılmıştır. Maxwell (1873) katıların sıvılara göre çok daha üstün termal performans sergilediklerini ve bu sebeple akışkan içerisine dağıtılacak katı materyallerin, akışkanın termal iletkenliğini arttıracaklarını belirten ilk kişi olmuştur. Ancak onun zamanındaki teknoloji nano boyutta katı materyaller elde etmek için yeterli değildi. Bu sebeple milimetre veya mikrometre boyutundaki katılar, akışkan içerisinde stabil olarak dağıtılamıyor, akış alanında tıkanmalar meydana geliyor ve tortulaşma yoğun bir şekilde görülüyordu. Teknolojik gelişmelerle birlikte, çeşitli kimyasal ve fiziksel işlemler uygulanarak, nanometre boyutunda katı materyallerin elde edilmesi de kolaylaşmıştır. Bu elde edilen nanopartiküllerin akışkan içerisine dağıtılması ile oluşturulan akışkanlara nanoakışkanlar ismi Choi and Eastman (1995) tarafından verilmiştir.

Özel yöntemler kullanılarak hazırlanan nanoakışkanlar, katı-sıvı karışımı iki fazlı bir akışkandan çok tek fazlı bir akışkan olarak düşünülmelidirler. Bu sebeple akışkan içerisine nanopartiküllerin homojen bir şekilde dağılmaları önemlidir (Mandev 2017). Nanoakışkanlar, genel olarak 100 nm'nin altında boyutlara sahip metalik veya metalik olmayan katı partiküllerin bir sıvı içerisine dağıtılmasıyla elde edilirler. Nanoakışkan hazırlamada yaygın olarak kullanılan nanopartikül türleri Şekil 2.1'de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Nanoakışkanların hazırlanmasında sıklıkla tercih edilen nanomateriyallerin sınıflandırılması ve türleri (Babar and Ali 2019).

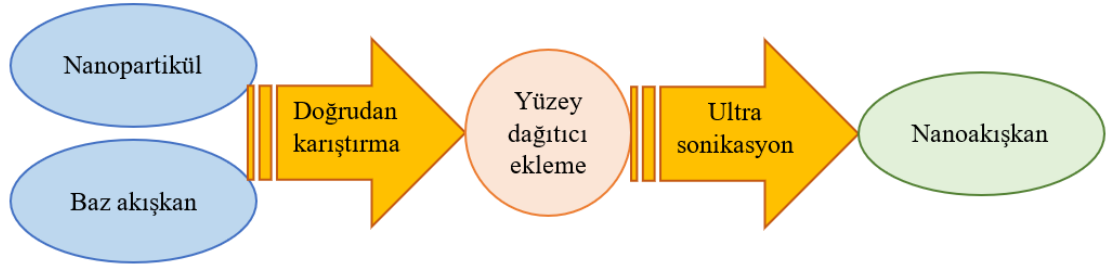
2.2.1. Nanoakışkanların hazırlanması

Nanoakışkanların hazırlanma şekli, sergileyecekleri performans açısından kilit bir öneme sahiptir. Nanoakışkanların hazırlanmasında başlıca iki metot vardır. Bunlar, tek aşamalı ve iki aşamalı metotlardır. Tek aşamalı yöntemde, nanopartiküllerin üretimi ile baz akışkan içerisine dağıtılması aynı zamanda yapılmaktadır. Bu yöntemde, doğrudan buharlaştırma veya sıvı kimyasal yöntemle nanopartiküllerin üretimi yapılır. Başlangıçta gaz fazında bulunan nanopartiküllerin baz akışkan içinde katılaştırılması işlemine

dayanan doğrudan buharlaştırma, tek aşamalı hazırlama yönteminin en yaygın olarak kullanımıdır (Li et al. 2009; Sidik et al. 2014; Devendiran and Amirtham 2016). Doğrudan buharlaştırma yaklaşımı Akoh et al. (1978) tarafından önerilmiş ve akan yağ yüzeyinde vakum buharlaştırma (VEROS) yöntemi olarak isimlendirilmiştir. Eastman et al. (2001) tarafından Cu buharı ile etilen glikol baz akışkanının doğrudan teması ile Cu'nun sıvı içinde yoğunlaşması ve katılaşması sağlanmıştır. Bu sayede ortalama çapları 10 nm'den küçük, stabil bir nanoakışkan elde edilmiştir. Hong et al. (2005) tarafından Fe/etilen glikol nanoakışkanını tek adımlı buhar yoğunlaştırma prosesi ile üretmişlerdir. Ortalama 10 nm çapa ve %0,55 hacimsel orana sahip nanoakışkan elde etmişlerdir.

Zhu et al. (2004) tarafından tek adımlı nanoakışkan hazırlanması için, mikrodalga ışıması altında, topaklanmaya uğramamış ve stabil süspansiyon elde edilebilen bir kimyasal yöntem önerilmiştir. Tsung et al. (2004) tarafından tek adımlı nanoakışkan üretimine yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde elektrik arkı ile yüksek sıcaklıklara ulaştırılarak baz akışkan içerisinde kullanılacak materyal eritilir ve buharlaştırılır. Buharlaştırılmış olan parçacıklar bir soğutma sisteminde hızla soğutulur. Bu sayede kullanılan materyal çekirdeklenmeye başlar. Wu and Kao (2011) bu yöntemi TiO₂/etilen glikol nanoakışkanı üretmek için kullanmışlardır. 6.000 – 12.000 °C sıcaklıkları arasında ark oluşturarak TiO₂ materyalini buharlaştırmışlar ve soğutma işlemine tabi tutmuşlardır. Bu sayede, ortalama 59 nm parçacık boyutlarına sahip nanoakışkan elde edilmiştir.

Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan bir diğer yöntem de iki aşamalı yöntemdir. Bu yöntemde, nanopartiküller ilk önce üretilir ve sonra baz akışkan içerisine dağıtılırlar. Genellikle dağıtma işlemi mekanik karıştırıcılar veya ultrasonik dalgalar üreten cihazlar kullanılarak sağlanır. Daha stabil süspansiyonlar elde edebilmek için ikisini bir arada kullanan çalışmalarda mevcuttur. Bu yöntemde, süspansiyonun stabilitesini arttırmak için pH kontrolü, yüzey aktif madde ekleme, nanoparçacıklara yüzey modifikasyonu gibi çeşitli işlemler de uygulanmaktadır (Ali et al. 2018). İki adımlı yöntemin yaygın olarak uygulanmasının şeması Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2. İki adımlı nanoakışkan hazırlama yönteminin şeması (Muhammad et al. 2021)

Lee et al. (2008) tarafından Al_2O_3 /su nanoakışkanı iki adımlı proses ile üretilmiştir. Nanopartiküller ve baz akışkan karıştırıldıktan sonra ultrasonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bir başka çalışma Anoop et al. (2012) tarafından ortalama 20 nm çapa sahip SiO_2 nanoparçacıklarının su içerisine dağıtılmasıyla elde edilen nanoakışkanlar üzerine gerçekleştirilmiştir. 30 dakika boyunca ultrasonikasyona tabi tutulan süspansiyonun pH değerleri izoelektrik noktadan uzak 4,5 değerinde sabit tutulmuştur. Çizelge 2.1’de literatürde rapor edilen nanoakışkan hazırlanma yöntemleri özet halinde sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Nanoakışkan türleri ve hazırlanma işlemleri özet tablosu

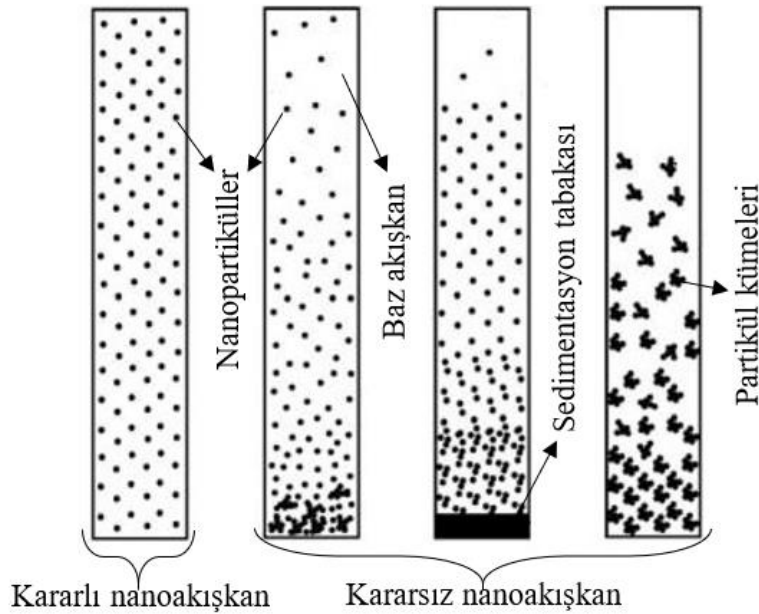
Kaynaklar	Nanoakışkan türü	Hazırlama yöntemi	Ortalama nanopartikül boyutu (nm)	Konsantrasyon (%)
Xuan and Li (2000)	Cu / trafo yağı	İki adımlı	100	2 – 5
Bang and Chang (2005)	Al_2O_3 / su	İki adımlı	47	0,5 – 4
Liu et al. (2006)	Cu / su	Tek adımlı	75 – 100	0,1
Zhu et al. (2006)	Fe_3O_4 / su	Tek adımlı	9,8	0,5 – 3
Petzold et al. (2009)	SiO_2 / su	İki adımlı	200	1*
Kole and Dey (2012)	ZnO/etilen glikol	İki adımlı	30 – 40	0,5 – 3,75
Munkhbayar et al. (2013)	Ag + MWCNT / su	Tek adımlı	-	1 – 3*
Bahrami et al. (2016)	Fe + CuO / etilen glikol + su	İki adımlı	25 – 55	0,05 – 1,5
Shenoy and Shetty (2018)	CuO / etilen glikol	Tek adımlı	24	0,0045 – 0,29*
Chaturvedi et al. (2020)	SiO_2 / su	Tek adımlı	34	0,1*

Çizelge 2.1. (devam)

Dong et al. (2022)	SiO ₂ / su + etilen glikol	İki adımlı	15	1 – 6*
--------------------	---------------------------------------	------------	----	--------

2.2.2. Nanoakışkanların kararlılıkları

Isı transferi uygulamalarında nanoakışkanların kullanımı, kararsız olmaları sebebiyle kısıtlanmaktadır. Nanoakışkanların kararlılığı, nanopartiküllerin iki faza ayrılmadan baz akışkanda ne kadar süreyle asılı kaldığı olarak tanımlanabilir. Nanopartiküllerin kendi aralarında topaklanmaları ve yoğunluklarının baz akışkandan fazla olması sebebiyle çökelmeleri kararlılıklarının bozulduğunu göstermektedir. Bu durumlar oluşmaya başladığında, nanoakışkanın pozitif etkileri de olumsuz etkilenerek azalmaya başlamaktadır. Şekil 2.3’de, nanoakışkanların kararlı ve kararsız sayıldığı durumlar gösterilmiştir.

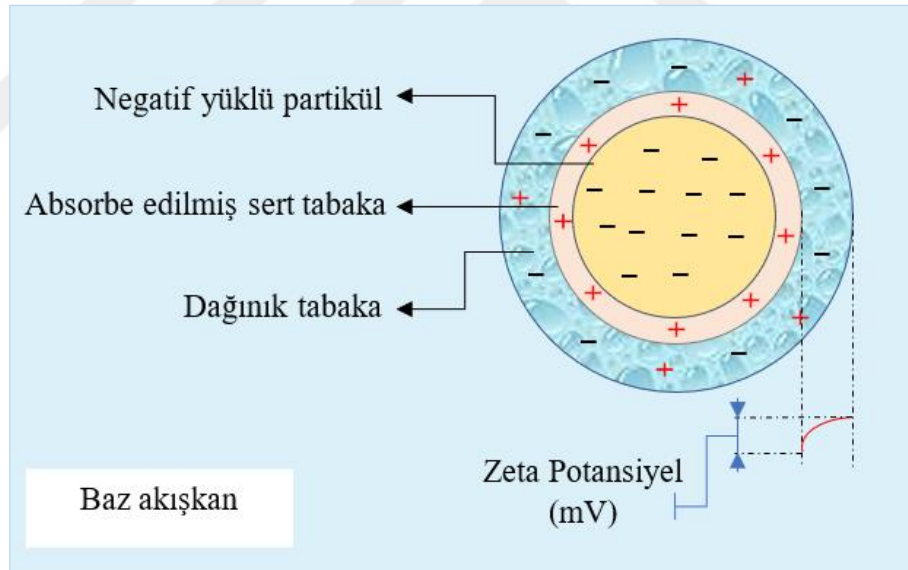


Şekil 2.3. Nanoakışkanların kararlı ve farklı şekillerde kararsız durumları (Ilyas et al. 2017).

Nanoakışkanların kararlılıklarının bu derece önemli olması sebebiyle, onların kararlı olup olmadığının tespiti ve değerlendirilmesi de aynı derece önem arz etmektedir. Bundan dolayı, birçok araştırmacı tarafın çeşitli stabilite değerlendirme yöntemleri önerilmiştir. Bunlardan en basit ve yaygın olanı sedimentasyon fotoğraflama metodudur.

Bu yöntem herhangi bir ekipman gerektirmeden gözlemlemeye dayalı bir yöntemdir. Belirli aralıklarla nanoakışkan fotoğrafları ve sonunda bu fotoğraflar yan yana getirilerek sedimentasyon oluşup oluşmadığı gözlemlenir (Ali et al. 2018).

Yaygın olarak kullanılan bir diğer stabilite değerlendirme yöntemi zeta potansiyel ölçümüdür. Zeta potansiyeli, süspansiyon ortamı ile nanopartikül üzerindeki sabit sıvı tabakası arasındaki potansiyel fark olarak tanımlanır. Zeta potansiyeli, süspansiyondaki aynı elektrik yükü ile yüklenmiş parçacıkların birbirini itme derecesini göstermektedir. Bu nedenle zeta potansiyel değeri yüksek olan nanoakışkanlar stabildir. Çünkü parçacıklar birbirini sürekli itmektedirler. Düşük zeta potansiyeline sahip olanlarda ise parçacıkların birbirine teması sonucu topaklanma eğilimi görülür. Bu alanda çalışmalar gerçekleştiren araştırmacılar tarafından, $\pm 40 - 60$ mV aralığında zeta potansiyel değerine sahip nanoakışkanların mükemmel stabiliteye sahip oldukları kabul edilmiştir. Şekil 2.4’de zeta potansiyel ölçümünün şematik olarak görüntüsü verilmiştir.



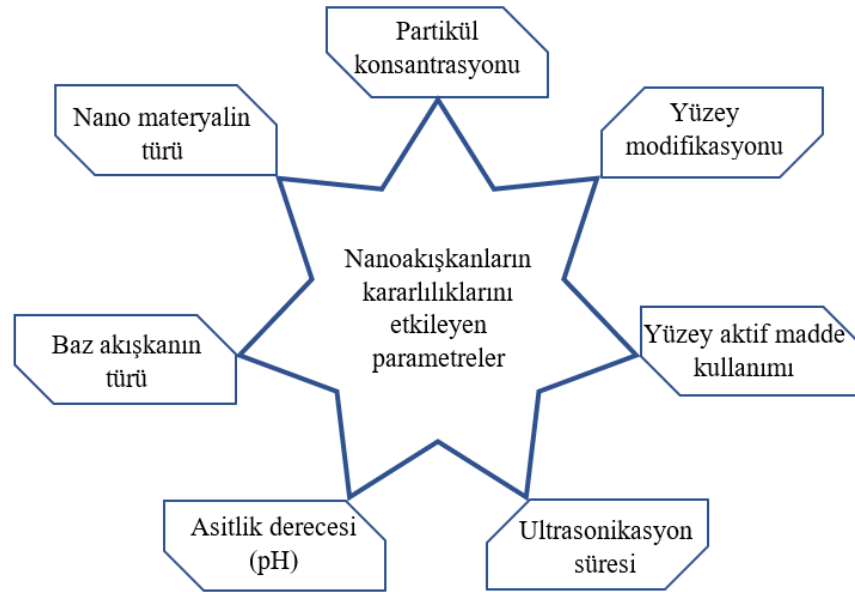
Şekil 2.4. Nanoakışkanın zeta potansiyeli (Mukherjee and Paria 2013)

Nanoakışkanların kararlılıklarının değerlendirildiği bir diğer yöntem de ultraviyole-visible (UV-vis) spektroskopi yöntemidir. Bu yöntem, eğer bir nanoakışkanın absorpsiyon bant aralığı 190 – 1.100 nm dalga aralığında ise, o zaman nanoakışkanın stabilitesini değerlendirmek için güvenilirdir. UV-vis ölçümü, absorbansın parçacık oranıyla doğru orantılı olduğunu bildiren Beer-Lambert yasasına dayanmaktadır. Absorbansın yüksek olması nanoakışkanlarda parçacık yoğunluğunun fazla olduğu

anlamına gelmektedir. Çeşitli zaman aralıklarında UV-vis spektrometre kullanılarak ölçülen absorbans değerleri, nanoakışkanın zaman içerisinde değişen stabilitesinin değerlendirilmesini sağlamaktadır (Babita et al. 2016).

Yaygın olarak kullanılan stabilite değerlendirme yöntemlerinden birisi de elektron mikroskop yöntemidir. Bu yöntemde, süspansiyon içerisinde bulunan nanopartiküllerin dağılım ve topaklanma gibi davranışlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) veya transmisyon elektron mikroskobu yardımıyla gözlemlenmesi ile stabilite tespiti yapılmaktadır. Bahsedilen mikroskoplar 0,1 nm boyutunda yüksek çözünürlüklü görüntüleri alabilmektedirler. Elde edilen görüntülerde parçacık kümelenmesi tespit edilmesi, akabinde sedimentasyon meydana geleceği ve nanoakışkanın stabilitesinin kaybolmaya başlayacağı anlamına gelmektedir (Arora and Gupta 2021).

Nanoakışkanların kararlılıklar birçok parametreye bağlıdır. Bu sebeple nanoakışkanlar üzerinde çalışan araştırmacılar belirli zorluklarla yüzleşmektedirler. Haliyle onlar, stabil nanoakışkanlar elde etmek için çeşitli yöntemler kullanmaktadırlar. Konu edilen parametrelerden en önemli olanları Şekil 2.5’de verilmiştir. Ayrıca ilerleyen bölümlerde bu parametreler açıklanmış ve literatürden kullanım şekillerine göre örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Nanoakışkanların kararlılıklarını etkileyen faktörler (Afshari et al. 2022)

2.2.2.1. Nanopartikül türünün etkisi

Farklı türden nanopartiküller kullanılarak hazırlanan nanoakışkanlar aynı kararlılığa sahip olmamaktadır. Bu konu da Al_2O_3 ve Cu nanopartikülleri kullanılarak, su bazlı nanoakışkanlar hazırlanmış ve kararlılıkları incelenmiştir. Her iki nanopartikül ile hem ayrı ayrı hem de hibrit şekilde nanoakışkan numuneleri elde edilmiştir. Cu kullanılan nanoakışkanın daha çabuk sedimantasyona uğradığı belirtilmiştir. Ayrıca hibrit olanlarda da Cu oranı fazla nanoakışkanların zamanla zeta değeri daha hızlı düşmüş ve partikül boyutları daha hızlı artmıştır (Siddiqui et al. 2019). Bir başka çalışma Nine et al. (2014) tarafından Cu/su ve Ag/su nanoakışkanları için gerçekleştirilmiştir. Aynı şartlarda üretilen nanoakışkanların zeta potansiyel değerleri ölçülmüş ve Cu/su nanoakışkanının kararlılığı hem hazırlandıktan hemen sonra hem de 24 saat sonra Ag/su nanoakışkanından daha yüksek çıkmıştır. Nanoakışkanların stabilitelerinin araştırıldığı başka bir çalışmada, $ZnFe_2O_4$ /su ve Al_2O_3 /su nanoakışkanları kullanılmıştır. Farklı oranlarda hazırlanan nanoakışkanların kararlılıkları karşılaştırılmış ve bütün numunelerde Al_2O_3 /su daha yüksek kararlılık gösterdiği belirtilmiştir. Ağırlıkça %0,02 orana sahip $ZnFe_2O_4$ /su ve Al_2O_3 /su nanoakışkanlarının zeta değerleri sırasıyla 42,7 mV ve 45,2 mV olarak elde edilmiştir (Singh et al. 2022).

2.2.2.2. Baz akışkan türünün etkisi

Nanoakışkanların kararlılık ve diğer bütün özellikleri baz akışkan türüne bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu açık olarak görülen durum nedeniyle, onların seçimini ve nanopartiküller ile girdiği etkileşimleri belirlemek gerekmektedir. Bu sebeple baz akışkan türüne göre daha stabil olan nanoakışkanlar konusu bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Witharana et al. (2013) tarafından ZnO, Al_2O_3 ve TiO_2 nanopartikülleri, propilen glikol, etilen glikol ve etilen glikol + su, propilen glikol + su baz akışkanları içerisine dağıtılarak hazırlanan nanoakışkanların stabilite değerlendirmeleri yapılmıştır. Farklı oranlarda hazırlanan nanoakışkanların zamanla renk değişimleri gözlemlenmiş, ayrıca zeta potansiyel ölçümleri de yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, propilen glikol baz akışkanına sahip nanoakışkanların daha stabil olduğu tespit edilmiştir. Bir başka çalışma Kumar and Sahoo (2019) tarafından propilen glikol ve etilen glikol baz akışkanlarına Al_2O_3 + CuO nanopartikülleri karıştırılarak elde edilen

nanoakışkanlar ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca baz akışkan olarak su ile karıştırılmış propilen glikol ve etilen glikol de kullanılmıştır. Stabilite sonuçları en iyi kararlılığın etilen glikol + su (50:50) karışımı baz akışkan kullanıldığında elde edildiğini göstermiştir. Farklı baz akışkanlarla hazırlanan hibrit (CeO_2 + MWCNT) nanoakışkanının viskozitesi üzerinde stabilite, yüzey dağıtıcı ve sonikasyon süresinin etkisinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada silikon yağı, saf su, etilen glikol ve terminol VP-I baz akışkanlar olarak kullanılmıştır. Nanoakışkanların stabilite değerlendirmesi için zeta potansiyel ölçümleri yapılmıştır. En yüksek zeta değeri 66 mV olarak silikon yağı baz akışkanında elde edilmiştir. Ancak uzun süreli stabilite sağlanmasının saf su kullanılarak ulaşılabileceği yazarlar tarafından vurgulanmıştır (Tiwari et al. 2021a). Dehkordi and Abdollahi (2018) tarafından yapılan çalışmada, etanol, etilen glikol ve saf su baz akışkan olarak ve CuO nanopartiküller olarak kullanılmıştır. Partikül konsantrasyonunun ve baz akışkanın termal iletkenlik üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üretilen her numunenin zeta ölçümleri yapılmış ve -40 mV'den daha küçük zeta değerlerine ulaşılmıştır.

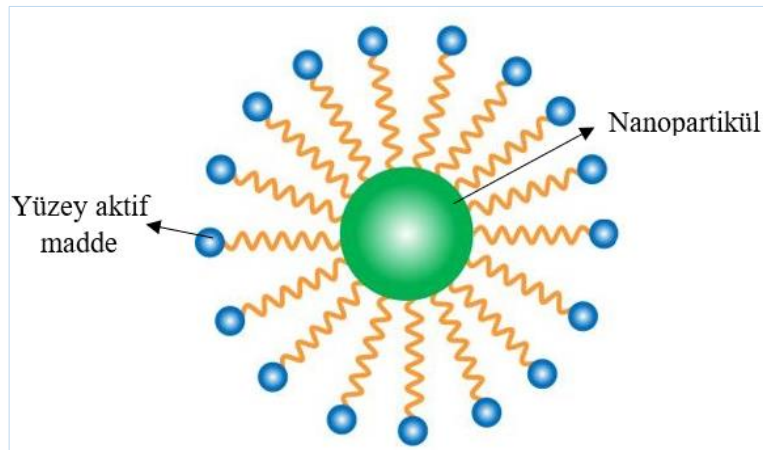
2.2.2.3. Nanoparçacık miktarının etkisi

Sıvı içerisine dağıtılan katı parçacıkların birbiri ve akışkan ile etkileşimleri ve yoğunluklarının fazla olması sebebiyle sıvı içerisinde topaklanmalar ve çökelmeler meydana gelerek süspansiyonun kararlılığı olumsuz etkilenmektedir. Bu oluşumlara katı parçacık miktarının etkisi de olmaktadır. Bu bahsedilen sebeplerden dolayı araştırmacılar parçacık oranının da kararlılık üzerindeki etkilerini incelemişler ve bazı hususlara dikkat çekmişlerdir. Cakmak et al. (2020) tarafından $\text{rGO} + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{TiO}_2$ /etilen glikol nanoakışkanının karakterizasyonu, termal iletkenliği ve stabilitesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada farklı oranlarda hazırlanan nanoakışkan numunelerinin zeta potansiyel ölçümleri alınarak stabiliteleri gözlemlenmiştir. Konsantrasyonun artmasıyla birlikte zeta değerlerinde düşüş meydana geldiği bildirilmiştir. Zhang et al. (2021a) tarafından konsantrasyonun stabilite üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışma SiO_2 /su nanoakışkanı kullanılarak yapılmıştır. Farklı konsantrasyonlarda ve iki adımlı metotla hazırlanan nanoakışkanların stabiliteleri farklı yöntemlerle değerlendirilmiştir. Bu yöntemler, görsel olarak inceleme, yüzey gerilim testi, absorbans testi ve viskozite ölçümleri olarak belirlenmiştir. Numuneler hazırlandıktan 8 gün sonraya kadar incelenmiş, stabilite gözlem ve ölçümleri yapılmıştır. Bu yapılan araştırmaların sonunda,

stabilitenin konsantrasyonun artmasıyla olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. ZnO/yağ nanoakışkanı üzerinde yapılan bir başka çalışmada, konsantrasyonun stabilite ve tribolojik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Konsantrasyon hacimce %0,5'e kadar nanoakışkan stabil olurken, %0,8 ve 1 gibi daha yüksek değerlerde zamanla topaklanmalar meydana geldiği belirtilmiştir (Ran et al. 2017). Safiei et al. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı konsantrasyonlarda (%0,2 – 1) Al_2O_3 nanopartikülleri etilen glikol + su (40:60) baz akışkanı içerisine karıştırılmıştır. Yapılan gözlemler sonucu, nanoakışkanlar hazırlandıktan 7 gün sonra %0,2 konsantrasyonda daha stabil kaldığı bildirilmiştir.

2.2.2.4. Yüzey aktif madde kullanımının etkisi

Nanoakışkanların kararlılıklarında yüzey aktif maddelerin önemli bir yeri mevcuttur. Yüzey dağıtıcı madde kullanımı, akışkan içerisindeki parçacıkların Brownian hareketleri neticesinde etkileşime girmeleri ve topaklanmalar meydana getirmelerinin önüne geçmek için alınan bir önlem olarak görülmektedir. Yüzey dağıtıcı madde eklenmesiyle parçacıklar arasında bir elektrostatik itme kuvveti meydana getirilir. Bu kuvvetin çekim kuvvetinden daha yüksek olması parçacıklar arası mesafenin artmasına, parçacıkların daha fazla hareket etmesine ve dolayısıyla ısı transferi olayının gelişmesine katkı sağlar (Wang et al. 2009). Yüzey dağıtıcı maddelerin bu denli öneminden dolayı, çeşitli nanoakışkan türleri için hangi maddenin ne kadar uygun olduğuyla ilgili çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Aşağıda sunulan Şekil 2.6'da yüzey aktif madde kaplı bir nanopartikülün şematik resmi gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Yüzey aktif madde kaplı bir nanopartikül (Miyazawa et al. 2021)

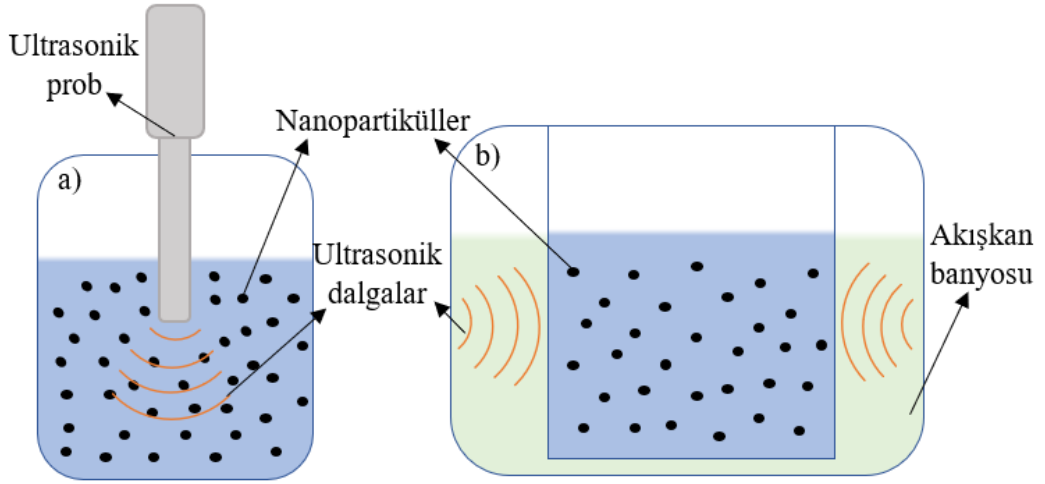
Das et al. (2017) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanı kullanarak, yüzey aktif maddenin bu nanoakışkanın kararlılığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sodyum dodesilbenzen sülfonat (SDBS) yüzey aktif maddesi kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda ve farklı yüzey aktif madde oranlarında nanoakışkanın kararlılığı incelenmiştir. Bu maddenin kullanımının kararlılığı oldukça arttırdığı ve ayrıca, partikül yüzey aktif madde oranının 2:1 olduğu durumda en iyi stabiliteyi sağladığı belirtilmiştir. Colangelo et al. (2016) tarafından $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{terminol 66}$ ısı transfer yağı nanoakışkanının termal iletkenlik, viskozite ve stabilite değerlendirmeleri yapılmıştır. Yüzey dağıtıcı olarak oleik asit tercih edilen çalışmada, yüzey dağıtıcı kullanılmayan örnekler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Yüzey dağıtıcı kullanılmaya nanoakışkanlar hazırlandıktan 8 gün sonra sedimantasyona uğramış ve 1 ay sonunda parçacıklar tamamen dibe çökmüştür. Yüzey dağıtıcıların nanoakışkanların stabilite üzerindeki etkisi açıkça gösterilmiştir.

Xia et al. (2014) tarafından yüzey aktif maddelerin nanoakışkanların stabilitesine etkisinin araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, nanoakışkan olarak $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ ve yüzey dağıtıcı olarak sodyum dodesil sülfat (SDS) ve polivinilpirolidon (PVP) kullanılmıştır. Her iki madde de nanoakışkanın kararlılığını oldukça arttırmıştır. Ayrıca PVP, SDS ile karşılaştırıldığında kararlılık açısından daha iyi sonuçlar ortaya koymuştur. Bir başka çalışmada $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CuO}/\text{su}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2/\text{su}$ hibrit nanoakışkanlarına çeşitli yüzey aktif maddeler eklenerek, UV-vis spektrometre, TEM ve sedimantasyon metot ile stabilite değerlendirmeleri yapılmıştır. PVP, SDS ve setiltrimetilamonyum bromür (CTAB) maddeleri kullanılan çalışmada, en iyi stabilite artışının PVP maddesi ile sağlandığı tespit edilmiştir (Ma et al. 2021). Bir çalışmada, $\text{MgO}/\text{etilen glikol} + \text{su}$ nanoakışkanı ile %0,08 – 0,4 konsantrasyonları arasında hazırlanmıştır. Stabil bir süspansiyon elde etmek için, yüzey aktif madde olarak sodyum lauril sülfat (SLS), SDBS ve CTAB kullanılmıştır. Stabilite değerlendirmeleri sonucu bu nanoakışkan için en uygun yüzey dağıtıcının CTAB olduğu bildirilmiştir (Choudhary et al. 2020). CuO/su , CNTs/su ve $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{su}$ nanoakışkanlarının stabilite üzerine yüzey dağıtıcıların etkisi incelenmiştir. Yüzey dağıtıcı olarak bu çalışmada, Arap sakızı (GA), CTAB ve SDBS kullanılmıştır. Bütün hazırlanan nanoakışkan numunelerinin kararlılıklarının incelenmesi amacıyla zeta potansiyel değerleri ölçülmüştür. Tüm nanoakışkan türlerinde de SDBS kullanılanların zeta değerleri daha yüksek çıkmıştır (Sajid and Bicer 2022). Asadi et al. (2017) tarafından yürütülen çalışmada $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{su}$

nanoakışkanı kullanılmış ve çeşitli yüzey dağıtıcıların stabilite üzerindeki etkileri gösterilmiştir. CTAB, oleik asit ve SDS yüzey dağıtıcıları kullanılarak hazırlanan numuneler 30 gün boyunca incelenmiştir. Yüzey dağıtıcı kullanılmayan nanoakışkan 30 gün sonunda tamamen çökelmiştir. En iyi kararlılık performansı CTAB kullanıldığı durumda elde edilmiş ve bu numunenin 30 gün sonra ölçülen zeta potansiyel değeri 52 mV olarak elde edilmiştir.

2.2.2.5. Ultrasonikasyon süresinin etkisi

Sıvı içerisine dağıtılan nanopartiküllerin topaklanmaları nanoakışkanın stabilitesini ve termofiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu topaklanmış nanopartikül kümelerini kırmak ve homojen bir karışım elde etmek için kullanılan yaygın yöntemlerden bir ultrasonikasyona maruz bırakılmadır. Bu yöntemde en önemli parametre nanoakışkanın ultrasonikasyona maruz bırakılma süresi olarak görülmektedir. Ultrasonikasyon işlemi başlıca, prob tipi ultrasonik homojenleştirici ve ultrasonik banyo cihazı kullanılarak yapılmaktadır. Ultrasonik banyo cihazlarında, ultrasonikasyon etkisi düşük yoğunluktadır ve akışkan içinde eşit olmayan bir şekilde yayılır. Prob tipi ultrasonik cihazlarında ise yoğun sonik dalgaları üreten bölge probun altındadır ve bu nedenle ultrasonikasyon etkileri daha yoğun olarak elde edilmektedir. Bununla birlikte farklı ultrasonikasyon yöntemleri araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Bu yöntemler doğrudan ve dolaylı ultrasonikasyon ve sürekli veya kesintili sonikasyon uygulamalarıdır (Asadi et al. 2019). Taurozzi et al. (2012) tarafında yazılan bir makalede, nanoakışkan üretiminde doğrudan sonikasyon uygulanması önerilmiştir. Bunun sebebi, dolaylı sonikasyonda, bir başka deyişle sonikasyon banyosunda üretilen ultrasonik dalgalar, nanoakışkana geçmeden önce banyo sıvısını ardından nanoakışkanın bulunduğu kabı çeperini geçmek zorundadır. Bu da sonik dalgaların nanoakışkana ulaşana kadar zayıflamasına ve partikül topaklanmalarını kırmada tam anlamıyla başarılı olamamasına yol açar. Şekil 2.7’de doğrudan ve dolaylı olarak sonikasyon uygulaması şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 2.7. Nanoakışkanın doğrudan (a) ve dolaylı (b) ultrasonikasyona maruz bırakılması

Kesintili ve sürekli ultrasonik dalgaların etkisi Tajik et al. (2012) tarafından çalışılmıştır. Al_2O_3/su ve TiO_2/su nanoakışkanları üzerine kesintili ve sürekli ultrasonik dalgalar uygulanmasıyla, parçacık kümelerinin kırılmasını ve nanoakışkanların kararlılıklarına bu iki yöntemin etkilerini karşılaştırmıştır. Bu çalışma sonucunda kesintili sonik dalgaların nanoakışkan içerisinde oluşan parçacık topaklanmalarının tamamını kıramayacağı tespit edilmiş, ayrıca 48 saat sonunda bu nanoakışkanlarda sedimentasyon meydana geldiği gösterilmiştir.

Zheng et al. (2020) tarafından $Fe_3O_4/sıvı$ parafin nanoakışkanı için uygun sonikasyon süresinin belirlenmesi amaçlanan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ultrasonikasyon süresinin 2 saatten 3 saate çıkarılmasıyla nanoakışkanın zeta potansiyel değeri -42 mV'den -50 mV'ye çıkmıştır. 3 saati aşan sürelerde sonikasyona maruz bırakıldığında ise bu zeta değeri düşmektedir. Bu sebeple araştırmacılar bu tip nanoakışkanlar için 3 saat sonikasyon süresinin uygun olduğunu belirtmişlerdir. TiO_2/su nanoakışkanı kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada, çeşitli sonikasyon süreleri uygulanarak nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Bu hazırlanan nanoakışkanların stabiliteleri TEM görüntüleme, zeta potansiyel ölçümü ve parçacık kümelerinin ortalama çapları ölçülerek yapılmıştır. Ultrasonikasyon süresi $0 - 180$ dk aralığında seçilmiştir. 150 dk'ya kadar parçacık boyutlarında azalma meydana gelirken, bu zamandan sonra sonikasyonun pek bir etkisinin olmadığı bildirilmiştir (Mahbubul et al. 2017). Al_2O_3/su nanoakışkanı ile gerçekleştirilen bir başka çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. 150 dk sonikasyondan sonra, nanoakışkan stabilitesinin sabit kaldığı belirtilmiştir (Sadeghi et al.

2015). Sonikasyon süresinin ve yüzey dağıtıcının nanoakışkan stabilitesine etkisinin incelendiği bir çalışmada, ZnO nanopartikülleri ve eriokrom siyah T (EBT) yüzey dağıtıcı olarak kullanılmıştır. 2 – 8 saat arasında uygulanan sonikasyon ile hazırlanan nanoakışkanların zeta potansiyelleri ölçülerek değerlendirme yapılmıştır. Ultrasonikasyona maruz kalma süresinin artmasıyla zeta değeri de artmıştır. Ultrasonikasyon süresi 4 saat ve daha fazla olduğu durumlarda, zeta değerleri 60 mV'nin üzerinde değerler almıştır. Araştırmacılar ZnO parçacıkları kullanılan nanoakışkanlar için EBT yüzey aktif maddesini tavsiye etmişlerdir (Afzal et al. 2019).

TiO₂ nanoparçacıklarının su, etilen glikol ve parafin içerisine dağıtılmasıyla elde edilen nanoakışkanlar için optimum sonikasyon süresinin araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 20 – 120 dk aralığında sonikasyon uygulanan numunelerin termal iletkenlikleri ölçülmüştür. 60 dk sonikasyon uygulanan nanoakışkanların termal iletkenliklerinin maksimum değer ulaştığı, bu noktadan sonra düşüşe geçtiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada araştırmacılar tarafından, akışkan içerisinde oluşan nanopartikül kümelerini kırmak için uygulanan ultrasonikasyonun, kullanılan nanoakışkan için uygun süreden fazla olduğunda, parçacıkların Brownian hareketini arttırdığı ve ayrıca akışkan molekülleri ile nanopartiküllerin etkileşimlerini arttırdığı, bu sebeple de nanopartikül kümelenmesinin oluştuğu vurgulanmıştır (Sonawane et al. 2015).

Asadi and Alarifi (2020) sonikasyon süresinin nanoakışkanın stabilitesi ve viskozitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, MWCNT/su nanoakışkanı kullanılmış ve 10 – 80 dk aralığında sonikasyona maruz bırakılan nanoakışkan numuneleri hazırlanmıştır. Zeta potansiyel ve viskozite ölçümleri yapılmış ve ultrasonikasyon süresi 60 dk'ya kadar zeta değerlerinin arttığı bu dakikadan sonra tekrar düştüğü ve nanoakışkanın stabilitesinin bozulduğu görülmüştür. Ayrıca 30 gün sonunda bile hala stabil kaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar baz alınarak, bu tip nanoakışkanlar için optimum sonikasyon süresinin 60 dk olduğu bildirilmiştir. Ultrasonikasyonun ısı iletkenlik ve viskozite üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, CNTs/etilen glikol nanoakışkanı kullanılmıştır. Sonikasyon süresi ile termal iletkenlik arasında doğru orantı olduğu belirtilmiş ve 1.355 dk sonikasyon uygulandıktan sonra nanoakışkanın termal iletkenliğinin baz akışkana göre %23 artış gösterdiği bildirilmiştir. Ayrıca viskozite sonikasyon süresi ile birlikte azalmış ve 1.355 dk sonunda

neredeyse baz akışkanla aynı değerlere gelmiştir (Ruan and Jacobi 2012). Benzer bir çalışma Silambarasan et al. (2012) tarafından TiO_2/su nanoakışkanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonikasyon uygulanmayan, 6 saat sonikasyon uygulanan ve 7 saat sonikasyon uygulanan nanoakışkanların viskozite ve termal iletkenlikleri ölçülmüştür. 7 saat Ultrasonikasyon uygulanarak hazırlanan nanoakışkanın ısı iletkenliği diğerlerine göre yüksek, viskozitesi diğerlerinden düşük çıkmıştır.

2.2.2.6. Asitlik derecesinin (pH) etkisi

Nanoakışkanların stabilitesi ve termal özelliklerinin bağlı olduğu faktörler arasında karışımın pH değeri de bulunur. Oluşturdukları güçlü itme kuvveti nedeniyle Nanoakışkanların elektrokinetik özellikleri kararlılıkları ile oldukça ilişkilidir. Nanoakışkanın pH değeri izoelektrik noktadan uzaklaştıkça partikül ortamının zeta potansiyel değeri artar. Bu, Brownian hareketinin bir sonucu olarak sıvı içinde serbestçe hareket eden parçacıkların birbirleriyle temas etmesini önler ve bunun sonucunda parçacıkların topaklanma hızı azalır. Bahsedilen sebeplerden dolayı, araştırmacılar tarafından çeşitli nanoakışkan türleri için uygun pH değerleri veya değer aralıkları incelenmiştir (Fuskele and Sarviya 2017).

Tiwari et al. (2021b) $\text{CeO}_2 + \text{MWCNT}$ (80:20)/su nanoakışkanının stabilitesine yüzey dağıtıcı madde kullanımının, sonikasyon süresinin ve pH değerlerinin etkisini incelemiştir. Farklı tür yüzey dağıtıcı maddeler, farklı sonikasyon süreleri (30 – 180 dk) ve farklı pH (8 – 11) değerlerinde analizle yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ilgili nanoakışkan için optimum şartların sağlanması için, CTAB yüzey dağıtıcı kullanılması, 90 dk sonikasyon uygulanması ve 9,5 pH değerinde çalışılması gerektiğini göstermiştir. Bir başka çalışmada, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanını pH değerleri hidroklorik asit (HCl) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak 2 – 12 arasında değerler verilmiştir. Çalışma sonucunda 6 pH'dan daha küçük değerler sahip nanoakışkanların daha stabil olduğu belirtilmiştir (Cacua et al. 2019). Wamkam et al. (2011) su bazlı ZrO_2 ve TiO_2 nanoakışkanlarının stabilitelerini farklı pH'larda değerlendirmişlerdir. Zeta potansiyelleri ve ortalama partikül boyutu ölçülerek stabilite değerlendirmesi yapılan çalışmada, homojen ve stabil bir karışım için pH değerlerinin izoelektrik noktadan uzak olması gerektiği, yani bazik ya da asidik özellikleri baskın nanoakışkanların stabil kaldığı

2. KAYNAK ÖZETLERİ

belirtilmiştir. pH değerlerinin Al_2O_3 /su nanoakışkanının stabilite ve ısı iletkenliğine etkisinin incelendiğı bir başka çalışmada, 8 pH değerinde hem ısı iletkenlik açısından hem de zeta değerleri açısından maksimum noktalara ulaşılmıştır (Zhu et al. 2009).

Yukarıdaki paragraflardan da anlaşılabileceğı gibi nanoakışkanların pH değerleri üzerine birçok çalışma literatürde mevcuttur. Çizelge 2.2’de çeşitli nanoakışkanların maksimum zeta potansiyeline sahip olduğı pH değerleri ve kullanılan yüzey aktif maddeler özet halinde sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Çeşitli nanoakışkanlar için maksimum zeta potansiyelinin elde edildiğı pH değerleri.

Kaynak	Nanoakışkan türü	Hacimsel oran	Ortalama nanopartikül çapı (nm)	Yüzey aktif madde	pH değerleri	Zeta potansiyel (mV)
Chang et al. (2011)	CuO / su	%0,01	20 – 30	NaHMP	6,66	-59,8
Lee et al. (2011)	SiC / su	%0,001	<100	–	11	-51,6
Mehrali et al. (2014)	GNPs / su	%0,1*	–	–	10	-50
Mondragon et al. (2012)	SiO ₂ / su	%0,02*	205	–	10	-48,63
Wole-Osho et al. (2020)	Al ₂ O ₃ + ZnO / su	%1,67	29 ve 70	–	12	-39
Younes et al. (2012)	Fe ₂ O ₃ / su	%0,4	20 – 60	SDBS	3,97	~35
Zhang et al. (2017)	rGO / su	0,2 mg/ml	–	–	12	-50,9
Zhang et al. (2021b)	TiO ₂ / su	%0,25	81,2	–	12	-45,06
Zhao et al. (2018)	SiO ₂ / su	%0,1*	~80	TX-100	11	-45

*Konsantrasyonun ağırlıkça olduğunu belirtmektedir. Diğerlerinin tamamı hacimce konsantrasyon cinsindendir.

2.2.2.7. Yüzey modifikasyonunun etkisi

Nanoakışkanların stabilitelerini geliştirmek için kullanılan ve etkili olduğu yapılan çalışmalar tarafından ortaya konulan yöntemlerden biri de yüzey modifikasyonudur. Bu sebeple literatürde çeşitli yöntemlerle yüzey modifikasyonu uygulaması mevcuttur. Li et al. (2014) tarafından grafen/su nanoakışkanının stabilitesini arttırmak için grafen nanoparçacıklarına yüzey modifikasyonu işlemi uygulanmıştır. Bu işlemle grafen nanopartikülleri SiO_2 ile kaplanmış ve stabilite değerlendirmeleri yapılmıştır. Modifikasyonun nanoakışkanın stabilitesini ve termal iletkenliğini arttırdığı belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada, Ghosatloo et al. (2014) tarafından CNT nanoparçacıklarına çeşitli yüzey modifikasyonları uygulanarak en iyi termal iletkenlik ve stabilite artışı incelenmiştir. CNT'lerin yüzeyleri asit karışımı ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{--HNO}_3$), potasyum persülfat (baz), tetrahidrofuran, oktadesilamin ve SDS ile ayrı ayrı modifiye edilmiştir. Ayrıca SDS + potasyum persülfat ve SDS + $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--HNO}_3$ yüzey modifikasyonları da uygulanmıştır. UV-vis aracılığı ile hazırlanan nanoakışkanların kararlılık değerlendirilmesi yapılmıştır. En yüksek termal iletkenlik artışı baz akışkana göre %24,9 olarak SDS + potasyum persülfat kaplı nanoakışkanda elde edilmiştir. Benzer bir çalışmada, MWCNT nanopartikülleri amin (NH_2) ve β -siklodekstrin (β -CD) ile yüzey modifikasyonuna tabi tutulmuşlardır. Etilen glikol bazlı hazırlanan çeşitli konsantrasyonlara sahip nanoakışkanlar, hazırlandıktan 60 gün sonraya kadar gözlemlenmiştir. NH_2 ile modifiye edilen nanoakışkanların 60 gün sonunda tamamen sedimentasyona uğradığı, ancak β -CD ile modifiye edilmiş olanların bu süre zarfında bile hala oldukça stabil olduğu belirtilmiştir (Li et al. 2016).

Kazemi-Beydokhti et al. (2019) tarafından, stabil nanoakışkanlar hazırlanarak ısı transfer hızının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, araştırmacılar nanoparçacıklara iki farklı yöntemle yüzey modifikasyonu uygulamış ve stabilite değerlendirmelerini yapmışlardır. İlk numune nanopartiküllerin $\text{HNO}_3\text{--H}_2\text{SO}_4$ çözeltisi (3:1) içerisine, 70 °C sıcaklıkta karıştırılarak nanotüplerin yüzeyindeki karboksil ve hidroksil grupları bağlanmıştır. Bu yöntemle hazırlanan nanotüpler aseton içerisine dağıtılarak ilk nanoakışkan numunesi hazırlanmıştır. Diğer numune için nanotüplere fiziksel modifikasyon uygulanmış ve yüzeyleri polimer ile kaplanmış ve ikinci nanoakışkan numunesi bu nanotüpler ile hazırlanmıştır. Nanoakışkanların termal iletkenlik ölçümleri

yapılmış ve fiziksel olarak modifiye edilen nanotüplere sahip nanoakışkanın diğerinden daha yüksek iletkenlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

2.2.3. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri

Enerji üretimi, elektronik uygulamalar, iklimlendirme, kimyasal üretim, ısıtma ve soğutma uygulamaları, nükleer sistemlerin soğutulması, ulaşım vb. gibi çok sayıda mühendislik alanında iş akışkanı olarak yaygın bir şekilde kullanılan su, yağ, etilen glikol, propan vs. akışkanların katılardan daha düşük termal performans sergilemeleri sebebiyle, katı parçacıkların bu akışkanlar içerisine dağıtılmasıyla elde edilen nanoakışkanların termal özelliklerine odaklanan çalışmalar yapılmaktadır ve bahsi geçen alanlarda kullanılabilirliği tartışılmaktadır. Nanoparçacıkların baz akışkana dahil edilmesi, ısı transferini etkileyen yoğunluk, ısı iletkenlik, viskozite ve özgül ısı gibi termofiziksel özelliklerde değişikliklere sebep olmaktadır. Nanopartiküllerin türü, miktarı, şekli, boyutu elde edilen nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini etkileyen başlıca parametrelerdir (Gupta et al. 2017).

Isı transferi uygulamalarında kullanılan akışkanların yoğunlukları önemli parametrelerden biridir. Akışkanların ısı transfer katsayılarını belirlemek için ihtiyaç duyulan Reynolds sayısı yoğunluğun bir fonksiyonudur. Ayrıca yoğunluk basınç düşümü ve buna bağlı olan pompalama gücünün bağlı olduğu bir parametredir. Bahsedilen sebeplerden dolayı literatürde nanoakışkanların yoğunluğu üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur. Nanoakışkanların yoğunluğunun tahmini için kullanılan yaygın formül Eşitlik 2.1’de sunulan karışım formülüdür. Nanoakışkan süspansiyonunun hem akışkan miktarı hem de nanopartikül miktarı ve bunların yoğunluklarının toplamı olarak ifade edilebilir (Selvakumar and Wu 2019).

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np} \quad (2.1)$$

Shoghl et al. (2016) tarafından farklı konsantrasyonlarda, su bazlı nanoakışkan numuneleri hazırlanmış ve yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Al_2O_3 , MWCNT, CuO, MgO, TiO_2 ve ZnO nanoakışkanlarının deneysel olarak ölçülen ve karışım formülü ile hesaplanan teorik yoğunluk değerleri karşılaştırılmış ve ikisi arasında oldukça iyi bir

uyum olduğu gözlemlenmiştir. Bir başka çalışma $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanı kullanılarak Teng and Hung (2014) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada araştırmacılar deneysel veriler ile karışım formülü ve Eşitlik 2.2’de sunulan istatistiksel mekanizmalar korelasyonlarını kullanarak hesapladıkları yoğunluk değerlerini karşılaştırmışlardır. Elde edilen bulgular, karışım formülü için maksimum hata oranını %1,5 olarak gösterirken, istatistiksel mekanizmalar için %2,53 olduğunu göstermiştir. Ayrıca konsantrasyon arttıkça hata oranlarının yükseldiği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

$$\rho_{nf} = \frac{(1 - \varphi)\rho_{bf}\rho_{bf} + \varphi\rho_{np}\rho_{np}}{(1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np}} \quad (2.2)$$

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$, TiO_2/su , SiO_2/su ve $\text{SiO}_2/\text{etilen glikol}$ nanoakışkanlarının viskozite ve yoğunluk ölçümlerinin yapıldığı bir çalışmada, %1 konsantrasyonda ve 30 °C’de bu akışkanların sırasıyla yoğunluklarının baz akışkana göre %2,6, 2,6, 1,25 ve 0,954 fazla olduğu belirtilmiştir (Chavan and Pise 2019). Vajjha et al. (2009) tarafından da benzer bir çalışma yürütülmüş, etilen glikol + su (60:40) bazlı, Al_2O_3 , $\text{Sb}_2\text{O}_5:\text{SnO}_2$ ve ZnO nanoakışkanlarının yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Farklı konsantrasyonlarda ve farklı sıcaklıklarda (0 – 50 °C) alınan ölçümler karışım metodu ile karşılaştırılmıştır. Aralarında iyi bir uyum olduğu belirtilmiştir. TiO_2/su , SiO_2/su , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ ve TiSiO_4/su nanoakışkanları ile gerçekleştirilen bir başka çalışmada da benzer sonuçlara ulaşılmış ve konsantrasyonla yoğunluğun arttığı, sıcaklıkla azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca karışım formülünün deneysel veriler ile oldukça iyi bir şekilde uyumlu olduğu belirtilmiştir (Said et al. 2013).

Kullanılan akışkanın 1 gramının sıcaklığını 1 °C arttırmak için gerekli ısı enerjisi miktarı olarak tanımlanan özgül ısı, termal performans açısından önemli bir parametredir. Bu sebeple nanoakışkanlar üzerine çalışmalar yapan araştırmacılar özgül ısı değerlerini de incelemişlerdir. Zhou and Ni (2008) tarafından $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanının farklı hacim konsantrasyonlarında özgül ısı değerleri incelenmiştir. Nanopartikül konsantrasyonunun artmasıyla özgül ısı değerlerinin düştüğü belirtilmiştir. Benzer bir çalışma, Elias et al. (2014) tarafından iki ayrı baz akışkan (etilen glikol ve su) içerisine Al_2O_3 nanopartikülleri dağıtılmak suretiyle elde edilen nanoakışkanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Konsantrasyonun artmasıyla özgül ısının azaldığı, sıcaklıkla ise arttığı belirtilmiştir.

CNT/ etilen glikol + su nanoakışkanı üzerinde yapılan bir çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiş, sıcaklıkla birlikte özgül ısı değeri artarken, konsantrasyonla azalmıştır (Kumaresan and Velraj 2012). Baz akışkan olarak sıvı argon kullanılan bir çalışmada, nanopartikül olarak Si_3N_4 kullanılmıştır. Sıvı argonun düşük özgül ısıya sahip olması sebebiyle, %4,3 konsantrasyona sahip nanoakışkanın özgül ısısı baz akışkandan daha yüksek değerler aldığı görülmüştür (Mohebbi 2012). Bir başka çalışmada, su bazlı SiO_2 , Al_2O_3 ve CuO nanoakışkanları kullanılmış ve tüm nanoakışkanlar için partikül konsantrasyonu ile birlikte özgül ısı değerleri azalmıştır (O'Hanley et al. 2012). Angayarkanni et al. (2015) yaptıkları çalışmada Fe_3O_4 /gaz yağı nanoakışkanı kullanmış ve benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Ayrıca nanopartiküllerin ortalama çapının artmasıyla da özgül ısı değerinin azaldığı yazarlar tarafından bildirilmiştir. Megatiff et al. (2016) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada su bazlı TiO_2 + CNT nanoakışkanı kullanılmıştır. Özgül ısı değerinin partikül konsantrasyonu ve sıcaklıkla birlikte düştüğü tespiti yapılmıştır.

Nanoakışkanların özgül ısı değerlerinin tahmini için bazı araştırmacılar tarafından modeller geliştirilmiş ve önerilmiştir. Bunlardan biri Pak and Cho (1998) tarafından aşağıda sunulan şekilde akışkan ve nanopartikül miktarlarının baz alındığı korelasyondur.

$$C_{p_{nf}} = \varphi C_{p_{np}} + (1 - \varphi) C_{p_{bf}} \quad (2.3)$$

Araştırmacılar deneysel veriler ile bu önerilen korelasyonu karşılaştırmış ve hata oranının yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sebeple yine karışım metoduna dayanan bir korelasyon Xuan and Roetzel (2000) tarafından geliştirilmiştir. Bu korelasyon;

$$C_{p_{nf}} = \frac{(1 - \varphi)(\rho C_p)_{bf} + \varphi(\rho C_p)_{np}}{(1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np}} \quad (2.4)$$

olarak ifade edilmiştir. Bir başka korelasyon Vajjha and Das (2009a) tarafından, üç farklı nanoakışkan için önerilmiş ve deneysel sonuçlar ile bu önerdikleri formül karşılaştırılmıştır. Al_2O_3 , SiO_2 ve ZnO nanopartikülleri kullanılan ve etilen glikol + su (60:40) karışımı olan baz akışkan için geçerli bu korelasyon aşağıda sunulmuştur.

$$\frac{C_{p_{nf}}}{C_{p_{bf}}} = \frac{A \times T + B \left(\frac{C_{p_{np}}}{C_{p_{bf}}} \right)}{C + \varphi} \quad (2.5)$$

Bu sunulan korelasyon için sınırlar ve A , B ve C katsayıları nanoakışkan türüne göre Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Eşitlik 2.5 için katsayılar ve kısıtlamalar

Nanoparçacık	A	B	C	Hacimsel oran aralığı (%)	Sıcaklık aralığı
Al_2O_3	0,0008911	0,5179	0,4250	$0 < \varphi \leq 10$	$315 K < T < 363 K$
SiO_2	0,001769	1,1937	0,8021	$0 < \varphi \leq 10$	$315 K < T < 363 K$
ZnO	0,0004604	0,9855	0,299	$0 < \varphi \leq 7$	$315 K < T < 363 K$

Tiwari et al. (2020) tarafından, $CuO + MWCNT$ (80:20) /su, $MgO + MWCNT$ (80:20) /su ve $SnO_2 + MWCNT$ (80:20) /su nanoakışkanları kullanılarak çok sayıda sıcaklığa, konsantrasyona ve partikül boyutuna bağlı deneyler yapılmış ve bu deneyler sonucunda nanoakışkanların özgül ısı tahminleri için Eşitlik 2.6’da sunulan korelasyon önerilmiştir.

$$\frac{C_{p_{nf}}}{C_{p_{bf}}} = 1 - 10,6364 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-0,771} \varphi^{0,448} \left(\frac{d_{np}}{d_0} \right)^{-0,474} \left(\frac{C_{p_{np}}}{C_{p_{bf}}} \right)^{1,027} \left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}} \right)^{-2,742} \quad (2.6)$$

Benzer bir çalışma Moldoveanu and Minea (2019) tarafından yürütülmüştür. Su bazlı Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , $Al_2O_3 + TiO_2$ ve $Al_2O_3 + SiO_2$ nanoakışkanları ile çeşitli şartlarda deneyler yapılmış ve bu deneysel veriler sonucunda Eşitlik 2.7’de verilen denklem önerilmiştir. Bu denklemin tek kısıtlayıcı noktası hacimce %5’e kadar olan konsantrasyonlar için geçerli olmasıdır.

$$\frac{C_{p_{nf}}}{C_{p_{bf}}} = \left(\frac{\rho_{np}}{\rho_{bf}}\right)^{0,2} \left(1 + \frac{d_{np}}{50}\right)^{0,4167} \left(1 - \frac{\varphi}{100}\right)^{2,272} \quad (2.7)$$

Cu + Al₂O₃/su hibrit nanoakışkanının özgül ısı değerlerinin deneysel olarak belirlendiği bir çalışmada, partikül miktarı ile özgül ısı azalmış, sıcaklıkla artmıştır. Bu çalışmada, kullanılan nanoakışkanın özgül ısı değerinin hesaplanması için yapay zekâ (ANN) yardımıyla bir korelasyon çıkarılmıştır. Elde edilen korelasyonun ortalama hata oranı %0,005 civarında tamamen ihmal edilebilecek kadar küçük değerde olduğu saptanmıştır. Bu korelasyon Eşitlik 2.8’de verilmiştir (Çolak et al. 2020).

$$C_{p_{nf}} = (0,0002322T + 4,168)(1 - 0,01175\varphi^{0,6207}) \quad (2.8)$$

2.2.3.1. Nanoakışkanların termal iletkenlikleri

Soğutma ve ısıtma içeren ısı transferi uygulamalarında, ısı transferini iyileştirmek, küçük boyutlu ve aynı zamanda verimli eşanjörler kullanmak, ısı transfer süresini kısaltmak, enerji ve yakıt verimliliğini arttırmak için birçok araştırmacı tarafından uzun yıllardır çaba sarf edilmektedir. Bu iyileştirmelerin önündeki engellerden biri ısı transferi için kullanılan akışkanların (su, yağ, etilen glikol vb.) termal iletkenliklerinin düşük olmasıdır. Buna nano boyutlu katı maddelerin baz akışkan içerisine dağıtılmasıyla elde edilen nanoakışkanlar bir çözüm sunmaktadır. Katıların, akışkanlara kıyasla oldukça yüksek ısı iletkenliğine sahip olduğu bilinen bir gerçektir. Bu sebeple literatürde birçok araştırmacı nanoakışkanların ısı transfer uygulamalarında kullanımı ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Pantzali et al. 2009; Farajollahi et al. 2010).

Isı transferi uygulamalarında kullanılan akışkanların termofiziksel özelliklerinden, termal iletkenlik, ısı performansa etki eden parametrelerin başında gelmektedir. Bu sebeple nanoakışkanların da termal iletkenliklerini belirlemek önemli bir konudur ve bu konu üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların neticesinde, nanoakışkanların termal iletkenliklerinin ölçülmesinde birçok yöntem kullanılmış ve önerilmiştir. Bu yöntemlerin en yaygın olanları, sıcaklık salınım yöntemi, 3-ω yöntemi ve geçici sıcak tel yöntemidir. Diğer yöntemler çok yaygın olarak

kullanılmasa da literatürde örnekleri mevcuttur. Bunlar kararlı hal şartları için paralel plaka tekniği, mikro sıcak şerit yöntemi ve optik ışın saptırma tekniğidir (Tawfik 2017).

Geçici sıcak tel yöntemi, uygulanmasındaki kolaylık ve maliyetinin düşüklüğü sebebiyle yaygın olarak tercih edilen termal iletkenlik belirleme yöntemlerinin başında gelmektedir. Elektriksel olarak iletken olana sıvılara uygulanan bu yöntemde, ilk olarak akışkana daldırılan telin ortam sıcaklığına gelmesi beklenmektedir. Daha sonra tel üzerine uygulanan sabit bir voltajla telin sıcaklığı ve elektriksel direnci artmaktadır. Logaritmik zamana bağlı olarak tel sıcaklığındaki artış ile termal iletkenlik aşağıda sunulan Eşitlik 2.9 ile hesaplanır veya voltaj çıkışı bir analog/dijital (A/D) dönüştürücü ile ölçülür (Hwang et al. 2006; Hwang et al. 2007; Vadasz 2010).

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2.9)$$

Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin ölçüldüğü bir diğer yöntem sıcaklık salınımı yöntemidir. Bu yöntemde, sıcaklık salınımı veya sabit bir ısı akısı uygulanarak nanoakışkanın sıcaklık artışına tepkisi ölçülür. Akışkanın ısı yayılımının (α), sıvının sınırından merkezine doğru olan termal salınımın genliğindeki düşüş göz önünde bulundurularak termal iletkenliğinin doğru bir şekilde ölçülebilmesi muhtemeldir (Paul et al. 2010). 3- ω termal iletkenlik ölçme yöntemi geçici sıcak tel yöntemine bileşen bakımından benzerdir. Ancak en büyük farkları, geçici sıcak tel yönteminde zamana bağlı ölçümler yapılmakta iken 3- ω yönteminde elektrik akımı frekansa bağlı olarak ölçülür. 1 ω frekansta metal tele bir akım uygulandığında, tel 2 ω frekansında bir sıcaklık üretir ve bu da 3- ω frekansında bir voltaj bileşeni ortaya çıkarır (Kumanek and Janas 2019).

Nanoakışkanların termal iletkenlikleri birçok parametreye bağlıdır. Bunlardan bazıları nanopartikülün türü, şekli, boyutu ve baz akışkan içerisindeki miktarı, ayrıca baz akışkan türü ve nanoakışkan süspansiyonunun hazırlanma yöntemidir (Trisaksri and Wongwises 2007). Nanoakışkanların ısı transfer akışkanı olarak kullanılması amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada, TiO₂, Al₂O₃, Fe ve WO₃ nanopartikülleri ile elde edilen nanoakışkanların termal iletkenliklerinin ölçümü yapılmıştır. Baz akışkan olarak etilen glikol ve su kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, nanoakışkanların tümünün termal

iletkenlik açısından baz akışkanlara göre çok daha yüksek değerlere ulaştığı rapor edilmiştir (Yoo et al. 2007). Bir başka çalışmada nanopartikül konsantrasyonu ve sıcaklığın nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. MgO/etilen glikol + su (40:60) nanoakışkanı farklı hacim konsantrasyonlarında hazırlanmış ve gözlemler yapılmıştır. Termal iletkenlik açısından, baz akışkana göre maksimum %35 civarında bir artış hacimce %3 nanoakışkanda elde edilmiştir. Ayrıca düşük konsantrasyona sahip nanoakışkan üzerine sıcaklık artışının önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir (Esfe et al. 2015a). Yüksek nanopartikül konsantrasyonlarında (ağırlıkça %1,75-10,5) hazırlanan ZnO/etilen glikol nanoakışkanının termal iletkenliği, viskozitesi ve reolojik analizleri yapılmıştır. Akışkanın termal iletkenliğinde %10,5 konsantrasyon için yaklaşık %15'lik bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan konsantrasyon aralığında nanoakışkanın Newton tipi akışkan davranışında olduğu bildirilmiştir (Li et al. 2015). Benzer bir çalışma Khedkar et al. (2016) tarafından TiO₂/etilen glikol nanoakışkanı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hacimce %7 oranında hazırlanan nanoakışkanın termal iletkenliğinin baz akışkanının yaklaşık 1,2 katı olduğu tespit edilmiştir.

Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerine etki eden önemli parametrelerden bir tanesi nanopartiküllerin boyutlarıdır. Bu sebeple birçok araştırmacı tarafından, nanopartiküllerin boyutlarının nanoakışkanın başta termal iletkenlik olmak üzere etkileri incelenmiştir. Hemmat Esfe et al. (2015) tarafından farklı çaplara (37, 71 ve 98 nm) sahip Fe nanopartikülleri kullanılarak elde edilen nanoakışkanların termal iletkenlikleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, küçük çapa sahip nanopartiküllerin termal iletkenliklerinin diğerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Nanoakışkanların termal iletkenliğinin partikül çapına bağlı olduğunu göstermek için gerçekleştirilen bir çalışmada SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂, CuO ve elmas nanopartikülleri kullanılmıştır. Su bazlı olarak hazırlanan nanoakışkanların termal iletkenlikleri sıcak tel yöntemi ile ölçülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda bütün nanoakışkanların termal iletkenliğinin partikül çapı ile arttığı belirlenmiştir (Pryazhnikov et al. 2017). Farklı konsantrasyonlarda (ağırlıkça %1-3), nano ve mikro boyuta sahip Cu partikülleri ile etilen glikol bazlı mikro akışkanlar ve nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Bu çalışmanın sonunda, nanoakışkan baz sıvıya kıyasla termal iletkenliği %4,5 civarında artırırken, aynı şartlarda mikro akışkan %1,8 civarında arttırmıştır. Böylece, partikül boyutunun küçülmesiyle

termal iletkenliğin arttırılabileceği belirtilmiştir (Nikkam et al. 2017). Bir başka çalışma, Lee et al. (2014) tarafından, Al_2O_3 /su nanoakışkanları ile gerçekleştirilmiştir. Ortalama partikül çapları 71,6, 114,5, 136,8 nm boyutunda olarak hazırlanan numunelerin ısı iletkenlikleri sıcaklığa bağlı olarak ölçülmüştür. Nanopartikül boyutu ile ısı iletkenliğin ters orantılı olduğu belirlenmiş ve ayrıca, küçük boyutlu partiküllere sahip nanoakışkanın termal iletkenliğine sıcaklık artışının daha fazla etki ettiği deneysel olarak gösterilmiştir.

Nanoakışkanların ısı iletkenliklerini etkileyen bir diğer faktör de nanopartiküllerin şekilleridir. Bu konuyla ilgili Maheshwary et al. (2017) farklı şekillere sahip TiO_2 nanopartikülleri ile deneysel bir çalışma yapmışlardır. Kübik, küresel ve çubuk şeklinde olmak üzere üç farklı nanopartikül şeklinde yapılan deneylerde, en yüksek termal iletkenliğe kübik şeklindeki partiküllere sahip nanoakışkanın ulaştığını belirlemişlerdir. Benzer bir başka çalışmada, kübik ve silindir şekillere sahip Al_2O_3 nanopartikülleri ile elde edilen nanoakışkanlar karşılaştırılmış ve silindir şekilli nanopartiküller kullanılarak hazırlanan numunenin termal iletkenliğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Kim et al. 2015). Küresel ve yaklaşık dikdörtgene benzer şekilli ZnO nanopartikülleri ile su bazlı nanoakışkanlar hazırlanmış ve partikül şeklinin nanoakışkanın termal iletkenliği üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Bu araştırma sonucunda hacimce %5 nanoakışkanların baz akışkana göre termal iletkenlikleri dikdörtgen ve küresel için sırasıyla %18 ve %12 daha yüksek olarak elde edilmiştir (Jeong et al. 2013). Ek olarak, Çizelge 2.4’de farklı nanoakışkan türlerinin termal iletkenlik artışları özet halinde sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Nanoakışkanların termal iletkenlikleri üzerine literatür özeti

Kaynak	Nanoakışkan türü	Nanopartikül boyutu (nm)	Nanopartikül konsantrasyonu (%)	Termal iletkenlik artışı (%)
Hamid et al. (2018)	$TiO_2 + SiO_2$ (20:80) / su + etilen glikol (60:40)	22 – 50	1	16
Yu et al. (2011)	Grafen / etilen glikol	-	5	86
Yarmand et al. (2015)	Grafen + gümüş / saf su	-	0,1	22,22

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.4. (devam)

Afrand et al. (2016a)	Fe ₃ O ₄ / su	20 – 30	3	90
Huminic et al. (2015)	FeC / su	14,2	1*	24,1
Qin et al. (2016)	TiO ₂ / yağ	5,9	0,05	44,6
Beck et al. (2010)	CeO ₂ / su	74	4	~22
Omrani et al. (2019)	MWCNT / su	Çap < 8 nm, Uzunluk 10 – 30 µm	0,05	36
Senthilraja et al. (2015)	Al ₂ O ₃ / su	50	0,2	6,1
Arora et al. (2021)	SiO ₂ / su	15	1*	1,89
Abutaleb ve Imran (2021)	CuO / ayçiçeği yağı	887,6	0,46	20,68
Parekh (2014)	Mn _{0.5} Zn _{0.5} Fe ₂ O ₄ / Hidrokarbon yağı	~6	10	45

Yukarıda nanoakışkanların ısı iletkenliğı üzerine literatürde bulunan çalışmaların bir kısmının özeti sunulmuştur. Bu konuda çok sayıda çalışma yapılmış ve araştırmacılar nanoakışkanların iletkenliğinin tahmini için deneysel veriler baz alınarak çeşitli korelasyon önerileri yapmışlardır. Bu öneriler aşağıdaki tabloda özet şeklinde sunulmuştur.

Çizelge 2.5. Nanoakışkanların termal iletkenliklerinin tahmini için literatürde yer alan korelasyonlar.

Kaynaklar	Nanoakışkan türü	Korelasyonlar
Maxwell (1881)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi}$
Bruggeman (1935)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{1}{4} \left[(3\phi - 1) \frac{k_{np}}{k_{bf}} + (2 - 3\phi) \right] + \frac{k_{bf}}{4} \sqrt{\Delta}, \Delta = (3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}} \right)$
Hamilton and Crosser (1962)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n - 1)k_{bf} - (n - 1)(k_{bf} - k_{np})\phi}{k_{np} + (n - 1)k_{bf} + (k_{bf} - k_{np})\phi}$

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.5. (devam)

Xuan et al. (2003)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2\varphi(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + 2k_{bf} + \varphi(k_{bf} - k_{np})} + \frac{\rho_{np}\varphi C_{pnp}}{2} \sqrt{\frac{\kappa T}{3\pi\mu_{bf}r_{np}}}$
Wang et al. (2003)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = (3\varphi - 1)k_{np} + [3(1 - \varphi) - 1]k_{bf} + \Delta$ $\Delta = (3\varphi - 1)^2 k_{np}^2 + [3(1 - \varphi) - 1]^2 k_{bf}^2 + 2[2 + 9\varphi(1 - \varphi)]k_{bf}k_{np}$
Bhattacharya et al. (2004)	Hepsi	$k_{nf} = \varphi k_{np} + (1 - \varphi)k_{bf}$
Yu and Choi (2004)	Hepsi	$k_{nf} = \left(1 + \frac{n\varphi A}{1 - \varphi A}\right) k_{bf}$ $A = \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} \frac{k_{npj} - k_{bf}}{k_{npj} + (n - 1)k_{bf}}$
Koo and Kleinstreuer (2004)	Hepsi	$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2(k_{bf} - k_{np})\varphi}{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{bf} - k_{np})\varphi} k_{bf}$ $+ 5 \times 10^4 \beta \rho_{bf} C_{pbf} \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \varphi, vb.)$ $f(T, \varphi) = (-6,04\varphi + 0,4705)T + (1722,3\varphi - 134,63)$
Xue (2005)	Karbon nanotüp bazlı kompozitler	$k_{nf} = k_{bf} \frac{1 - \varphi + 2\varphi \frac{k_{np}}{k_{np} - k_{bf}} \ln \frac{k_{np} + k_{bf}}{2k_{bf}}}{1 - \varphi + 2\varphi \frac{k_{bf}}{k_{np} - k_{bf}} \ln \frac{k_{np} + k_{bf}}{2k_{bf}}}$
Chon et al. (2005)	Al ₂ O ₃ / su	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 64,7\varphi^{0,746} \left(\frac{d_{np}}{d_f}\right)^{0,369} \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right)^{0,7476} \times Pr^{0,9955} Re^{1,2321}$
Maiga et al. (2005)	Al ₂ O ₃ / etilen glikol	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 28,905\varphi^2 + 2,8273\varphi + 1$
Leong et al. (2006)	Hepsi	$k_{nf} = \frac{(k_{np} - k_{lr})\varphi k_{lr}(2\beta_l^3 - \beta^3 + 1) + (k_{np} + 2k_{lr})}{\beta_l^3(k_{np} - 2k_{lr}) - (k_{np} - k_{lr})} \dots$ $\frac{\beta_l^3[\varphi\beta^3(k_{lr} - k_{bf}) + k_{bf}]}{\varphi(\beta_l^3 + \beta^3 - 1)}$ $\beta = 1 + \gamma, \beta_l = 1 + \gamma/2$
Li and Peterson (2006)	Al ₂ O ₃ / su	$\frac{k_{nf} - k_{bf}}{k_{bf}} = 0,764481464\varphi + 0,018688867T - 0,462147175$
Timofeeva et al. (2007)	Hepsi	$k_{nf} = k_{bf} \left(1 + \frac{3(k_{np} - k_{bf})}{k_{np} + 2k_{bf} + 2k_{np}k_{bf}/R\beta} \varphi\right)$
Jang and Choi (2007)	Hepsi	$k_{nf} = k_{bf}(1 - \varphi) + 0,01k_{np}\varphi + 18 \times 10^6 \frac{d_f}{d_{np}} k_{bf} Re_d^2 Pr_{bf} \varphi$

Çizelge 2.5. (devam)

Avsec and Oblak (2007)	Hepsi	$k_{nf} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)\varphi_e(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + \varphi_e(k_{bf} - k_{np})} k_{bf}$
Yu-Hua et al. (2008)	Hepsi	$k_{nf} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)\varphi_e(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + \varphi_e(k_{bf} - k_{np})} k_{bf} + \frac{\rho_{np}\varphi_e C_{p_{nf}}}{2} \sqrt{\frac{\kappa T}{3\pi r_c \mu_{nf}}}$ $\varphi_e = \varphi \left(1 + \frac{h}{r_c}\right)^3$
Vajjha and Das (2009b)	Hepsi	$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2(k_{bf} - k_{np})\varphi}{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{bf} - k_{np})\varphi} k_{bf} + 5 \times 10^4 \beta \rho_{bf} C_{p_{bf}} \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \varphi)$ $f(T, \varphi) = (2,8217 \times 10^{-2} \varphi + 3,917 \times 10^{-3}) \left(\frac{T}{T_0}\right) + (3,0669 \times 10^{-2} \varphi - 3,91123 \times 10^{-3})$
Mintsa et al. (2009)	CuO / su	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0,99 + 1,74\varphi$
Chandrasekar et al. (2009)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \left(\frac{C_{p_{nf}}}{C_{p_{bf}}}\right) \left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}\right)^{1,33} \left(\frac{M_{bf}}{M_{nf}}\right)^{0,33}$
Kumar et al. (2010)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)\varphi_e(k_{bf} - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + \varphi_e(k_{bf} - k_{np})} + \frac{C \varphi_e (T - T_0)}{\mu_{nf} k_{bf} r_c^4}$
Corcione (2011)	Al ₂ O ₃ , CuO, Cu, TiO ₂ / su etilen glikol	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 4,4 Re^{0,4} Pr^{0,66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right)^{0,03} \varphi^{0,66}$
Ghanbarpour et al. (2014)	Al ₂ O ₃ / su	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 3,5\varphi + 2,5\varphi^2$
Hassani et al. (2015)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1,04 + \varphi^{1,11} \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right)^{0,33} Pr^{-1,7} + \left[\frac{1}{Pr^{-1,7}} - \frac{262}{\left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right)^{0,33}} + \left(135 \left(\frac{d_{ref}}{d_{np}}\right)^{0,23} \left(\frac{\nu}{d_{np} V_B}\right)^{0,82} \left(\frac{C_p}{T^{-1} V_B^2}\right)^{-0,1} \left(\frac{T_b}{T}\right)^{-7} \right) \right]$

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.5. (devam)

Esfe et al. (2015b)	Al ₂ O ₃ / su	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0,991 + 0,276\varphi + 77,6\varphi^2 + 3641,231T\varphi^2 + \frac{0,00217}{\sin(T - \varphi)} - 6,01 \times 10^{-6}T^2 - 3647,099T\varphi \sin(\varphi)$
Khosrojerdi et al. (2016)	Grafen /su	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{3 + \varphi[2B_{11}(1 - L_{11}) + B_{33}(1 - L_{33})]}{3 - \varphi(2B_{11}L_{11} + B_{33}L_{33})}$ $L_{11} = 0, L_{33} = 1$ $B_{ii} = \frac{k_{np} - k_{bf}}{k_{bf} + L_{ii}(k_{np} - k_{bf})}$
Harandi et al. (2016)	MWCNTs + Fe ₃ O ₄ / Etilen Glikol	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 0,0162T^{0,6009}\varphi^{0,7038}$
Pryazhnikov et al. (2017)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + (0,0193 + 0,00383 \frac{\rho_{np}}{\rho_{bf}}) \sqrt{\varphi \frac{d_{np}}{d_f}}$
Moldoveanu et al. (2018)	Al ₂ O ₃ + SiO ₂ / su	$k_{nf} = 0,474 + 0,006T - 0,00005T^2 + 0,041\varphi_{top}$
Kakavandi and Akbari (2018)	MWCNT + SiC / su + etilen glikol (50:50)	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0,981 + 0,0017 \times T^{1,386}\varphi^{0,698}$
Garoosi (2020)	Hepsi	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{bf} - k_{np})\varphi}{k_{np} + 2k_{bf} - 2(k_{bf} - k_{np})\omega\varphi} + 3,762 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{8,661} \left(\frac{d_{np}}{d_f}\right)^{-0,4351} \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right)^{0,08235} \varphi^{0,64} e^{(-5,742\varphi)}$
Moghadam et al. (2020)	Grafen oksit + TiO ₂ / su	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1,017 + 0,072 \times 1,029^T \times \varphi^{0,773}$
Moradi et al. (2020)	TiO ₂ + MWCNTs (70:30) / Etilen glikol + water	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + 0,0187 \times T^{0,6913} \times \varphi^{0,6719}$
Gupta et al. (2020)	ZnFe ₂ O ₄ / su	$k_{nf} = 0,39077 \times T^{0,14566} \times \psi^{0,02175}$
Pare and Ghosh (2021)	Metal oksit bazlı nanoakışkanlar	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = a + bT + c\psi + dT^2 + e\psi^2 + fT\psi$ a, b, c, d, e, f: nanoakışkan türüne göre korelasyon katsayıları
Bakhtiari et al. (2021)	TiO ₂ + Grafen / su	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1,0033 + 0,078846T^{0,40488}\varphi^{0,69671}$

2.2.3.2. Nanoakışkanların viskoziteleri

Akışkanların viskozitesi, önemli bir akış özelliğidir. Akışın sağlanması için gerekli pompa gücü, akış alanında meydana gelen basınç düşüşü ve konvektif ısı transferi gibi birçok parametre viskoziteye bağlıdır. Isı transferi akışkanlarının, akış davranışlarını ve ısı transferi performanslarını belirlemek için viskozite analizi oldukça önemlidir (Mishra et al. 2014). Bahsedilen sebeplerden dolayı, nanoakışkanlar ile yapılan birçok araştırmada, kullanılan nanoakışkanların viskoziteleri belirlenmekte ve ısı transferi ve akış koşulları üzerine etkileri gözlemlenmektedir. Nanoakışkanların termal iletkenliklerinde olduğu gibi, viskozitelerinde de çeşitli faktörler önemli yer tutmaktadır. Bunlardan bazıları, nanopartiküllerin şekli ve boyutu, hacimce veya ağırlıkça konsantrasyon miktarı, nanoakışkanın sıcaklığıdır.

Jamshidi et al. (2012) tarafından SiO₂ nanopartikülleri farklı baz akışkanlara (trafo yağı, su ve etilen glikol) karıştırılarak elde edilen nanoakışkanların viskoziteleri incelenmiştir. Konsantrasyonun artmasıyla viskozitenin arttığı ve sıcaklıkla birlikte düştüğü gösterilmiştir. Nanoakışkanların viskozitelerini etkileyen faktörler üzerine kapsamlı bir çalışma Minakov et al. (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Al₂O₃, SiO₂, CuO, TiO₂, ZrO₂, Fe₂O₃ ve Fe₃O₄ nanopartikülleri ve saf su, makine yağı ve etilen glikol baz akışkanları kullanılarak farklı konsantrasyonlarda nanoakışkanlar üretilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerin sonucunda, viskozitenin nanopartikül ve baz akışkan türüne bağlı olduğu, nanopartikül boyutunun artmasıyla viskozitenin azaldığı gözlemlenmiştir. Bir başka çalışmada, tek duvarlı karbon nanotüplerin (SWCNT) etilen glikol içerisine farklı miktarlarda dağıtılmasıyla elde edilen nanoakışkanların viskoziteleri üzerine sıcaklık ve parçacık miktarının etkisi incelenmiştir. Konsantrasyonla birlikte artan viskozitenin, sıcaklık artışıyla azaldığı belirtilmiştir. Dahası, 30 °C sıcaklıkta ve hacimce %0,1 konsantrasyonda nanoakışkanın viskozitesinin baz akışkanınkinden 3,18 kat daha fazla olduğu saptanmıştır (Baratpour et al. 2016). TiO₂/su nanoakışkanının farklı konsantrasyonlarda viskozite ölçümlerinin yapıldığı bir deneysel çalışmada, araştırmacılar sıcaklıkla birlikte viskozitenin azaldığını ve konsantrasyonla ise arttığını tespit etmişlerdir (Duangthongsuk and Wongwises 2009). Bir başka çalışmada, araştırmacılar Al₂O₃/makine yağı nanoakışkanının viskozitesini ölçmüş ve baz akışkanla kıyaslamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, ağırlıkça %3 konsantrasyona sahip

nanoakışkanın viskozitesinin baz akışkaninkinden %36 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Vasheghani et al. 2011).

Huminic et al. (2021) tarafından, Fe + Si/su nanoakışkanının çeşitli konsantrasyonlarda ve sıcaklıklarda viskoziteleri değerlendirilmiştir. Ağırlıkça %0,25 – 1 aralığında konsantrasyonlar tercih edilen çalışmada, %1 konsantrasyona sahip nanoakışkanın en yüksek viskoziteye sahip olduğu belirlenmiştir. Sundar et al. (2016) tarafından farklı oranlarda etilen glikol + su karışımı baz akışkana nanoelmas + Fe₃O₄ nanopartikülleri %0,2 konsantrasyonda dağıtılarak elde edilen nanoakışkanların viskozite ölçümleri ve baz akışkanlarla karşılaştırmaları yapılmıştır. Nanoakışkanların viskoziteleri 20:80, 40:60 ve 60:40 etilen glikol + su karışımları ile karşılaştırılmış ve sırasıyla 1,72, 2,19 ve 1,5 kat fazla olduğu tespiti yapılmıştır. Farklı oranlarda süspanse edilen MgO + TiO₂/su nanoakışkanlarının termofiziksel özellikleri ve reolojik davranışları incelenmiştir. Farklı sıcaklık (45 – 60 °C) ve konsantrasyonlarda (%0,1 – 0,5) test edilen nanoakışkanların tamamının Newton tipi akışkan davranışları sergilediği vurgulanmıştır. Ayrıca baz akışkana göre maksimum viskozite artışı 60:40 MgO + TiO₂ oranında, %0,5 konsantrasyonda ve 35 °C’de %36,9 olarak belirlenmiştir (Mousavi et al. 2019). Fe₃O₄ + Ag/Etilen Glikol nanoakışkanının reolojik davranışı ve viskozitelerinin incelendiği bir çalışmada, %0,0375, 0,075, 0,15, 0,3, 0,6 ve 1,2 oranlarında nanoakışkan numuneleri hazırlanmıştır. Bu tip nanoakışkanlar, %0,3 konsantrasyona kadar Newton tipi akışkan özellikleri gösterirken, daha yüksek konsantrasyonlarda Newton tipi olmaya akışkan özellikleri sergiledikleri gösterilmiştir (Afrand et al. 2016b). MgO + MWCNT/etilen glikol hibrit nanoakışkanının viskozite değerlerinin tartışıldığı bir başka çalışmada, %0 – 1 konsantrasyon aralığında ve farklı sıcaklıklarda (30 – 60 °C) viskozite ölçümleri yapılmıştır. %1 konsantrasyona sahip nanoakışkanın viskozite artışının yaklaşık %168 değerinde olduğu belirlenmiştir (Soltani and Akbari 2016). Etilen glikol baz akışkanı içerisine 80:20 oranında TiO₂ + CuO/C nanoparçacıklarının dağıtılmasıyla hazırlanan nanoakışkanın, %2 konsantrasyonda viskozitesinin baz akışkana göre %80 artış gösterdiği Akilu et al. (2017) tarafından gerçekleştirilen deneysel araştırmada bildirilmiştir.

Nanoakışkanların viskozitelerini etkileyen faktörlerden biri partiküllerin şeklidir. Bunun üzerine Timofeeva et al. (2009) tarafından Al₂O₃/etilen glikol + su nanoakışkan

ile bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanların viskozitelerinin, partikül yüzey şekli ve geometrik özelliklerine bağlı olduğu gösterilmiştir. Silindir gibi uzun partiküllerin Brownian hareketlerini sınırladığı için, küp, küre gibi şekillere sahip nanoakışkanlarla aynı konsantrasyonlarda olmasına rağmen, viskoziteleri daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Daha düşük viskozite değerlerine ulaşmak için küresel veya en boy oranı az olan partiküllerin tercih edilmesi önerilmiştir. Ayrıca partiküllerin yüzey yükü, baz akışkan ile partikül arasındaki etkileşimleri ve partiküller arası topaklanmayı etkilemektedir. Bu çalışmada, Al_2O_3 /etilen glikol + su nanoakışkanlarını pH değerleri ile yüzey yükleri ayarlanarak termal iletkenliği etkilemeden viskozitenin %31 oranında azaltılacağı gösterilmiştir. Bir başka çalışma Nithiyanantham et al. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Al_2O_3 /su nanoakışkanı kullanılan çalışmada, çubuk ve küre şekline sahip partiküllerin termofiziksel özellikleri incelenmiştir. Çubuk şekilli nanoakışkanın viskozitesi küre şeklindeki partiküllere sahip nanoakışkanın viskozitesinden daha yüksek olduğu rapor edilmiştir. Karimi-Nazarabad et al. (2016) farklı şekillere sahip WO_3 nanopartikülleri kullanarak elde ettikleri nanoakışkanların viskozitelerini incelediler ve şekillerinin viskozite üzerindeki etkisini tartıştılar. Bu çalışmanın sonucunda çokgen şekillere sahip nanoakışkanlardaki viskozite artışının küresel şekildekinden daha yüksek olduğu yazarlar tarafından bildirildi.

Isıl iletkenlikte olduğu gibi nanoakışkanların viskoziteleri üzerinde de kullanılan nanopartiküllerin boyutları önemli bir etkiye sahiptir. Bu etki sebebiyle çok sayıda araştırmacı bu konu ile ilgili çalışmalar yapmaktadırlar. Hu et al. (2020) tarafından çeşitli boyutlara sahip Al_2O_3 (20, 50 ve 100 nm) ve ZnO (20, 40, 60, 80 ve 100 nm) nanoparçacıklarının makine yağı içerisine dağıtılmasıyla elde edilen nanoakışkanların viskozitelerini ölçmüş ve partikül boyutunun etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmanın sonunda, nanopartikül boyutu arttıkça viskozitenin arttığı ortaya konmuştur. Nanopartikül boyutunun konvektif ısı transferi üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, 45 ve 150 nm ortalama çaplara sahip iki tür Al_2O_3 nanopartikülleri kullanılmıştır. 45 nm boyutlara sahip nanoakışkanın viskozitesi 150 nm olana göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Anoop et al. 2009). He et al. (2007) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, TiO_2 /su nanoakışkanı kullanılmıştır. Hacimce %0,6 konsantrasyona sahip nanoakışkanın farklı partikül boyutlarında viskozite değerleri ölçülmüş ve partikül boyutuyla birlikte viskozitenin arttığı gözlemlenmiştir. Bir başka

2. KAYNAK ÖZETLERİ

çalışmada, üç farklı boyuta sahip (18,1, 28,3 ve 45,6 nm) SiO₂ nanoparçacıkları etilen glikol içine dağıtılarak hazırlanan nanoakışkan numunelerinin viskozite ölçümü yapılmıştır. Farklı konsantrasyonlarda yapılan deneylerde, konsantrasyonun artmasıyla nanoakışkan viskozitesi arttığı, ancak nanoparçacık boyutu arttıkça azaldığı belirlenmiştir (Rudyak et al. 2016). Chevalier et al. (2007) tarafından nanopartikül boyutunun viskozite üzerindeki etkisi incelenmiştir. 35, 94 ve 190 nm olmak üzere üç farklı boyutta SiO₂ nanoparçacıkları etanol içerisine dağıtılmış ve viskozite ölçümleri yapılmıştır. Partikül boyutunun azalmasıyla viskozitenin arttığı tespit edilmiştir.

Yukarıda özet halinde sunulan paragraflardan anlaşılabileceği gibi, mevcut literatürde nanoakışkanların viskoziteleri üzerine çok sayıda çalışma vardır. Araştırmacıların ısı transferi uygulamalarında nanoakışkan kullanımı, çeşitli faktörler dikkate alınarak çalışmaları devam etmektedir. Çizelge 2.6’da çeşitli nanoakışkanların, baz akışkana göre viskozite artışları özet halinde sunulmaktadır.

Çizelge 2.6. Nanoakışkanların viskozite artışları üzerine kısa literatür özeti

Kaynaklar	Nanopartikül	Baz akışkan	Nanopartikül konsantrasyonu (%)	Sıcaklık (°C)	Maksimum Viskozite artışı
Nguyen et al. (2007)	CuO	Su	9	20 – 70	7 – 10 kat
Namburu et al. (2007)	SiO ₂	Etilen glikol + su (60:40)	10	-35 – 50	%90
Kwek et al. (2010)	Al ₂ O ₃	Su	5	25	%60
Meriläinen et al. (2013)	MgO	Su	2	10 – 50	%91
Ferrouillat et al. (2013)	ZnO	Su	0,82	20 – 70	~%15
Oliveira et al. (2014)	Ag	Su	0,2	25	%5
Sundar et al. (2014)	MWCNT + Fe ₃ O ₄	Su	0,3	20 – 60	1,5 kat
Jarahnejad et al. (2015)	TiO ₂	Su	9*	20 – 50	%78

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.6. (devam)

Agarwal et al. (2015)	Al ₂ O ₃	Gaz yağı	0,5	25 – 65	~1,14 kat
Minakov et al. (2016)	SiO ₂	Su	2	25	%43
Nabil et al. (2017)	SiO ₂ + TiO ₂	Etilen glikol + su (40:60)	3	30 – 80	%62,5
Sundar et al. (2017)	GO + Co ₃ O ₄	Su	0,2	20 – 60	1,7 kat
Wang et al. (2021)	CNT	Su	1	5 – 40	%290,8

Nanoakışkanların viskozitelerinin incelendiği literatürde yer alan çalışmaların özeti yukarıdaki paragraflarda sunulmuştur. Özeti sunulan viskozite araştırmalarının yanı sıra araştırmacılar, teorik olarak nanoakışkanların yaklaşık viskozitelerinin belirlenebilmesi için çeşitli modeller ortaya koymuşlardır. Bu modellerin bazıları Çizelge 2.7’de verilmektedir.

Çizelge 2.7. Nanoakışkanların viskozite tahmini için çeşitli korelasyonlar

Kaynaklar	Nanoakışkan türü	Korelasyon
Einstein (1905)	Hepsi	$\mu_{nf} = (1 + 2,5\varphi)\mu_{bf}$
De Bruijn (1942)	Hepsi	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{1 - 2,5\varphi + 1,552\varphi^2}$
Vand (1948)	Hepsi	$\mu_{nf} = (1 + 2,5\varphi + 7,349\varphi^2)\mu_{bf}$
Brinkman (1952)	Hepsi	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1 - \varphi)^{2,5}}$
Batchelor (1977)	Hepsi	$\mu_{nf} = (1 + 2,5\varphi + 6,2\varphi^2)\mu_{bf}$
Maiga et al. (2005)	Al ₂ O ₃ / etilen glikol	$\mu_{nf} = (1 - 0,19\varphi + 360\varphi^2)\mu_{bf}$
Kulkarni et al. (2006)	CuO / su	$\ln \mu_{nf} = (20587\varphi^2 + 15857\varphi + 1078,3)T^{-1} - (-107,12\varphi^2 + 53,548\varphi + 2,8715)$
Buongiorno (2006)	TiO ₂ / su	$\mu_{nf} = (1 + 5,45\varphi + 108,2\varphi^2)\mu_{bf}$
Chen et al. (2007)	Hepsi	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} - 1 = 10,6\varphi + (10,6\varphi)^2$
Garg et al. (2008)	Cu / etilen glikol	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 11\varphi)$
Rea et al. (2009)	ZrO ₂ / su	$\mu_{nf} = (1 + 46,801\varphi + 550,82\varphi^2)\mu_{bf}$
Masoumi et al. (2009)	Al ₂ O ₃ / su	$\mu_{nf} = \mu_{bf} + \frac{\rho_{np}V_B d_{np}^2}{72C\delta}, \delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\varphi}} d_{np}$

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.7. (devam)

Namburu et al. (2009)	SiO ₂ / etilen glikol + su	$\log \mu_{nf} = Ae^{-BT}$ $A = 0,1193\varphi^3 - 1,9289\varphi^2 - 2,245\varphi + 167,17$ $B = -7 \times 10^{-6}\varphi^2 - 0,0004\varphi + 0,0192$
Abu-Nada (2009)	Al ₂ O ₃ / su	$\mu_{nf} = -0,155 - \frac{19,582}{T} + 0,794\varphi + \frac{2094,47}{T^2}$ $-0,192\varphi^2 - 8,11\frac{\varphi}{T} - \frac{27463,863}{T^3} + 0,0127\varphi^3$ $+1,6044\frac{\varphi^2}{T} + 2,1754\frac{\varphi}{T^2}$
Khanafer and Vafai (2011)	Al ₂ O ₃ / su	$\mu_{nf} = -0,4491 + \frac{28,837}{T} + 0,574\varphi - 0,1634\varphi^2$ $+23,053\frac{\varphi^2}{T^2} + 0,0132\varphi^3 - 2354,735\frac{\varphi}{T^3}$ $+23,498\frac{\varphi^2}{d_{np}^2} - 3,0185\frac{\varphi^3}{d_{np}^2}$
Azmi et al. (2012)	Al ₂ O ₃ / su	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right)^{11,3} \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{-0,038} \left(1 + \frac{d_{np}}{170}\right)^{-0,061}$
Pakdaman et al. (2012)	MWCNT / Isı transfer yağı	$\frac{\mu_{nf} - \mu_{bf}}{\mu_{bf}} = (-11,23T + 5926,5) \varphi^{1,43}$
Sekhar and Sharma (2015)	Al ₂ O ₃ / su	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 0,935 \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right)^{10,51} \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{0,5602} \left(1 + \frac{d_{np}}{80}\right)^{-0,05915}$
Asadi et al. (2016)	MWCNT + MgO (20:80) / makine yağı	$\mu_{nf} = 328201T^{-2,053} \varphi^{0,09359}$
Wang et al. (2016)	Fe ₃ O ₄ / su	$\mu_{nf} = \left(\frac{0,035B^2 + 3,1B - 27886,4807\varphi^2}{+4263,02\varphi + 316,0629}\right) e^{-0,02T}$
Meybodi et al. (2016)	Hepsi	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{A_1 + A_2 e^{\frac{\varphi}{d_{np}}} + A_3 e^{\frac{2\varphi}{d_{np}}} + A_4 e^{\frac{3\varphi}{d_{np}}}}{A_5 + A_6 \frac{\ln d_{np}}{T} + A_7 \frac{(\ln d_{np})^2}{T}}$
Aberoumand et al. (2016)	Yağ bazlı nanoakışkanlar	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1,15 + 1,061\varphi - 0,5442\varphi^2 + 0,1181\varphi^3$
Toghraie et al. (2016)	Fe ₃ O ₄ / su	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1,01 + 0,007165T^{1,171} \varphi^{1,509} e^{-0,00719T\varphi}$
Ilyas et al. (2017)	Al ₂ O ₃ / yağ	$\mu_{nf} = -1,6752 - \frac{0,7856}{T} + 0,9125(1 - \varphi)$ $+3,4862(1 - \varphi)^2 + 134,8479\frac{(1 - \varphi)^2}{T^2}$ $-2,7263(1 - \varphi)^3 - 2347,62\frac{(1 - \varphi)}{T^3}$

Çizelge 2.7. (devam)

Esfe et al. (2017)	ZnO / Motor yağı (10W40)	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = A_1 + A_2\varphi + A_3\varphi^2 + A_4\varphi \ln \varphi$
Akbari et al. (2017)	SiO ₂ / etilen glikol	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = -24,81 + 3,23T^{0,08014}e^{(1,838\varphi^{0,002334})} - 0,0006779T^2 + 0,024\varphi^3$
Karimipour et al. (2018)	CuFe ₂ O ₄ + SiO ₂ / su + etilen glikol (60:40)	$\mu_{nf} = 43947802,6097\varphi^{3,3239}T^{-1,2107} + 22,755T^{-0,5891} - 0,9317$
Alrashed et al. (2018)	CuFe ₂ O ₄ + SiO ₂ / su	$\mu_{nf} = 233,2713 \left(\frac{\varphi}{T}\right)^{0,8623} - 2,6698\varphi^{0,4821} + 0,9145$
Ghasemi and Karimipour (2018)	CuO / Parafin	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = -1,735T^{-0,017} - 0,027\psi^{0,418} + 0,039\psi^{1,543}T^{-0,033} + 2,956$
Gupta et al. (2020)	ZnFe ₂ O ₄ / su	$\mu_{nf} = 13,11 \times T^{-0,79359} \times \psi^{0,0369}$
Klazly and Bognár (2022)	Hepsi	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 9,4974\varphi + 77,811\varphi^2 + 0,9514\varphi^3 + \sqrt{\frac{18K_b T \rho_{np}}{\pi}} \times \left[39,6231C \left(\sqrt[3]{\frac{\pi}{\varphi}} \right) \sqrt{d_{np}} \right]^{-1}$
Said et al. (2022)	Nanoelmas + Fe ₃ O ₄ / su	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1,23548 + 1,04554\varphi + 0,17445 \frac{T_{min}}{T_{max}}$ $T_{min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}, T_{max} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

2.2.4. Manyetik nanoakışkanlar

Bir baz sıvı (su, hidrokarbon yağı, etilen glikol vs.) içerisine dağıtılan süperparamanyetik nanopartiküllerin karışımları ile elde edilen nanoakışkanlar, manyetik nanoakışkanlar ve ferroakışkanlar olarak isimlendirilen özel bir nanoakışkan sınıfını oluştururlar. En sık kullanılan manyetik malzeme Fe₃O₄'tür. Manyetik nanoakışkanların en büyük özelliği hem sıvı hem de manyetik özellikleri aynı anda sergilemeleridir. Ferroakışkanlar bir manyetik alana maruz bırakıldığında süspansiyonun stabil kalabilmesi için manyetik partiküllerin çaplarının oldukça küçük olması gerekmektedir. Bu süspansiyonlar genellikle yaklaşık 10 nm boyutlarında manyetik partiküller içermektedirler. Küçük boyutlara sahip olmaları nedeniyle manyetik nanopartiküller yerçekimi ve manyetik dipol kuvvetlerinden çok fazla etkilenmezler ve topaklanma meydana getirmezler. Ancak kararlı bir karışım elde edebilmek için Van der Waals etkileşimlerine ve bunun sonucunda oluşacak olan partiküllerin topaklanmasına karşı

koyulması gerekmektedir (Charles 2002; Odenbach 2004; Nkurikiyimfura et al. 2013a). Bu manyetik etkilerin önüne geçilebilmesi için partiküllerin yüzeyine entropik itme oluşturan bir polimerle yüzey modifikasyonu işlemine tabi tutulması, topaklanma olayını önleyebilir. Parçacık çökmesine karşı kararlılık, parçacıkların termal enerjisinin manyetik ve yerçekimi enerjilerinden daha büyük olduğunda sağlanabilir. Manyetik nanoakışkanlar ile gerçekleştirilen çalışmalarda yüksek kararlılıkta bir süspansiyon elde edebilmek için genellikle nanoakışkana yüzey aktif maddeler eklenerek, yüksek hızlı bir karıştırıcı ile karıştırılmakta veya ultrasonikasyon uygulanmaktadır. Bazı sıvı içerisine yüzey dağıtıcılar ve nanopartiküller birlikte eklenerek sonikasyona tabi tutulma prosesi yaygın nanoakışkan hazırlama yöntemidir. Manyetik nanoakışkanlarda en yaygın kullanılan yüzey dağıtıcı oleik asittir. Manyetik nanopartiküller arasındaki teması ve bunun sonucunda oluşan topaklanmayı engellemek için, nanopartiküllerin 2 nm kalınlığında yüzey aktif madde tabakası tarafından kaplanması ile parçacıklar arasında oluşan itmenin topaklanmayı önlediği gösterilebilmektedir (Odenbach 1998; Kumar and Subudhi 2018).

20 nm boyutundaki Fe_3O_4 nanopartikülleri ile di-iyonize su bazlı nanoakışkan hazırlanan bir çalışmada, nonilfenol etoksilat yüzey dağıtıcı olarak kullanılmıştır. Su içerisine ağırlıkça %0,1 yüzey dağıtıcı eklenmiştir ve istenilen oranda (ağırlıkça %0,1-0,3) partiküller katılarak 250 rpm ile yarım saat boyunca karıştırılmıştır. Yüzey dağıtıcıların düşük oranda dağıtılmasının sebebinin nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini etkilediği için olduğu belirtilmiştir. Daha sonra partiküller arasındaki kümelenmenin ve topaklanmanın önlenmesi için nanoakışkan, 30 dk boyunca ultrasonikasyona (40 kHz/300 W) maruz bırakılmıştır. Ayrıca en iyi kararlılığın sağlanabilmesi için nanoakışkanların pH değerleri NaOH ve HCl (0,1 mM) çözeltileri kullanılarak ayarlanmıştır. Hazırlanan nanoakışkanların pH değerleri ağırlıkça %0,1, 0,2 ve 0,3 için sırasıyla 9,1, 9,6 ve 10,1 olarak belirlenmiş ve 21 günden fazla stabil kaldığı vurgulanmıştır (Salari et al. 2017). $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartikülleri su + etil glikol (80:20) baz sıvısı içerisine dağıtılarak manyetik nanoakışkan elde edilen çalışmada, stabil bir süspansiyon elde etmek amacıyla 5 saat ultrasonikasyon uygulanmıştır. Ayrıca pH değerleri NaOH kullanılarak 10-11 aralığında tutulmuştur. Hazırlanan nanoakışkanlar 1 ay boyunca gözlemlenmiş ve çökme tespit edilememiştir. Zeta potansiyel değeri -54,03 mV olarak bulunan numunenin iyi bir stabiliteye sahip olduğu vurgulanmıştır (Lee et al.

2021). Stabil bir $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MWCNT}$ (80:20) /deiyonize su nanoakışkanı hazırlamak için 2 saat ultrasonikasyonun optimal süre olduğu Giwa et al. (2020) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada bildirilmiştir. Aguilar et al. (2022) tarafından, sentetik bir yağ olan bifenil ($\text{C}_{12}\text{H}_{10}$) ve difenil eter ($\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}$) karışımı baz akışkanı ve CuFe_2O_4 nanopartikülleri kullanılarak nanoakışkan numuneleri hazırlanmıştır. İki adımlı metotla hazırlanan nanoakışkanlara, stabil bir karışım elde edilebilmesi için oleik asit yüzey dağıtıcısı eklenmiştir. Bu dağıtıcıların nanopartikül miktarına göre oranı, nanopartikül miktarının 3 ve 6 kat fazlası olarak seçilmiş ve değerlendirilmiştir. Ek olarak, 20 °C’lik bir banyo içinde nanoakışkan 20 dk boyunca ultrasonikasyona tabi tutulmuştur. Bu çalışma sonucunda, 1:6 (np:dağıtıcı) oranında hazırlanan nanoakışkanlarda topaklanmanın daha yavaş gerçekleştiği ve yüzey dağıtıcı madde kullanılmayan numunelere göre 1 hafta daha fazla kararlı bir karışım olarak kaldığı ortaya çıkarılmıştır. Bir başka çalışmada Katiyar et al. (2016) Fe, Ni ve Co nanopartiküllerinin etilen glikol ve yağ baz akışkanları içerisine dağıtarak nanoakışkan numuneleri elde etmişlerdir. Nanoakışkanları hazırlamanın ilk adımı olarak baz akışkan içerisine belirli konsantrasyonlarda partiküller eklenerek, 800 – 1200 rpm’de mekanik olarak 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Ardından 2 – 3 saat boyunca, süspansiyon içerisinde topaklanan partikülleri ayırmak için ultrasonikasyona maruz bırakmışlardır. Nanoakışkanların stabilitesini arttırmak ve daha uzun süre bunu muhafaza edebilmeleri için, çok az oranlarda etilen glikol bazlı nanoakışkanlar için CTAB ve yağ bazlı olanlar için oleik asit yüzey dağıtıcıları eklemişlerdir. Bu hazırlanan nanoakışkanların 7 – 10 gün boyunca stabil kaldıkları gözlemlenmiştir.

Bütün nanoakışkanlar gibi ferroakışkanlarda çeşitli ısı transferi uygulamalarında araştırmacılar tarafından, ısıl etkinliği artırma yöntemlerinden pasif yöntem olarak tercih etmekte ve kullanılabilirliklerini araştırmaktadırlar. Otomobil radyatörlerinde nanoakışkanların soğutucu olarak kullanılabilirliğinin tartışıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ZnFe_2O_4 nanopartikülleri etil glikol – su (50:50) karışımı baz akışkana dağıtılmış ve ısı transferi performansına etkisi incelenmiştir. Radyatör üzerinden bir fan aracılığıyla hava akış sağlanarak deneyler yapılmıştır. %1 hacim konsantrasyonunda hazırlanan nanoakışkan 0,03 kg/s sabit kütleli debide ve havanın Reynolds sayısı $84,4 \times 10^3$ olduğu durumda baz akışkana göre toplam ısı transfer hızında %78 civarında artış göstermiştir (Tripathi and Chandra 2015). Parabolik oluklu güneş kolektöründe nanoakışkan kullanımı ile veriminin artırılması amaçlanan bir

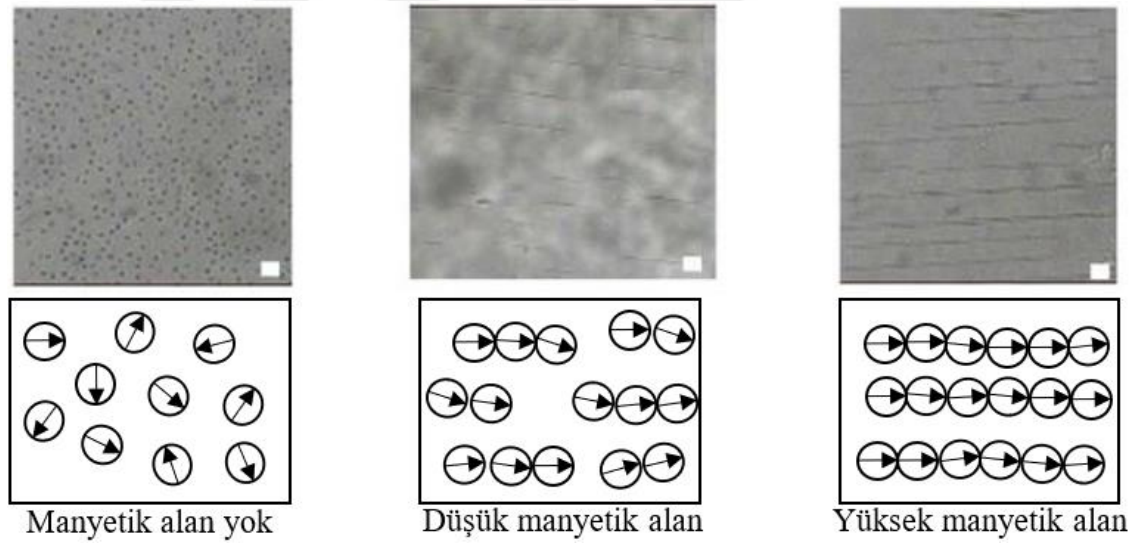
çalışma gerçekleştirilmiştir. Deiyonize su içerisine %0,01 ve 0,05 hacim konsantrasyonlarında NiFe_2O_4 nanopartikülleri dağıtılmıştır. Farklı debilerde ve u tipi bir ısı alıcıda gerçekleştirilen deneylerde nanoakışkan sistemi suya göre %0,05 konsantrasyonda ve 3 l/dk debide maksimum %22 daha verimli hale getirmiştir (Dehaj et al. 2021). Plakalı bir ısı değiştiricinin performansının artırılması amacıyla Fe_2O_3 ve Fe_3O_4 /su nanoakışkanları hazırlanarak farklı Reynolds sayılarında deneyler yapılmıştır. Fe_3O_4 /su nanoakışkanı diğer nanoakışkandan daha iyi bir termal performans sergilemiştir. %1 konsantrasyon için yapılan deneylerde Fe_3O_4 /su nanoakışkanının ısı transfer katsayısı diğerinden %19,2 fazla olmuştur. Ayrıca, ısı transfer hızı da %19 daha yüksek değer almıştır (Aytaç 2022). Ma et al. (2022) tarafından nanoakışkanların kaynama ısı transfer özelliklerinin araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, grafen + Fe_3O_4 + Al_2O_3 /di-iyonize su ve grafen + Fe_3O_4 + SiO_2 /di-iyonize su nanoakışkanları kullanılmıştır. Bu nanoakışkanların kritik ısı akıları baz akışkana göre, grafen + Fe_3O_4 + Al_2O_3 /di-iyonize su için %60,61 ve grafen + Fe_3O_4 + SiO_2 /di-iyonize su için %65,12 daha yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir.

Ortalama 13 nm çapa sahip Fe_3O_4 nanopartiküllerinin su içerisine dağıtılmasıyla elde edilen nanoakışkanın termal iletkenliği ve viskozitesinin değerlendirilmesi Sundar et al. (2013) tarafından yapılmıştır. Partiküllerin Brownian hareketi sebebiyle nanoakışkanların yüksek konsantrasyonlarda yüksek termal iletkenliğe sahip olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, hacimce %2 konsantrasyonda ve 60 °C sıcaklıkta, baz akışkana göre %48 daha yüksek termal iletkenliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, Al_2O_3 + Fe_2O_3 (25:75)/etilen glikol + su (50:50) hibrit nanoakışkanı kullanılmıştır. Farklı nanopartikül konsantrasyonları (%0,25 – 0,75) ve sıcaklık değerleri kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, baz akışkana nanopartikül eklenmesinin viskoziteyi yaklaşık 1,4 kat arttırdığı tespit edilmiştir (Giwa et al. 2021). Nanoakışkanların ısı verimliliğinin belirlenmesi amacıyla Fe_3O_4 + MWCNTs/etil glikol nanoakışkanlarının viskozite ölçümleri yapılmış, ayrıca Newton tipi ve Newton tipi olmayan akışkan davranışları incelenmiştir. 6 farklı hacim konsantrasyonunda (0,1, 0,25, 0,8, 1,25 ve 1,8%) nanoakışkan numuneleri üzerinde yapılan deneylerde %0,1 – 0,8 arası konsantrasyonlarda akışkanın Newtonien davranış sergilediği, daha yüksek konsantrasyonlarda ise non-Newtonien davranış sergilediği gösterilmiştir (Nadooshan et al. 2018).

2.2.4.1. Manyetik alanın ferroakışkanlar üzerindeki etkileri

Manyetik nanoakışkanlar üzerine manyetik alan uygulanmasının nanoakışkanın termal performansı ve termofiziksel özellikleri üzerine, parçacıkların manyetik alan ile birlikte çeşitli etkileşimlere girmeleri sebebiyle olumlu etkiler oluşturmaktadır. Bu sebeple birçok araştırmacının ilgisini çekmekte ve çeşitli parametreler kullanılarak, bu konuda deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Makine yağı içerisine Fe_3O_4 nanopartikülleri eklenerek elde edilen nanoakışkanın termal iletkenliği üzerine manyetik alan etkisinin incelendiği bir çalışma Nkurikiyimfura et al. (2013b) tarafından gerçekleştirilmiştir. Sıvı içerisindeki nanopartiküllerin manyetik alan etkisi ile zincir şeklinde kümeler oluşturmaları manyetik alan boyunca termal iletkenliğin önemli ölçüde arttığı vurgulanmıştır. Deneysel bir çalışma da Wang et al. (2018) tarafından yapılmıştır. Fe_3O_4 /silikon yağı ve FeZrB /silikon yağı nanoakışkanlarının manyetik alana maruz kaldıklarında termofiziksel özelliklerinin değişimi incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. FeZrB nanopartiküllerine sahip nanoakışkanlar, Fe_3O_4 olana göre hem termal iletkenlik hem de viskozite açısından daha yüksek değerler sergilemişlerdir. Hacimce %2 konsantrasyonda FeZrB /silikon yağı nanoakışkanının termal iletkenliği manyetik alan altında %34'e kadar artış göstermektedir. Fe_3O_4 /silikon yağı ise %10 gibi bir artış göstermiştir. Ek olarak, FeZrB /silikon yağı nanoakışkanının viskozitesinin manyetik alan altında çok daha yüksek olduğu ve sıcaklıkla değişiminin fazla olduğu belirtilmiştir. Altan et al. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiş ve Fe_3O_4 /su nanoakışkanının termal iletkenliğinin manyetik alan uygulaması ile arttırılabildiği gösterilmiştir. Hacimce %5 ve ortalama 10 nm çapa sahip nanopartiküller kullanılarak hazırlanan Fe_3O_4 /su nanoakışkanı üzerine 1.000 G'luk bir manyetik alan uygulanmasının nanoakışkanın ısı iletkenliğini %200 arttırılabildiği Gavili et al. (2012) tarafından belirtilmiştir. Bir başka çalışmada NiFe_2O_3 /gazyağı nanoakışkanının termal iletkenliğinin %10 konsantrasyonda, 0,07 T şiddetine sahip bir manyetik alanla birlikte %170 artabildiği gösterilmiştir (Arana et al. 2017). Fe_2O_3 /dekanol nanoakışkanının ısı iletkenliğinin ölçüldüğü, manyetik alan şiddetinin ve konsantrasyonun bunun üzerindeki etkisinin tartışıldığı bir çalışmada, 1.120 G'luk üniform bir manyetik alan şartlarında, hacimce %0,05'lik nanoakışkanın termal iletkenliğinin %34 arttığı tespit edilmiştir (Nagvenkar et al. 2018).

Fe_3O_4 /su manyetik nanoakışkanı kullanılarak çeşitli faktörlerin nanoakışkanın viskozitesine etkisinin incelendiği bir çalışma Malekzadeh et al. (2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın, partikül konsantrasyonunun ve manyetik alan şiddetinin viskozite üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Bu çalışma sonucunda araştırmacılar, manyetik alan şiddeti ve konsantrasyonla birlikte viskozitenin arttığını, sıcaklıkla birlikte ise düştüğünü bildirmişlerdir. Fe_3O_4 nanopartiküllerinin suya dağıtılmasıyla elde edilen nanoakışkanın termal iletkenliğine manyetik alanın etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, hacimce %6,3 konsantrasyonda, termal iletkenliğin 4 kat arttığı bildirilmiştir. Bu çalışmada, nanoakışkan üzerine manyetik alan uygulanması, nanopartiküllerin sıra sıra zincir benzeri bir yapı şeklinde dizilmelerine yol açtığı ve bu nedenle Brownien hareketinin açık bir şekilde kısıtlandığı belirtilmiştir. Şekil 2.8’de, manyetik alan etkisi olduğunda ve olmadığında sıvı içerisindeki nanopartiküllerin hareket ve davranışları sunulmuştur (Philip et al. 2007).



Şekil 2.8. Manyetik alan etkisi altında akışkan içerisindeki nanopartiküllerin hareketleri (Philip et al. 2007).

Li et al. (2005) tarafından Fe /su nanoakışkan numunelerinin üzerine uygulanan manyetik alanın şiddeti ve yönüyle, nanoakışkanın termofiziksel özelliklerindeki değişim gözlemlenmiştir. Manyetik alan şiddetinin artmasıyla viskozitenin arttığı belirtilmiş ve ayrıca yüksek parçacık oranına sahip nanoakışkanlarda bu etkinin daha belirgin olduğu gösterilmiştir. Dahası, manyetik alan akışa dik uygulandığında termal iletkenlikte değişim gözlenememiş, paralel olduğunda açık bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Manyetik alanın akışa dik olması viskoziteyi oldukça fazla arttırdığı da yazarlar

tarafından belirtilmiştir. Benzer bir çalışma Shima and Philip (2011) tarafından farklı oranlara sahip Fe_3O_4 /gazyağı nanoakışkanı ile yapılmıştır. Akış yönüne dik uygulanan manyetik alanın nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerinde etkisinin çok olmadığı, paralel uygulandığında ise oldukça arttırdığı belirlenmiştir. Yine, Fe_3O_4 /gazyağı nanoakışkanı kullanılarak Parekh and Lee (2010) tarafından deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. %4,7 hacimsel oranda, nanoakışkana enine manyetik alan uygulamanın ısı iletkenliği neredeyse %30 arttırdığı belirtilmiştir. Bir başka çalışmada, 160 G manyetik alan şiddetinde ve ayrıca, manyetik alan ve ısı akısının paralel olduğu durum için Fe_3O_4 /gazyağı nanoakışkanının termal iletkenliği %127 oranında bir artış göstermiştir (Vinod and Philip 2018). Manyetik alan uygulanma yönünün nanoakışkan termal iletkenliğine etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada, ısı akısı yönüne paralel uygulanan manyetik alan termal iletkenliği 5 kat arttırırken, dik uygulandığında aynı şartlarda 2 kat arttırabildiği bildirilmiştir (Ortiz-Salazar et al. 2018).

Karamallah et al. (2016) manyetik alan uygulamasının nanoakışkan termal performansına etkilerini incelemiştir. Farklı oranlarda hazırlanan Fe_3O_4 /su nanoakışkanı kullanılan deneysel çalışmada, manyetik alanın yüksek konsantrasyona ve düşük Reynolds sayılarına sahip nanoakışkanların ısı transferini daha çok arttırdığı, ancak bununla birlikte sürtünme faktörünün de arttığını gözlemlemiştir. Bir başka çalışmada, düz bir plaka üzerinde ferroakışkanların sergiledikleri akış ve ısı transfer karakteristiklerinin araştırılmış ve bu çalışmada, üç farklı (Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 , $\text{Mn-ZnFe}_2\text{O}_4$) manyetik nanopartikül ve iki farklı (gazyağı (kerosen) ve su) baz akışkan kullanılmıştır. Bu çalışmada, manyetik alanın hem yüzey sürtünmesini hem de ısı transfer hızını arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca gazyağı bazlı nanoakışkanlar, su bazlı nanoakışkanlara göre daha yüksek ısı transfer oranına sahip olmaktadır. Fe_3O_4 /gazyağı nanoakışkanı gazyağı bazlı diğer nanoakışkanlardan ısı transferi açısından daha üstün performans sergilemiştir (Khan et al. 2015). $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /su + etilen glikol (80:20) nanoakışkanı ile gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada, uygulanan manyetik alanın taşınım ısı transfer katsayısına etkisi incelenmiştir. Kütleli oranı %0,2 olan nanoakışkan numunesi için, 750 G'luk bir manyetik alan uygulanmasının ısı transfer katsayısını %2,64 arttırdığı gözlemlenmiştir (Lee et al. 2021). Fe_3O_4 + CNT (karbon nanotüpler) / su hibrit nanoakışkanı ile gerçekleştirilen deneysel çalışmada manyetik alan uygulamasının nanoakışkanın ısı transfer performansına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada stabil bir

süspansiyon elde edebilmek için, Fe_3O_4 nanopartikülleri tetrametilamonyum hidroksit (TMAH) ile kaplanmış ve CNT ise Gum arabic (GA) ile kaplanmıştır. Laminer akış şartlarında yapılan deneylerde farklı hacimsel oranlar (Fe_3O_4 için %0,5 – 0,9 ve CNT için %0,25 – 1,35), farklı Reynolds sayıları (548 – 2.190) ve farklı manyetik alan şiddeti (300 – 700 G) değişken deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Manyetik alanın ısı transferine etkisinin yüksek hacimsel oranlarda ve düşük Reynolds sayılarında daha belirgin olduğu bildirilmiştir. Manyetik alanlı ve alansız durum karşılaştırıldığında Nusselt sayısındaki maksimum artış %20,5 olarak, hacimce %0,5 Fe_3O_4 ve %1,35 CNT içeren hibrit nanoakışkanı için 548 Re sayısında elde edilmiştir (Shahsavari et al. 2016). Ağırlıkça %1 ve %2 oranlarda hazırlanan Fe_3O_4 /deiyonize su nanoakışkalarının termal karakteristikleri üzerinde manyetik alanın etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, akışın sağlandığı tüp çevresine manyetik alan oluşturmaları için 4 adet elektro mıknatıs yerleştirilmiştir. 4 farklı konumda ve farklı manyetik alan şiddetinde (100 G, 200 G) gerçekleştirilen deneylerde, ısı transfer kat sayısını tüp girişine yakın bölgede ve mıknatısların birbiri arasındaki mesafe az olduğu durumda en yüksek olduğu belirlenmiştir. Düşük akışkan hızlarında ve yüksek oranlarda manyetik alan etkisinin daha belirgin olduğu yazarlar tarafından vurgulanmıştır (Amani et al. 2017a).

Sha et al. (2017) tarafından türbülanslı akış şartlarında, manyetik alan etkisi altında Fe_3O_4 /su nanoakışkanının ısı transfer davranışlarının incelendiği bir çalışma yapılmıştır. Manyetik alan olmadığı ve 800 G’luk bir manyetik alan etkisi altında yapılan analizler karşılaştırıldığında manyetik alanın konvektif ısı transfer katsayısını %4,2 oranında arttırdığı gözlemlenmiştir. Sabit ve alternatif manyetik alan şartları altında su bazlı Fe_3O_4 nanoakışkanının konvektif ısı transfer karakteristiğinin incelendiği deneysel bir araştırma yapılmıştır. Bu araştırmanın sonuçlarına göre, 1.200 Reynolds sayısı değerinde ve manyetik alan olmadığı durumda, nanoakışkan deiyonize suya göre konvektif ısı transferini %13,5 oranında iyileştirmiştir. 500 Gauss’luk sabit ve alternatif manyetik alan uygulandığı durumlarda bu oran sırasıyla %18,9 ve %31,4 değerlerine ulaştığı rapor edilmiştir (Goharkhah et al. 2015). Dikdörtgen bir akış kanalında Fe_3O_4 /su manyetik nanoakışkanı üzerinde manyetik alanın etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, 0 mT – 500 mT aralığında değişken manyetik alan şiddeti uygulanmıştır. 780 Re sayısı ile yapılan deneylerde ısı transfer hızının manyetik alan ile %20’ye kadar iyileşme gösterdiği rapor edilmiştir (Motozawa et al. 2010). Fe_3O_4 nanopatiküllerinin suya farklı oranlarda

dağıtılması ile elde edilen manyetik nanoakışkan ile gerçekleştirilen deneylerde tetrametil amonyum hidroksit yüzey dağıtıcı olarak kullanılmıştır. Alternatif manyetik alan etkisinin düşük oranlarda (hacimce %0,6) görülmediği ve düşük Reynolds sayılarında etkisinin daha belirgin olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir (Ghofrani et al. 2013). Bir başka çalışmada, manyetik alanın Fe_3O_4 /su nanoakışkanının yerel ısı transfer katsayısına etkisi incelenmiştir. Dikey konumlandırılmış ısı borusu kullanılan araştırmada, manyetik alan oluşturan mıknatıslar farklı konumlara yerleştirilerek bu sistem için, ısı transfer performansı açısından uygun konum belirlenmeye çalışılmıştır. Yerel ısı transfer katsayısındaki maksimum artış 580 Reynolds sayısında ve mıknatısların çıkış bölgesine konumlandırıldığı durum için %48,9 olarak elde edilmiştir (Zonouzi et al. 2018). Benzer bir çalışma Lajvardi et al. (2010) tarafından gerçekleştirilmiştir. Fe_3O_4 /su nanoakışkanı üzerine uygulanan manyetik alanla birlikte ısı transfer katsayısında önemli bir artış elde edilmiştir.

Farklı oranlarda etil glikol + su karışımı baz sıvıya Fe_3O_4 nanopartikülleri dağıtılarak elde edilen nanoakışkanların manyetik alan etkisi altında ısı transferi performanslarının incelendiği çalışmada manyetik alanın ısı transfer katsayısını önemli ölçüde arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca su bazlı nanoakışkanlar için bu oran etil glikole göre çok daha belirgin hal almıştır. Baz akışkanda etil glikol oranının artmasıyla manyetik alan etkisiyle oluşan ısı transfer katsayısındaki artış miktarının azaldığı gösterilmiştir (Esmaeili et al. 2017). CPU'ların etkili bir şekilde soğutulması üzerinde nanoakışkan ve Fe_3O_4 /su nanoakışkanı üzerine manyetik alan etkisinin incelendiği bir çalışma Qi et al. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, farklı manyetik alan yoğunlukları (0,005, 0,01 ve 0,015 T), farklı nanopartikül oranları (ağırlıkça %0,1 – 0,5) ve farklı Reynolds sayıları (712 – 1.400) kullanılmıştır. Deneyler sonucunda manyetik alan yoğunluğunun artmasıyla CPU yüzey sıcaklığının azaldığı ve ayrıca manyetik alan olmadığı duruma göre %23,6 daha fazla soğuma sağlanabildiği gösterilmiştir. Titreşen bir ısı borusunda çok düşük oranlarda (hacimce 9×10^{-5} , 27×10^{-4} ve 45×10^{-4}) Fe_3O_4 /su nanoakışkanının manyetik alan altındaki ısı transfer davranışı incelenmiştir. Tüm deney şartlarında uygulanan sabit ısı akısının artmasıyla termal direncin azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca nanoakışkan kullanımının termal performansı arttırdığı ve manyetik alan uygulanmasının da ekstra bir iyileşme sağladığı ortaya konmuştur (Kang et al. 2017). Yatay bir boruda laminar akış rejimi şartlarında Fe_3O_4 /su nanoakışkanının manyetik alan

2. KAYNAK ÖZETLERİ

altındaki zorlanmış taşınım ile ısı transferi performansının incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Taşınım ısı transferinin nanoakışkan kullanımı ile arttığı ancak bu nanoakışkana manyetik alan uygulanması halinde azaldığı belirlenmiştir (Hatami et al. 2017). Üniform bir manyetik alan ve laminar akış koşulları altında paralel plakalı bir kanal içinde Al_2O_3 /su nanoakışkanının konvektif ısı transferi üzerinde yapılan teorik bir araştırmada, manyetik alan varlığında, duvarlara yakın bölgelerde hız gradyanının artmasıyla birlikte ısı transfer miktarının ve basınç düşümünün arttığı belirlenmiştir (Malvandi ve Ganji 2014). Yukarıdaki paragraflarda manyetik alanın nanoakışkanın termal davranışlarına etkilerinin tartışıldığı bazı çalışmalar ve sonuçları özetlenmiştir. Bütün bunlara ek olarak, Çizelge 2.8’de ferroakışkanlara manyetik alan uygulanmasının etkisi üzerine bir literatür özeti sunulmuştur.

Çizelge 2.8. Manyetik nanoakışkanlara manyetik alan uygulanması üzerine literatür özeti

Araştırmacılar	Nanoakışkan	Nanoparçacık oranı (%)	Manyetik alan Şiddeti ve Frekansları	Sonuçlar
Alsarraf et al. (2019)	Fe_3O_4 + CNT / su	0,5 – 0,9 $_{Fe_3O_4}$ ve 0 – 1,35 $_{CNT}$	1.000 G	Elde edilen sonuçlara göre, manyetik alanın ısı transferi üzerindeki olumlu etkisi nanoparçacık oranının ve manyetik alan şiddetinin artması ve Reynolds sayısının azalmasıyla daha belirgin bir hal almaktadır.
Amani et al. (2017b)	$MnFe_2O_4$ / su	0,25 – 3	100 – 400 G	Manyetik alan koşullarında, parçacık oranının artmasıyla nanoakışkanın termal iletkenliğinin arttığı, ancak sıcaklıkla manyetik alan arasında bir ters ilişki olup sıcaklığın artmasıyla manyetik alanın termal iletkenlik üzerindeki etkisinin azaldığı bildirilmiştir.
Ashjaee et al. (2015)	Fe_3O_4 / su	0,5 – 3	200 – 1.200 G	%3 hacimsel orana sahip nanoakışkana 1.200 G’luk manyetik alan uygulandığında 300 Re sayısı için, saf suya göre konvektif ısı transfer katsayısı %38 oranında daha yüksek elde edilmiştir.
Aydın et al. (2023)	$NiFe_2O_4$ / su	3*	0,2 mT	Isı borularında nanoakışkan ve manyetik alan uygulanması ile ısı borusunun veriminin arttığı, termal direncin azaldığı ve ısı transfer katsayısında kayda değer bir artış olduğu belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Çizelge 2.8. (devam)

Kharat et al. (2019)	NiFe ₂ O ₄ / su	0,2 – 1	10 – 150 G	Nanoparçacık oranının ve manyetik alan yoğunluğunun artmasıyla nanoakışkanın termal iletkenliğinin önemli ölçüde yükseldiği gösterilmiştir. Maksimum termal iletkenlik değeri 150 G ve %1 hacimsel oranda 0,86 W/mK olarak elde edilmiştir.
Lajvardi et al. (2010)	Fe ₃ O ₄ / su	2,5 ve 5	800, 1.000 ve 1.200 G	Manyetik nanopartikül ve uygulanan manyetik alan şiddetinin artırılmasıyla ısı transfer katsayısında önemli bir artış elde edilebileceği gösterilmiştir.
Sun et al. (2020)	Fe ₃ O ₄ / su	0,1, 0,5 ve 0,9	300 – 700 G	Uygulanan manyetik alan şiddetinin artmasıyla birlikte Nusselt sayısında ve konvektif ısı transferinde önemli iyileşmeler olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte manyetik alanın akış içerisinde oluşturduğu bozukluklar sebebiyle basınç düşüşü de arttığı bildirilmiştir.
Tekir et al. (2022)	Fe ₃ O ₄ + Cu / su	0,5 – 2	0,3 T 2, 5 ve 15 Hz	Alternatif manyetik alanın farklı dalga tiplerinde hibrit nanoakışkanın ısı transferi performansını farklı oranda etkilediği belirlenmiştir. Kare ve üçgen dalga türleri için 15 Hz’de en yüksek performans artışı görülürken, sinüs dalga türü için 5 Hz’de görülmektedir. Ayrıca, nanoakışkanda Fe ₃ O ₄ nanoparçacık oranının artması alternatif manyetik alanın etkisinin daha belirgin oldu belirtilmiştir.
Zhang and Zhang (2021)	Fe ₃ O ₄ / su	1, 3 ve 5	0,05 T 0 – 100 Hz	Elde edilen bulgular, ısı transfer katsayısı üzerinde alternatif manyetik alanın, manyetik alan olmayan ve sabit manyetik alan olan durumlardan daha iyi etki ettiğini göstermiştir. Ayrıca hacimce %1 ve %3 oranlar olduğunda, alternatif frekansın artması ısı transfer performansı üzerinde pozitif etki yarattığı gözlemlenmiştir. Ancak %3’ten fazla orandaki nanoakışkanlarda bu frekans artışının etkisinin oldukça az olduğu saptanmıştır.

Çizelge 2.8. (devam)

Ebrahimi and Saghravani (2017)	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CuO}$ / su	3, 5 ve 7	0,1 ve 0,2 T	Nanoakışkanın termal iletkenliği harici bir manyetik alan uygulanarak önemli ölçüde arttırılmıştır. Ayrıca parçacık oranının artmasıyla manyetik alanın termal iletkenlik üzerindeki etkisi belirgin hale gelmektedir. Ayrıca manyetik alan uygulanma süresi ile nanoakışkanın termal iletkenliğinin, parçacıkların oluşturduğu zincir yapılarının zamanla genişlemesiyle değiştiği belirtilmiştir.
Zhang et al. (2022)	Fe_3O_4 / su	0,5 – 2	100 – 1.000 G	Çalışmanın sonucunda nanoakışkanın konvektif ısı transfer katsayısı, manyetik alan olmadığı duruma göre 1.000 G'luk alan altında %5,33'lük bir artış tespit edilmiştir. Ayrıca, manyetik alan olmadan nanoakışkanın baz akışkana göre ısı transfer katsayısının maksimum %15,87 arttığı görülmüştür.
Tang et al. (2021)	Fe_3O_4 / su	0,1 – 0,5	0,005, 0,01 ve 0,015 T	CPU sistemlerinin soğutulması için gerçekleştirilmiş ve manyetik alan açısının etkisi incelenmiştir. 60° açı ile manyetik alan uygulandığında maksimum performans elde edilmiştir. Bu durum ile manyetik alan olmadığı durum karşılaştırıldığında, CPU sıcaklığında %34,42 daha düşük değer almıştır. 0° manyetik alan ile karşılaştırıldığında ise %14,96 daha düşük sıcaklık elde edilmiştir.
Karimi et al. (2014)	Fe_3O_4 / su ve CoFe_2O_4 / su	0,5 – 4,8	0 – 500 G	Manyetik nanoakışkanların ısı iletkenliklerine, sıcaklığın, parçacık oranının ve manyetik alan yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, manyetik alan yoğunluğunun artmasıyla nanoakışkanların termal iletkenliklerinin arttığı, ancak belirli bir yoğunluktan sonra maksimum değerine ulaşarak sabit kaldığı belirlenmiştir. Partikül oranının artmasıyla bu maksimum noktaya ulaşması daha düşük manyetik alan yoğunluklarında gerçekleştiği gösterilmiştir.

Çizelge 2.8. (devam)

Yarahmadi et al. (2015)	Fe_3O_4 / su	1,25 – 5	700 G 10 – 50 Hz	Alternatif ve sabit manyetik alan uygulamanın nanoakışkanın konvektif ısı transfer katsayısına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, manyetik alan oluşturan mıknatısların akış kanalına göre konumları da incelenmiştir. Sabit manyetik alanın manyetik alan olmadığı duruma göre ısı transfer katsayısını düşürdüğü, fakat alternatif manyetik alanın arttırdığı bildirilmiştir. Isı transfer katsayısındaki maksimum artış %5 hacimsel oranda %19,8 olarak elde edilmiştir.
-------------------------	------------------------------	----------	---------------------	---

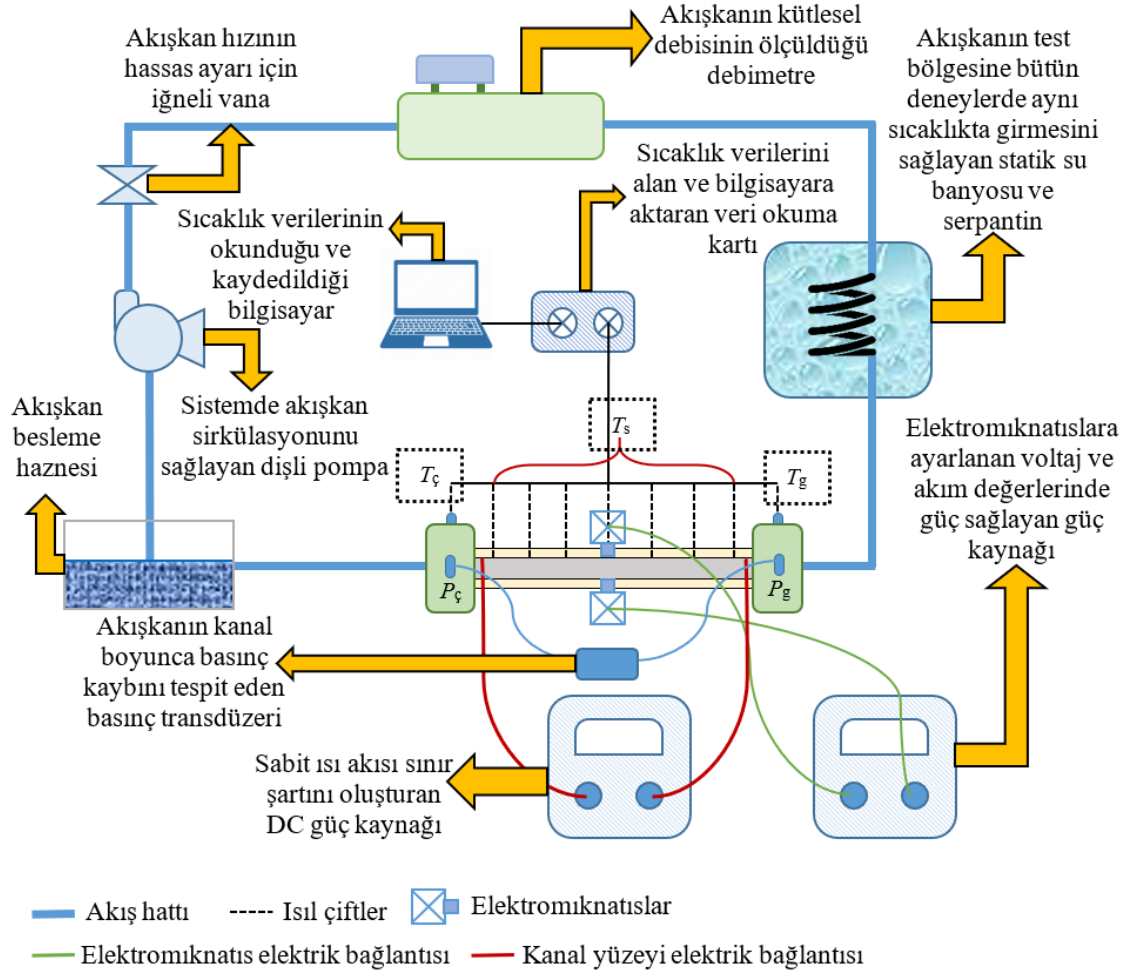
*Konsantrasyonun ağırlıkça olduğunu belirtmektedir. Diğerlerinin tamamı hacimce konsantrasyon cinsindendir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

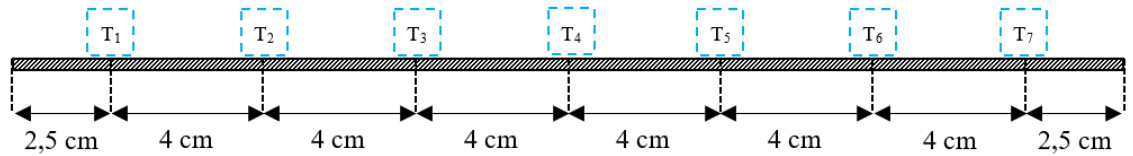
Bu çalışmada manyetik nanopartiküllerin iki adımlı metot uygulanarak, farklı hacimsel oranlarda saf su içerisine süspanse edilmesiyle elde edilen ferroakışkanların minikanalda ve manyetik alan etkisi altındaki ısı transferi ve basınç düşüşü karakteristikleri incelenmiştir. Belirlenen oranlarda nanoakışkanlar elde etmek için gerekli kütle hesapları yapılmış ve nanopartiküller saf su içerisine karıştırılmıştır. Nanopartikül topaklanmalarını kırmak, homojen bir karışım elde etmek ve hazırlanan nanoakışkanların daha uzun süre stabil kalması için, süspansiyon 3 saat boyunca ultrasonikasyona maruz bırakılmıştır.

Değerlendirmelerin yapıldığı deney sisteminin şematik görüntüsü ve sistemde bulunan cihazların görevleri Şekil 3.1’de sunulmuştur. Ayrıca minikanal yüzeyinden sıcaklık ölçümlerinin alındığı ısıl çiftlerin konumları da Şekil 3.2’de verilmektedir. Bu çalışmada, 1,85 mm iç çapa ve 2,55 mm dış çapa sahip dairesel alüminyum bir mini kanal kullanılmıştır. Ayrıca kanalın uzunluğu ise 29 cm’dir. Isı kayıplarını minimize etmek için kanal yüzeyi cam yünü ile yalıtılmıştır. Sabit ısı akısı sınır şartı, güç kaynağının doğrudan minikanala bağlanmasıyla verilen elektrik enerjisi sayesinde elde edilmiştir. Dış yüzeyindeki yalıtımın termal direnç oluşturacağı için herhangi bir direnç teli kullanılması uygun görülmemiştir. Bu uygulamanın literatürde de örnekleri bulunmaktadır (Guzei et al. 2019; Mehrali et al. 2017).

Manyetik alan etkisi vida çevresine sarılan bobin teline elektriksel gerilim uygulanarak elde edilmiştir. Uygulanan elektrik geriliminin değiştirilmesiyle manyetik alan yoğunluğu artırılıp azaltılabilmektedir. Bu çalışmada 22, 30 38 mT doğru akım manyetik alan ve 50 Hz frekansta 3 ve 5 mT alternatif akım manyetik alan etkileri çalışılmıştır. Üretilen elektromıknatıslar kanala temas edecek şekilde tam orta kısma karşılıklı olarak yerleştirilmiştir. Manyetik alan yoğunlukları deneylerden önce bir tesla metre kullanılarak ölçülmüş ve istenilen yoğunluklarda manyetik alan oluşturmak için gerekli olan akım ve gerilim değerleri belirlenmiştir. AC ve DC olarak iki farklı manyetik alan oluşturmak için deneylerde iki farklı güç kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Deney sisteminin şematik görüntüsü ve kullanılan ekipmanların görevleri

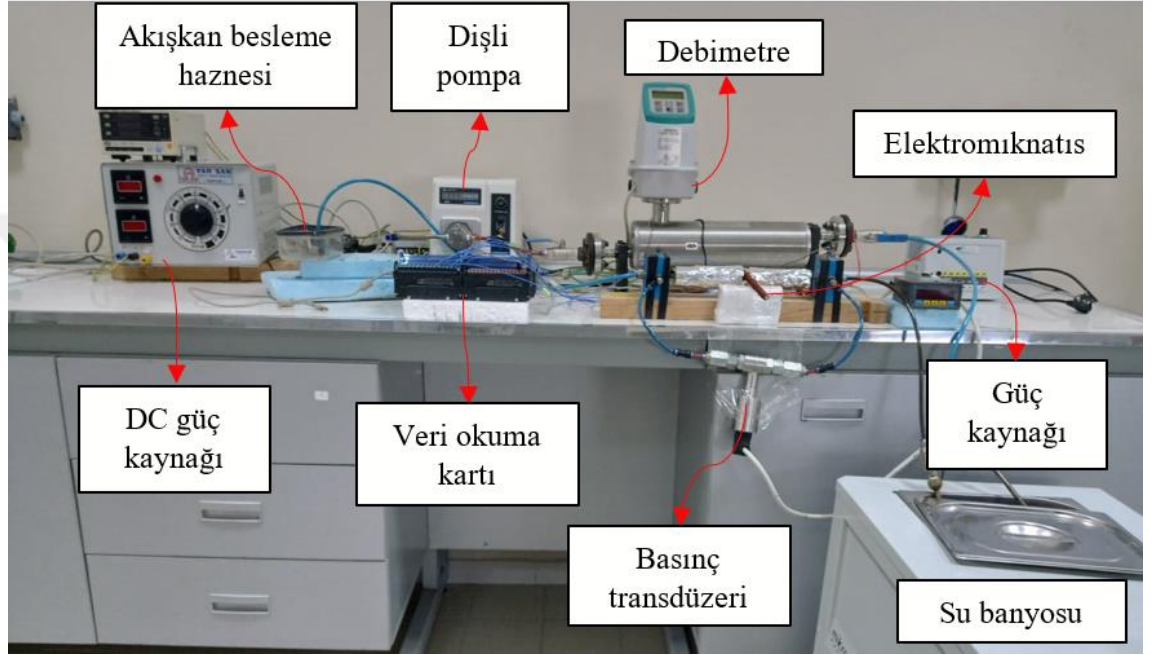


Şekil 3.2. Kanal yüzeyine yerleştirilen ısıl çiftlerin konumları

Bu çalışmada kullanılan deney sistemi, akışkan besleme haznesinde bulunan çalışma akışkanının dişli bir pompa ile sistemde sirküle edilmesi ile çalışmaktadır. Deney sisteminin görüntüsü ve kullanılan ekipmanlar Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Dişli pompanın hemen çıkışına düşük akışkan debilerini elde etmek için iğneli vana yerleştirilmiştir. Bu sayede akışkan debisi daha hassas olarak ayarlanabilmektedir. İstenilen debi değeri sistemdeki debimetre aracılığıyla okunmaktadır. Akışkanın test bölgesine yapılan her deneyde aynı sıcaklıkta girmesi, aynı şartları sağlamak ve daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek için önemlidir. Bu sebeple, kurulan sistemde bir su banyosu kullanılmış ve

3. MATERYAL ve YÖNTEM

içerisine yerleştirilen serpantin tipi ısı değıştirici ile akışkanın deneyler boyunca test bölgesine aynı sıcaklıkta girmesi sağlanmıştır. Kanal giriş ve çıkışına yerleştirilen ısı çiftleri ile akışkanın test bölgesine giriş ve çıkış sıcaklık değeri ölçülmüştür. Benzer şekilde basınç farkı da kanalın giriş ve çıkış bölgesine konumlandırılan bir basınç transdüzeri ile tespit edilmiştir. Yapılan ölçümler veri okuma kartı ile dijital ortama aktarılmakta ve değlendirmeler bu sayede yapılmaktadır.



Şekil 3.3. Deney sistemi ve kullanılan cihazlar

3.1. Deneysel Materyaller

Bu bölümde nanoakışkanların hazırlanmasında ve deneylerin yapılmasında kullanılan materyaller sunulmaktadır.

3.1.1. Hassas terazi

Belirli oranlarda nanoakışkanlar hazırlamak için partiküllerin kütle hesabı yapılmış ve bu hesap sonucunda elde edilen kütle değeri baz akışkana nanopartikül karıştırabilmek için hassas terazi kullanılarak minimum hata ile ölçümleri yapılmıştır. Kullanılan hassas terazi Şekil 3.4.'de gösterilmiştir. Axis marka bu terazi maksimum 200

g kapasiteye ve 0,0001 g çözünürlüğe sahiptir. Terazı çevresının muhafazalı olması dış etkilerden korunmasına ve çok daha hassas ölçüm yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.4. Hassas terazi (Anonim 2023b)

3.1.2. Ultrasonik homojenizatör

Deneylerde kullanılan nanoakışkanlar, iki adımlı hazırlama metodu ile hazırlanmıştır. Hassas terazi ile ölçülerek istenilen ağırlık değerlerinde ayarlanan nanopartiküller baz akışkan ile karıştırıldıktan sonra ultrasonikasyona tabi tutulmuşlardır. Nanopartiküllerin baz akışkan içerisine homojen bir şekilde dağıtılması ve kararlılığını daha uzun süre muhafaza edebilmeleri için aşağıdaki Şekil 3.5.'te verilen Hielscher marka UP400S model ultrasonik homojenizatör kullanılmıştır. Bahsedilen bu cihaz 400 W ve 24 kHz frekans ile çalışmaktadır ve saatte 10 – 50 litre hacimdeki akışkanları sonikasyon işlemine tabi tutabilir. Ayrıca, sonikasyon işlemi sırasında akışkanın sıcaklığının artarak buharlaşmanın olmaması ve bu sebeple belirlenen partikül – akışkan oranının bozulmasını önlemek için sisteme entegre bir soğutma hattı kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Hielscher marka ultrasonik homojenizatör (Anonymous 2023a)

3.1.3. Isıl iletkenlik ölçer

Deneylerde kullanılmak üzere hazırlanan nanoakışkanların ısı iletkenlik değerleri Şekil 3.6’da fotoğrafı verilen LINSEIS marka THB-100 model ısı iletkenlik ölçer kullanılarak belirlenmiştir. Cihaz tarafından ölçülen ısı iletkenlik değerleri bilgisayar ortamına cihazın kendi yazılımı kullanılarak aktarılmıştır. Bahsedilen cihaz, ısı iletkenlik ölçüm metotlarından geçici ısı köprüler (transient hot bridge) yöntemi kullanarak çeşitli sıvı, katı ve tozların ısı iletkenliklerini tespit edebilmektedir. Ek olarak, bu yöntemin detayları Tawfik (2017) tarafından gerçekleştirilen bir inceleme çalışmasında anlatılmaktadır.



Şekil 3.6. THB-100 ısı iletkenlik ölçer (Anonymous 2023b)

3.1.4. Viskozimetre

Nanoakışkanların dinamik viskozite değerlerinin ölçülmesinde Şekil 3.7’de sunulan A&D Marka SV-10 model vibro viskozimetreden yararlanılmıştır. Bu viskozimetrenin çalışma prensibi, iki adet ince sensör plakasının, viskozite değerleri ölçülecek numune içerisine daldırılmasına ve bu sensörlerin sabit bir frekansta hareket ettirilmesine dayanmaktadır. Sabit frekanstaki bu hareketi sağlamak için gerekli enerji miktarı, numunenin viskozitesi ile doğru orantılıdır. Bu sayede akışkanların viskozite değerleri belirlenebilmektedir. Gerçekleştirilen viskozite ölçümleri neticesinde elde edilen değerler bilgisayar ortamına aktarılmış ve gerekli hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Viskozimetre (Anonymous 2023c)

3.1.5. Dişli pompa

Deneylerde akışkan sirkülasyonu sağlayabilmek için Şekil 3.8’de gösterilen, WT3000-1JB marka mikro dişli pompa kullanılmıştır. Sürekli akışkan transferi ve sabit hız sağlaması nedeniyle, akışkan debisi değerlerinde kararlılık sağlayabilmek için bu çalışmada dişli pompa tercih edilmiştir. Kullanılan dişli pompanın devir aralığı 300 – 3000 rpm’dir. Teknik özellik olarak üretici firma tarafından, sıvı içerisinde 10 µm’nin altındaki boyutlara sahip partiküllerin bulunması pompanın sağlıklı çalışması üzerinde bir etki etmeyeceği belirtilmiştir. Bu sebeple nanoakışkanların deney sistemi içerisindeki sirkülasyonunda bu pompanın kullanılmasının bir sakıncasının olmadığı düşünülmüştür. Pompa tarafından akışkan sabit hız ile sıkıştırıldığı için, düşük Reynolds sayılarının elde edilmesinde pompa çıkışına yerleştirilen iğneli vana kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Mikro dişli pompa (Anonymous 2023d)

3.1.6. Debimetre

Deneylerde akışkanın kütleli debisinin belirlenmesi için Siemens marka Sitrans FC-MASS6000 model kütleli debimetre kullanılmıştır. Şekil 3.9’da verilen bu debimetre içerisinde dönel eleman bulundurmamaktadır. Bu da nanoakışkan çalışmalarında çökelme gibi kararlılığı olumsuz etkileyecek durumların yaşanmamasına olanak sağlamaktadır. Geniş ölçüm aralığına sahip bu debimetre sayesinde düşük akışkan debilerinin ölçüme de yapılabilmektedir. Ayrıca, akışkan debisi, kullanılan debimetrenin dijital ekranı sayesinde kg/h birimi ile anlık olarak okunabilmektedir.

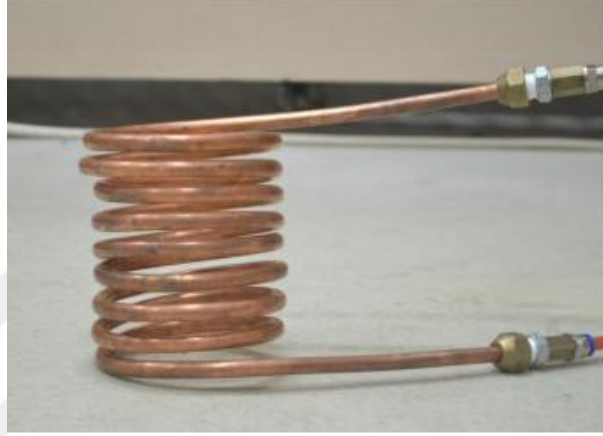


Şekil 3.9. Debimetre (Anonymous 2023e)

3.1.7. Su banyosu ve serpantin

Gerçekleştirilen her deneyde akışkanın test bölgesine aynı sıcaklıkta giriş yapmasını sağlamak için, 2 m uzunluğunda ve 10 mm dış çapında bakır bir borudan imal

edilen serpantin (Şekil 3.10), ısıtma ve soğutma işlemi yapabilen su banyosu içerisine daldırılmıştır. Sabit sıcaklıktaki su banyosu içerisindeki serpantinden akışkanın geçerek belirlenen sıcaklık değerine gelmesi sağlanmıştır. Bu sayede test bölgesine giren akışkanın sıcaklığı bütün deneylerde sabit tutulmuş ve aynı sıcaklık değerinde diğer akışkanlar ile sergilediği termofiziksel özellikler karşılaştırılabilmektedir. Deneylerde 15 lt su kapasitesine sahip Microtest marka MSB-15 model statik su banyosu kullanılmıştır. Bu su banyosunun resmi Şekil 3.11’de sunulmuştur.



Şekil 3.10. Bakır serpantin



Şekil 3.11. Statik su banyosu

3.1.8. Güç kaynakları

Deneylerde üç farklı güç kaynağı kullanılmıştır. Bunlardan ilki Şekil 3.12’de verilen mini kanal üzerine sabit ısı akısı sınır şartı sağlamak için kullanılan manuel kontrollü güç kaynağıdır. Sabit ısı akısı sınır şartının sağlıklı bir şekilde sağlanması ve

3. MATERYAL ve YÖNTEM

doğru değerlerin okunabilmesi için bu güç kaynağına entegre bir güç analizörü kullanılmıştır. Bu güç analizörü sayesinde akım ve voltaj değerleri doğru ve stabil bir biçimde belirlenebilmiştir.



Şekil 3.12. Doğru akım güç kaynağı ve analizörü

Deneylerde kullanılan bir diğer güç kaynağı ise alternatif akım güç kaynağıdır. Bu güç kaynağı sayesinde elektromıknatis ile alternatif manyetik alan üretilmiştir. Voltaj kontrollü ELES marka AC güç kaynağı Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Bu güç kaynağı 50 Hz frekans ve 2 – 14 V aralığında çalışabilmektedir.



Şekil 3.13. Alternatif akım güç kaynağı

Sabit manyetik alan sınır şartı sağlayabilmek için GWinstek marka GPS-4303 model çok kanallı DC güç kaynağı kullanılmıştır. İki farklı mıknatısa ayrı ayrı güç

verildiği için güç kaynağının çok kanallı olması işlemlerin daha kolay gerçekleştirilmesine yardımcı olmuştur. Bu güç kaynağı Şekil 3.14’de sunulmuştur.



Şekil 3.14. Doğru akım güç kaynağı

3.1.9. Elektromıknatıslar

Gerçekleştirilen deneylerde manyetik alan üretmek ve etkisinin incelenmesi için iki elektromıknatıs üretilmiştir. Mıknatıslar, 30 m boyunda ve 0,5 mm çapındaki bobin telinin 18 cm uzunluğunda, dış üstü çapı 6 mm ve dış dibi çapı 5,5 mm olan bir çelik vida etrafına sarılmasıyla oluşturulmuştur. Üretilen elektromıknatıs Şekil 3.15’te gösterilmiştir. Alternatif manyetik sınır şartı deneylerinde mıknatısların sadece bir tanesi kullanılmıştır. Çünkü alternatif manyetik alan partikülleri tamamen çekmemektedir. Belli frekansta çekip bırakmaktadır. Ancak sabit manyetik alan sınır şartında partiküllerin kanalın bir tarafına toplanıp kalmaması için mıknatıslar karşılıklı yerleştirilmiş ve manyetik alan şiddeti eşit tutulmuştur. Bu da manyetik partiküllerin iki farklı yönden manyetik alandan etkilenmesini sağlamış bir tarafa toplanmalarını engellemiştir.



Şekil 3.15. Elektromıknatıs

3.1.10. Basınç transdüzeri ve dijital indikatör

Akış kanalında meydana gelen basınç düşümünün belirlenmesi için Valcom marka basınç transdüzeri kullanılmıştır. Test bölgesinin giriş ve çıkışında bulunan basınç ölçüm noktalarına hortumlar ile bağlantısı yapılmıştır. 4 – 10 mA çıkışa sahip bu cihazdan elde edilen veriler cihazla birlikte temin edilen indikatör ile doğrudan okunabilmektedir. Basınç transdüzeri ve göstergesi Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Basınç transdüzeri ve indikatörü

3.1.11. Veri okuma kartı

Akışkanın kanala giriş-çıkış bölgelerine ve kanal yüzeyine yerleştirilen ısıl çiftler aracılığıyla sıcaklık değerleri anlık olarak ölçülmektedir. Bu ölçümler Hioki marka LR8402-20 model veri okuma kartı sayesinde bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Veri okuma kartı Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Bu veri okuma kartı 30 analog kanala sahiptir ve B, E, J, K, N, R, S, T ve W tiplerindeki ısıl çiftleri tanıma özelliği vardır. Ayrıca 2 telli girişi sayesinde ısıl çiftlerin jack olmadan bağlanmasına olanak tanır. Doğru akım ile çalışan veri okuma kartı ± 100 V gerilim değeri ile çalışabilmektedir.

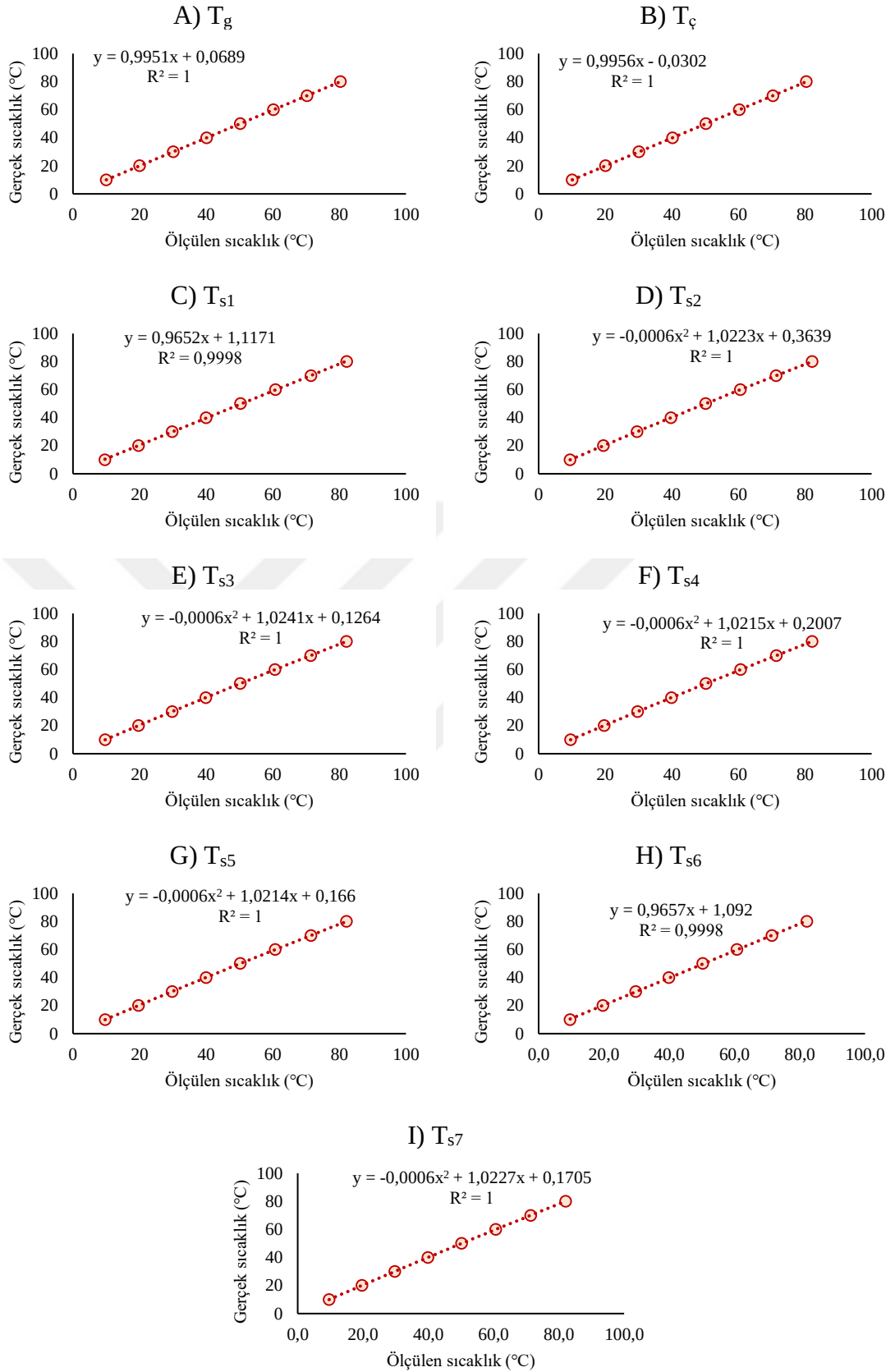


Şekil 3.17. Veri okuma kartı (Anonymous 2023f)

3.1.12. Isıl çiftler

Testlerin gerçekleştirildiği minikanalın yüzeyinin ve akışkanın kanala giriş-çıkış sıcaklıklarının ölçümleri, 9 adet k-tip ısıl çift kullanılmıştır. K-tip ısıl çiftler alaşımlı nikel ve nikel krom metallerinden yapılmış olup $-270 - 1.260$ °C aralığında ölçüm yapabilmektedirler. Bu ısıl çiftler deneylerde kullanılmadan önce su banyosu içerisine daldırılmış ve $10 - 80$ °C aralığında her seferinde 10 °C arttırılarak ölçümler alınmıştır. Su banyosu sıcaklığı gerçek değer kabul edilmiş ve ısıl çiftler tarafından ölçülen değerler ve gerçek sıcaklık değerleri arasında eğri uydurularak kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Deneylerde kullanılan ısıl çiftlerin kalibrasyon eğrileri ve denklemleri Şekil 3.18’de verilmiştir.





Şekil 3.18. Isıl çiftlerin kalibrasyon eğri ve denklemleri

3.2. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi ve Hesaplamalar

Bu bölümde, nanoakışkanları hazırlama prosesinde ve elde edilen deneysel verileri değerlendirmek için yararlanılan eşitlikler ve hesaplama işlemleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

3.2.1. Nanoakışkanların hazırlanması işlemlerinde kullanılan hesaplamalar

Deneyslerde kullanmak için belirlenen %0,5, %1 ve %1,5 hacimsel oranlarda nanoakışkanları hazırlamak ve istenilen oranları elde etmek için, karışımı yapılacak baz akışkanın ve nanopartiküllerin kütlelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bahsedilen kütlelerinin belirlenmesi için aşağıda verilen hesaplamalar yapılmıştır. İlk olarak nanopartiküllerin ve baz akışkanın yoğunluğu bilindiği için Eşitlik 3.1 kullanılarak nanoakışkanın yoğunluğu belirlenmiştir.

$$\varphi = \frac{\rho_{nf} - \rho_{bf}}{\rho_{np} - \rho_{bf}} \quad (3.1)$$

Yukardaki eşitlikten faydalanılarak yoğunluğu bulunan nanoakışkanın kütlesi Eşitlik 3.2.'de verildiği gibi hesaplanır.

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

Nanoakışkanın kütle oranı (C_m) Eşitlik 3.3'te verildiği gibi tanımlanır. Burada nanoakışkanın ve nanopartiküllerin yoğunlukları bilindiği için, belirlenen oranda nanoakışkan hazırlamak için gerekli olan nanopartikül miktarı hesaplanabilir.

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

Ayrıca baz akışkanın kütle ve yoğunluğu sırasıyla Eşitlik 3.4 ve 3.5'te verilen formüller yardımıyla hesaplanır.

$$m_{bf} = m_{nf} - m_{np} \quad (3.4)$$

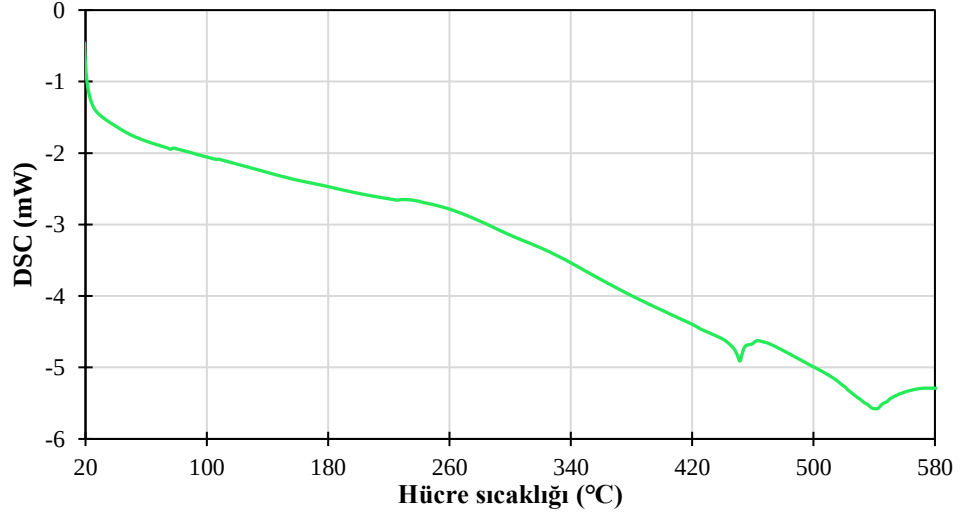
$$\rho_{bf} = \frac{m_{bf}}{V_{bf}} \quad (3.5)$$

Nanopartiküllerin ve baz akışkanın özgül ısı değerleri bilindiği takdirde, hazırlanan nanoakışkanın özgül ısı değeri Eşitlik 3.6'da verildiği gibi hesaplanabilir (Xuan and Roetzel 2000). Literatürde bulunan birçok çalışma tarafından bu sunulan korelasyon kullanılmış ve doğru bir özgül ısı tahmini için kullanımının uygun olduğu belirtilmiştir.

$$Cp_{nf} = \frac{(1 - \varphi)\rho_{bf}Cp_{bf} + \varphi\rho_{np}Cp_{np}}{\varphi\rho_{np} + (1 - \varphi)\rho_{bf}} \quad (3.6)$$

Bu tez çalışmasında kullanılan $NiZnFe_4O_4$ nanopartikülleri ilk defa bir ısı transferi çalışmasında kullanıldığı için, termofiziksel özellikleri literatürde mevcut değildir. Eşitlik 3.6'da belirtildiği gibi hazırlanan nanoakışkanların özgül ısılarını tespit etmek için, nanopartiküllerin özgül ısılarının bilinmesine ihtiyaç olduğundan nanopartiküllerin Cp değerleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile ölçülmüştür. Bu ölçümler, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesinin Temel Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde, SII NANOTECHNOLOGY marka, EXSTAR 7000 model termal analiz cihazı ile yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde elde edilen DSC grafiği Şekil 3.19'da verilmiştir. Bahsi geçen nanopartiküllerin özgül ısı kapasiteleri, Eşitlik 3.7'den faydalanılarak DSC analiz sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre $NiZnFe_4O_4$ nanopartiküllerinin 25 °C'deki özgül ısı kapasiteleri 675 J/kg°C olarak belirlenmiştir.

$$Cp = \frac{\dot{Q}\Delta t}{m\Delta T} \quad (3.7)$$



Şekil 3.19. NiZnFe₄O₄ nanoparçacıklarının sıcaklığa bağlı DSC eğrisi

3.2.2. Isı transferi ve basınç kaybının değerlendirilmesi için gerekli hesaplamalar

Bu tez çalışmasında, yapılan deneylerde sabit ısı akısı sınır şartının sağlanması için, doğru akım güç kaynağı aracılığıyla akış kanalına doğrudan elektrik akımı uygulanmış ve kanalın elektriksel direnci sayesinde sıcaklığının artması sağlanmıştır. Güç kaynağından uygulanan elektriksel güç Eşitlik 3.8’de verildiği gibi akım ve gerilim değerlerinin çarpımı ile elde edilir.

$$\dot{Q}_{\text{toplam}} = IV \quad (3.8)$$

Aynı zamanda bu sisteme verilen toplam enerji değerini göstermektedir. Yani kanal boyunca akışkana transfer edilen enerji miktarı ile kayıp enerjinin toplamı da bu değere eşittir. Burada bahsedilen toplama işlemi Eşitlik 3.9’da gösterilmiştir.

$$\dot{Q}_{\text{toplam}} = \dot{Q}_{\text{akışkan}} + \dot{Q}_{\text{kayıp}} \quad (3.9)$$

Kanal boyunca akışkana transfer edilen enerji miktarı ise Eşitlik 3.10’da verildiği gibi hesaplanır.

$$\dot{Q}_{\text{akışkan}} = \dot{m}C_p(T_c - T_g) \quad (3.10)$$

Buradan elde edilen değer aynı zamanda taşınım ile ısı transferi miktarını göstermektedir (Eşitlik 3.11).

$$\dot{Q}_{\text{akışkan}} = \dot{Q}_{\text{taşınım}} \quad (3.11)$$

Taşınım ile ısı transferi Newton'un soğuma yasası kullanılarak belirlenmektedir. Eşitlik 3.10'dan elde edilen değer, bu yasaya uygulanarak ısı transfer katsayısı bulunabilir. Isı transfer katsayısı, Eşitlik 3.12'den faydalanılarak tespit edilmektedir.

$$h = \frac{\dot{Q}_{\text{taşınım}}}{A_s \left[T_s - \left(\frac{T_g + T_c}{2} \right) \right]} \quad (3.12)$$

Isı transferi uygulamalarında kullanılan ve boyutsuz bir sayı olan Nusselt sayısı ısı transferi performansının değerlendirilmesi için oldukça önem arz etmektedir. Nusselt sayısı taşınım etkilerinin iletim etkilerine oranı olarak tanımlanır ve Eşitlik 3.13'de verildiği gibi hesaplanır.

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

Ayrıca akış rejiminin belirlenmesinde kullanılan başka bir boyutsuz sayı olan Reynolds sayısı Eşitlik 3.14'de verildiği gibi ortalama akışkan hızı değeri (V_{ort}) kullanılarak hesaplanır.

$$Re = \frac{\rho V_{\text{ort}} D_h}{\mu} \quad (3.14)$$

Burada verilen ortalama hız değeri ölçülen kütleli debi yardımı Eşitlik 3.15'te gösterildiği gibi belirlenir.

$$V_{\text{ort}} = \frac{\dot{m}}{\rho A_c} \quad (3.15)$$

İç akışlarda, kanal yüzeyi ile akışkan arasında meydana gelen sürtünme kayıpları sürekli kayıpları olarak tanımlanırlar. Bu kayıplar basınç düşümüne sebep olan önemli etkenlerdendir. Bu sürtünme kayıpları, Eşitlik 3.16’da verilen boyutsuz Darcy-Weisbach sürtünme faktörü ile belirlenir.

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D_h}\right) \left(\frac{\rho V_{ort}^2}{2}\right)} \quad (3.16)$$

3.2.3. Belirsizlik analizi

Deneyssel çalışmaların doğru bir şekilde değerlendirilmesi için belirsizlik analizi oldukça önemlidir. Bu analiz literatürde yer alan birçok çalışmada ölçüm cihazlarının çözünürlüğü ve doğruluğundan dolayı ortaya çıkan belirsizlikleri tespit etmek için kullanılmaktadır. Yapılan çok sayıda deneyssel çalışmada sıklıkla kullanılan, Kline and McClintock (1953) tarafından önerilen belirsizlik analizi yöntemi bu çalışmada tercih edilmiştir. Bu yöntemin genel hali aşağıdaki Eşitlik 3.17’de verilmiştir.

$$w_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (3.17)$$

Bu denklemde $R, x_1, x_2, \dots, x_n$ bağımsız değişkenlerine bağlı olan ölçülen değerdir. Ayrıca, $w_1, w_2, \dots, w_n$ bahsedilen bağımsız değişkenlerin hata miktarlarını ifade etmektedir. Bu çalışmada önemli parametreler olan ısı transfer katsayısı (h), Reynolds sayısı (Re), Nusselt sayısı (Nu) ve sürtünme faktörünün (f) belirsizlikleri aşağıda sunulan Eşitlik 3.18, 3.19, 3.20 ve 3.21’de sırasıyla ilgili ifadeler yerine koyularak hesaplanmıştır.

$$w_h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial \dot{m}} w_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial C_p} w_{C_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \Delta T} w_{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial A} w_A\right)^2} \quad (3.18)$$

$$w_{Re} = \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial V} w_V\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial D} w_D\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \mu} w_\mu\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \rho} w_\rho\right)^2} \quad (3.19)$$

$$w_{Nu} = \sqrt{\left(\frac{\partial Nu}{\partial h} w_h\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial k} w_k\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial D} w_D\right)^2} \quad (3.20)$$

$$w_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \Delta P} w_{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial D} w_D\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L} w_L\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial V} w_V\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} w_\rho\right)^2} \quad (3.21)$$

Burada verilen eşitliklerden faydalanılarak hesaplanan belirsizlik değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Belirsizlik analizi sonuçları

Parametreler	Belirsizlik (%)
Isı transfer katsayısı (h)	1,69
Reynolds sayısı (Re)	2,29
Nusselt sayısı (Nu)	1,95
Sürtünme faktörü (f)	3,89

3.3. Nanoakışkanların Sentezlenmesi ve Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında düşük yoğunluklu, manyetik $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$ nanopartikülleri kullanılmıştır. Bu parçacıklar ile iki adımlı metot uygulanarak %0,5 ve %1 hacim hacimsel oranlarında nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Belirtilen konsantrasyonları elde etmek için akışkan ve nanopartikülleri için gerekli kütle hesaplamaları yapılmış, hassas terazi kullanılarak hesaplamalardan elde edilen kütle değerlerinde nanopartiküller baz akışkan içerisine dağıtılmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen değerleri Çizelge 3.2’de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Daha sonra nanopartikül topaklanmalarının kırılması ve homojen bir karışımın elde edilebilmesi için 3 saat boyunca ultrasonik homojenizatör kullanılarak ultrasonikasyona maruz bırakılmıştır. Ultrasonikasyon süresinin 3 saat seçilmesi, literatürde manyetik nanoakışkanların hazırlanmasında genellikle ortalama bu kadar sürelerde çalışılmasından kaynaklanmaktadır (Aydın et al. 2023; Kharat et al. 2020; Tong et al. 2020). Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$ nanopartikülleri Sigma Aldrich firmasından temin edilmiş ve Çizelge 3.3’te nanopartiküllerin katalog özellikleri verilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

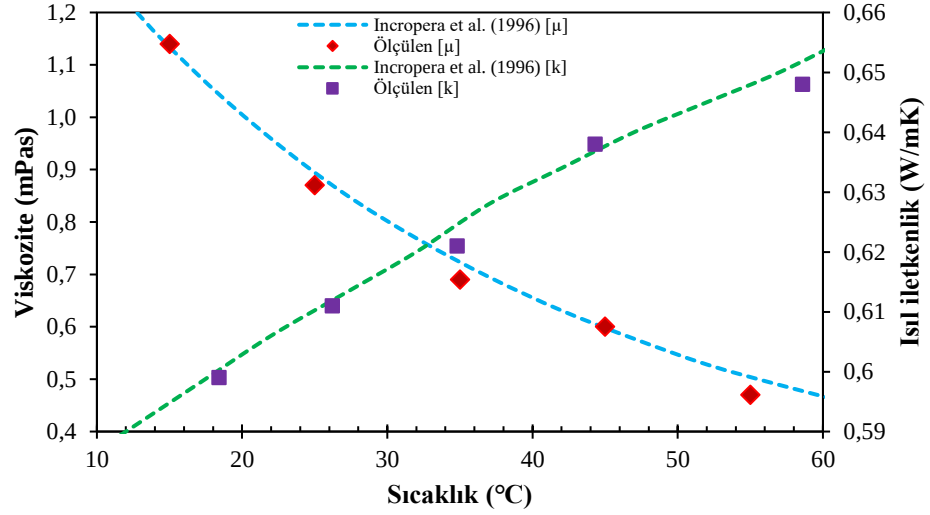
Çizelge 3.2. Nanoakışkanları hazırlamak için gerekli akışkan ve nanopartikül miktarları

Hacimsel nanopartikül oranı (ϕ)	V_{nf} (m ³)	ρ_{np} (kg/m ³)	ρ_{bf} (kg/m ³)	m_{bf} (g)	m_{np} (g)	m_{nf} (g)
0,005	0,0005	2.810	998	496,505	7,025	503,53
0,01	0,0005	2.810	998	494,01	14,05	508,06

Çizelge 3.3. NiZnFe₄O₄ nanopartiküllerinin özellikleri (Anonymous 2023g)

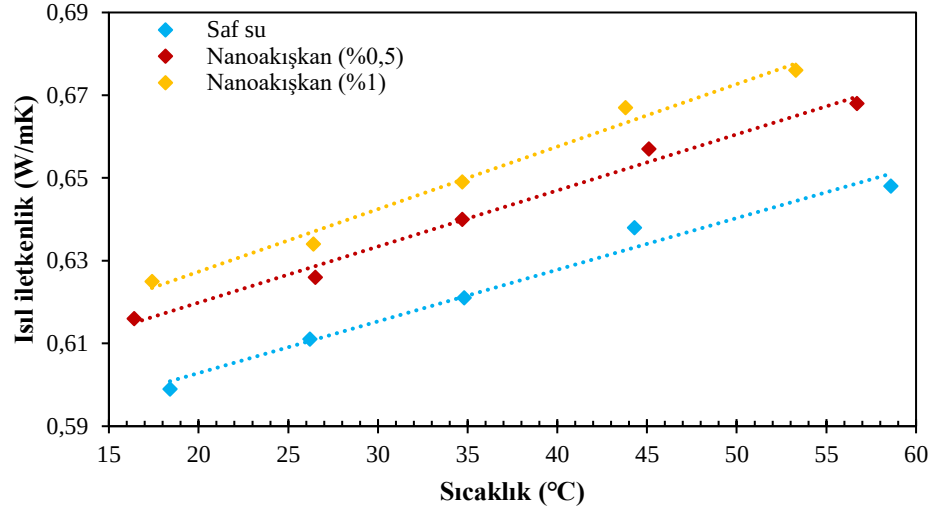
Nanopartiküllerin adı	Nikel çinko demir oksit
Kimyasal formülü	NiZnFe ₄ O ₄
Moleküler ağırlığı	411,46 g/mol
Yoğunluğu	2.810 kg/m ³ (25 °C’de)
Ortalama parçacık boyutu	≤ 100 nm
Safılık	%99
Renk	Koyu kahverengi
Su içinde çözünürlüğü	Çözünmez

Yukarıda belirtilen adımlar gerçekleştirilerek hazırlanan nanoakışkanların ısı transferi performanslarını değerlendirebilmek için ısıl iletkenlik ve dinamik viskozitelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple ilk adım olarak nanoakışkanların 15 – 55 °C sıcaklık aralıklarında ısıl iletkenlik ve viskozite ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm cihazlarının güvenilirliğinin belirlenmesi ve elde edilen sonuçların doğrulanması için bu cihazlarda ilk olarak saf suyun viskozite ve ısıl iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler literatürde bulunan saf su verileri ile karşılaştırılmış ve Şekil 3.20’de sunulmuştur. Şekilden de görülebileceği gibi yapılan ölçümler literatür verileri ile oldukça uyum içerisindedir. Bu da nanoakışkanlar kullanılarak gerçekleştirilen viskozite ve ısıl iletkenlik ölçümlerinin doğruluğunu göstermektedir.



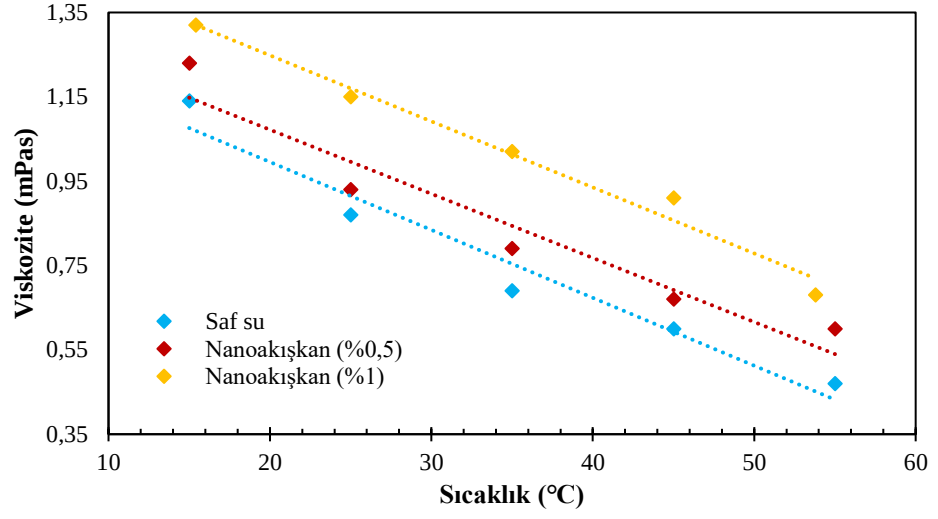
Şekil 3.20. Ölçülen viskozite ve ısı iletkenlik değerlerinin literatürdeki veriler kullanılarak doğrulanması.

Katıların ısı iletkenlikleri genellikle sıvılardan üstündür. Bu sebeple bir baz sıvı içerisine dağıtılan katı parçacıklar, bu sıvıların ısı iletkenliklerini yükseltmektedir. Bu çalışmada hazırlanan nanoakışkanların ısı iletkenlikleri ölçülmüş ve Şekil 3.21’de saf su ile karşılaştırılmıştır. Bilindiği gibi akışkanların ısı iletkenlikleri moleküllerin yayılım ve birbiri ile olan etkileşimlerinin sonucu ortaya çıkan ısı iletiminin bir sonucudur. Sıcaklıktaki artış ile sıvı moleküllerinin enerjileri ve buna bağlı olarak da hareketlilikleri artmaktadır. Bu hareketlilik moleküllerin birbiri ile daha fazla etkileşime girmelerine sebep olmakta ve bu da sıvıların sıcaklık arttıkça ısı iletkenliklerinin artmasına sebep olmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi hem saf su hem de nanoakışkanların ısı iletkenlikleri sıcaklık ile birlikte artmıştır. Ayrıca saf su içerisine dağıtılan nanopartiküller saf suyu ısı iletkenliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Akışkan içerisindeki parçacık miktarı arttıkça ısı iletkenlik değeri de artmaktadır. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın ısı iletkenliği saf suyun iletkenliğinden ortalama %2,9 civarında daha fazla olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde %1 hacimsel oranda ise bu oran %4,5’e yükselmektedir.



Şekil 3.21. Kullanılan akışkanların ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

Akışkan içerisine nanopartiküllerin dağıtılması ısı iletkenlik ve diğer termofiziksel özellikler gibi viskoziteyi de önemli ölçüde etkilemektedir. Akışkan içerisindeki parçacık oranı arttıkça viskozite değerleri de önemli ölçüde artmaktadır. Şekil 3.22’de bu çalışmada kullanılan saf su, %0,5 ve %1 hacimsel oranlarına sahip nanoakışkanların viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Bilindiği gibi sıcaklığın artmasıyla sıvıların viskozite değerleri düşmekte ve daha akıcı bir hal almaktadırlar. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi bütün akışkanların viskozite değerleri sıcaklığın artmasıyla birlikte azalmaktadır. Nanoakışkanların viskozite değerleri beklendiği gibi saf suyun viskozitesinden yüksek değerler almıştır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda nanoakışkan kullanımının viskoziteyi daha fazla etkilediği ve sıcaklık arttıkça saf suya kıyasla viskozite artış oranının arttığa belirtilmelidir. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın suya göre maksimum viskozite artışı 55 °C civarında %27,7 olarak gerçekleşirken, %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanda bu oran %51,7 olarak elde edilmiştir. Ayrıca bütün sıcaklıklar için ortalama viskozite artışı %0,5 ve %1 hacimsel oranlardaki nanoakışkanlar için sırasıyla %13,7 ve %38,4 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.22. Kullanılan akışkanların viskozitelerinin sıcaklıkla değişimi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında diğer manyetik nanoparçacıklara kıyasla düşük yoğunluklu ve yüksek stabiliteye sahip $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$ nanopartikülleri kullanılarak su bazlı %0,5 ve %1 konsantrasyona sahip manyetik nanoakışkanların manyetik alan etkisi altında ısı transferi performansları incelenmiştir. Alternatif ve sabit manyetik alan uygulamanın etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. 22, 30 ve 38 mT olmak üzere üç farklı sabit yoğunluklu manyetik alanın ısı transferi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Alternatif manyetik alan ise 50 Hz frekansta 3 ve 5 mT yoğunluğa sahip olarak ayarlanmıştır. Manyetik alanın nanoakışkanın ısı transferi üzerindeki etkileri 6 farklı Reynolds sayısı ile incelenmiştir. Laminer akış rejiminde gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar bu bölümde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

4.1. Saf Suyu Ait Isı Transferi ve Basınç Düşümü

Doğru değerlendirmeler yapabilmek ve çıkarımlarda bulunabilmek için elde edilen deneysel sonuçların literatürde önerilen korelasyonlarla eşleşmesi önemlidir. Bu nedenle mevcut çalışmada saf su için elde edilen Nusselt sayıları aşağıda verilen korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Hidrolik olarak gelişmiş ve termal olarak gelişmemiş akış bölgelerinde uygulanabilir bir korelasyon Jacimovic et al. (2018) tarafından önerilmiş ve Eşitlik 4.1’de sunulmuştur. Eşitlik 4.2’de Shah and London (1974) tarafından önerilen ve birçok çalışmada referans olarak kabul edilen Nusselt sayısı korelasyonu verilmiştir. Literatürde yine sıklıkla kullanılan ve gelişen laminer akış bölgesinde geçerli Sieder and Tate (1936) tarafından geliştirilen korelasyon Eşitlik 4.3’te verilmiştir. Bu eşitlik dairesel borular için kullanılmaktadır.

$$Nu = 4.364 + 0.263Gz \int_0^{1/Gz} e^{-41.L} L^{-0,506} dL, \quad for \quad Gz \leq 667 \quad (4.1)$$

$$Nu = 1.953Gz^{1/3}, \quad for \quad Gz \geq 33.3 \quad (4.2)$$

$$Nu = 1.86Gz^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (4.3)$$

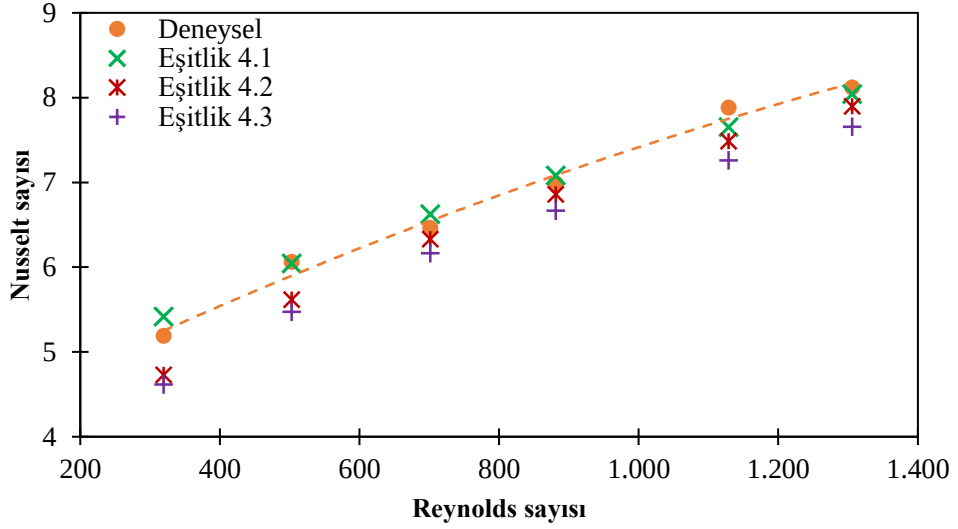
Yukarıda verilen eşitliklerde verilen Graetz sayısı (Gz) aşağıdaki sunulan Eşitlik 4.4'teki gibi hesaplanır.

$$Gz = \frac{RePrD}{L} \quad (4.4)$$

Şekil 4.1'de yukarıda verilen korelasyonlar ve deneysel sonuçlardan elde edilen saf suyum Nusselt sayıları karşılaştırılmıştır. Korelasyonlardan elde edilen Nusselt sayıları ile deneysel sonuçlar arasında çok iyi bir uyum sağlandığı şekilden açıkça görülmektedir. Deneysel Nusselt sayılarıyla en iyi uyum, Eşitlik 4.1'den elde edilen değerler ile olmuştur. Bunun sebebinin, bütün Reynolds sayılarında akışın hidrolik olarak gelişmiş ve termal olarak gelişmemiş akış bölgesinde kalındığı için olduğu düşünülmektedir. Ayrıca hidrolik ve termal olarak giriş uzunluklarının belirlenmesi sırasıyla Eşitlik 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. Eşitlik 4.3 ile elde edilen değer hem deneysel sonuçlardan hem de diğer modellerden bir miktar düşük çıkmıştır. Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 4.2 ile elde edilen değerler ise neredeyse deneysel sonuçlar ile aynı bulunmuştur. Bu modeller ile deneysel olarak tespit edilen değerler arasındaki maksimum sapma en düşük Reynolds sayısında meydana gelmiştir ve bu sapma değerleri Eşitlik 4.1 ve 4.2 için sırasıyla %4,4 ve 8,8 olarak tespit edilmiştir.

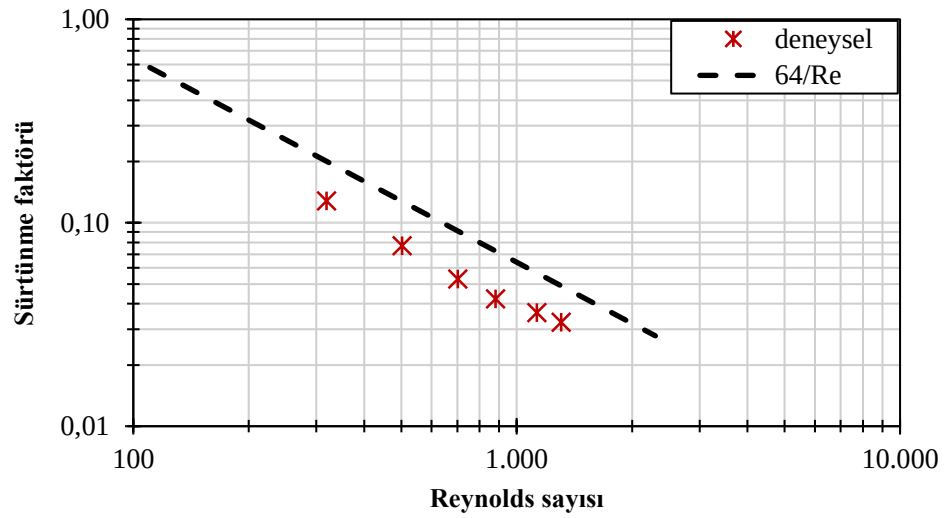
$$L_h = 0,05ReD_h \quad (4.5)$$

$$L_t = 0,05RePrD_h \quad (4.6)$$



Şekil 4.1. Saf suyun deneysel Nusselt sayısı değeri ile literatürde bulunan korelasyonların karşılaştırılması.

Şekil 4.2’de basınç ölçümlerinin doğruluğunu göstermek için deneysel olarak bulunan ve literatürde klasikleşmiş, tam gelişmiş laminar akış için önerilen $64/Re$ eşitliği karşılaştırılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen sürtünme faktörü değerleri bir miktar bu eşitliğin altında kalmıştır.



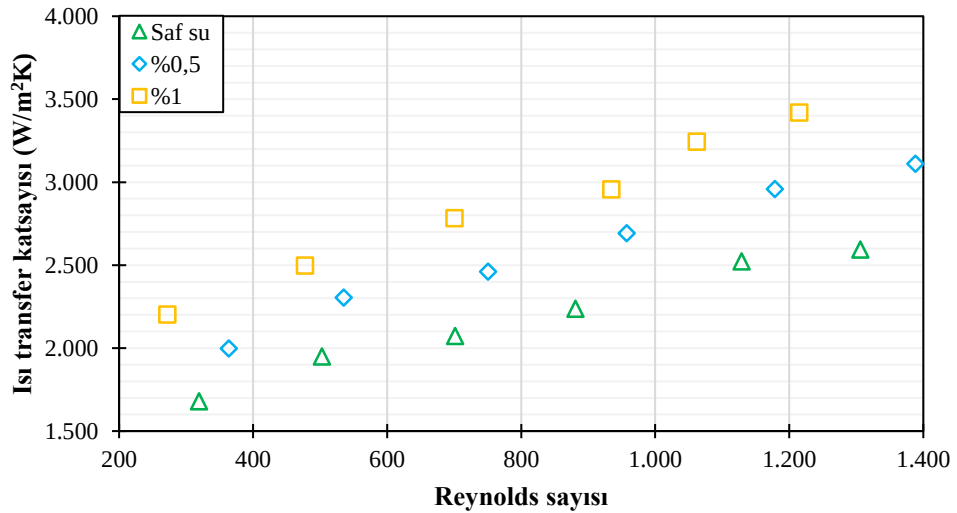
Şekil 4.2. Teorik ve deneysel sürtünme faktörlerinin karşılaştırılması

4.2. Nanoakışkanların Isı Transferleri ve Basınç düşümleri

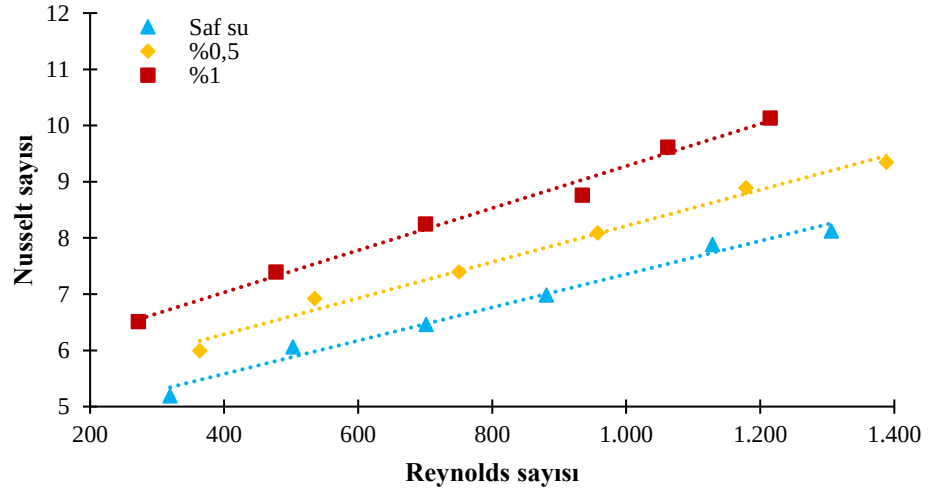
Bu bölümde %0,5 ve %1 hacimsel oranda hazırlanan nanoakışkanların ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri suyla karşılaştırılmıştır. Laminer akış şartlarında 300 – 1.300 Reynolds sayısı aralığında ve sabit ısı akısı sınır şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanların yüksek ısıl iletkenlikleri konvektif ısı transferi katsayısının artmasına sebep olmaktadır. Ancak viskozitelerindeki artışla birlikte ısıl sınır tabaka kalınlığının artması tam tersi bir etki meydana getirmektedir ve ısı transfer katsayısı olumsuz olarak etkilenmektedir. Isı iletkenliğinin baskın etkisi sebebiyle ortaya çıkan artış, ısıl sınır tabaka kalınlığının artmasından meydana gelen azalmaya karşı daha etkili olmaktadır. Bu sebeple nanoakışkan kullanımı ısı transfer katsayısı nanoakışkan kullanımı ve hacimsel oranın artmasıyla artmaktadır.

Şekil 4.3'te %0,5 ve %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanların ısı transfer katsayıları saf su ile karşılaştırılmıştır. Farklı ısı transferi akışkanları ile gerçekleştirilen bütün deneyler Reynolds sayısının artmasıyla ısı transfer katsayısının arttığını göstermiştir. Nanoakışkan kullanımı ısıl iletkenliği arttırdığı için daha yüksek ısı transferi oranlarına ulaşılmasına olanak tanımaktadır. Bu fenomene uyumlu olarak bu çalışmada da beklendiği gibi sonuçlar elde edilmiş ve nanoakışkan kullanımı ile ısı transfer katsayısı artırılmıştır. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkan için ısı transfer katsayısı değerleri %20,3'e kadar arttırılabilmektedir. Ortalama olarak düşünüldüğünde ısı transfer katsayısı %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkan için %16,25 olarak tespit edilmiştir. Nanoakışkanın hacimsel oranının artmasıyla ısıl iletkenlik değeri de arttığı için, yukarıdaki paragrafta belirtilen sebeplerden dolayı ısı transfer katsayısı açısından daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Nanoakışkan hacimsel oranının %1'e çıkarılmasıyla ısı transfer katsayısı önemli ölçüde artmış ve temel akışkana kıyasla maksimum %34,29'luk bir artış gözlemlenmiştir. Reynolds sayısına bağlı olarak elde edilen sonuçların ısı transfer katsayısı eğrileri dikkate alındığında %1 hacimsel oranlı nanoakışkan ve saf su arasında %31,73 – 33,34 arasında bir fark olduğu tespit edilmiştir. %0,5 ve %1 hacimsel oranlı nanoakışkanlar arasında da ısı transferi katsayısı açısından bir fark olduğu şekilde açıkça görülmektedir. Bu fark ortalama olarak %14,15 olarak belirlenmiştir. Bu da nanopartikül miktarının ısı transferi açısından önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Nusselt sayısı taşınım ile ısı transferinin iletimle ısı transferine oranı olarak tanımlanan ve ısı transferi sonuçlarının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan önemli bir boyutsuz sayıdır. Bu sayının yüksek olması taşınım ısı transferinin baskın olduğunu göstermektedir. Nusselt sayısı ısı transfer katsayısı ile doğru orantılı olduğundan dolayı, ısı transfer katsayısının artması Nusselt sayısını da arttırmaktadır. Şekil 4.4'te saf su ve %0,5 ve %1 hacimsel oranlara sahip nanoakışkanların deneysel olarak elde edilen ortalama Nusselt sayısı değerlerini Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Nanoakışkanlar hem ısı iletkenliğini hem de ısı taşınım katsayısını arttırmaktadır. Bu da Nusselt sayısının hem olumlu hem de olumsuz olarak etkilendiğini ifade etmektedir. Ancak nanoakışkan kullanımı ile elde edilen ısı taşınım katsayısındaki artış ısı iletkenlikteki artışa baskın geldiği için Nusselt sayısı değerleri de artmaktadır. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkandan elde edilen Nusselt sayıları bütün Reynolds sayılarında saf sudan daha yüksekti. Bu artış oransal olarak değerlendirildiğinde %12,78 – 15,5 aralığında olduğu görülmektedir. Akışkan içerisindeki nanopartikül miktarı arttıkça bu oranda artmaktadır. Nanoakışkan hacimsel yüzdesi %1 değerine çıkarıldığında, baz akışkana göre Nusselt sayısı artış oranları %21,93 – 27,62 aralığına kadar yükselmiştir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan her iki hacimsel orandaki nanoakışkan birbiri ile kıyaslandığında %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın Nusselt değerleri diğerinden ortalama %13 civarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. Saf su ile nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması

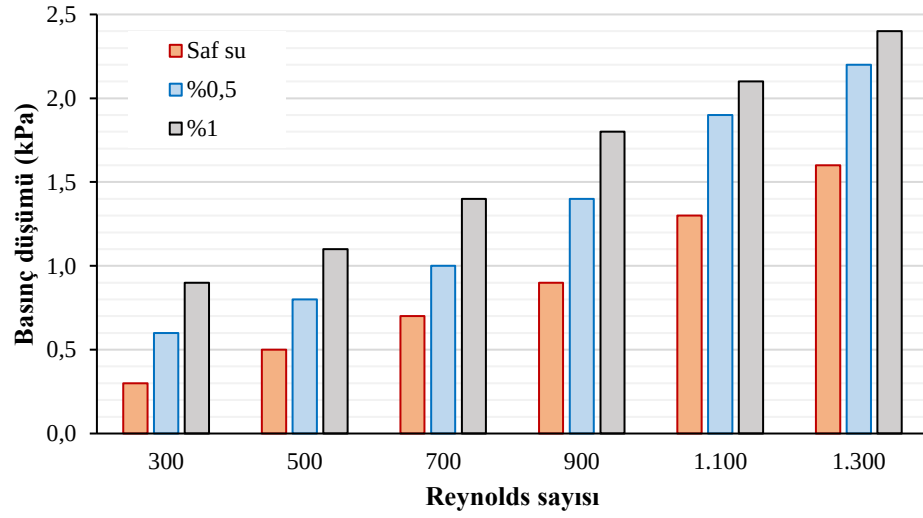


Şekil 4.4. Saf su ile nanoakışkanların Nusselt sayılarının karşılaştırılması

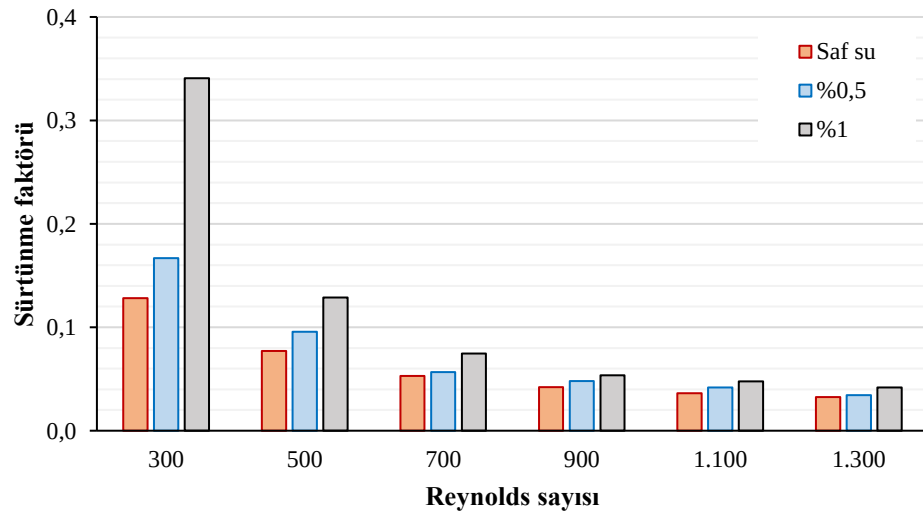
Nanoakışkanların yüksek ısı iletkenlik değerine sahip olmaları ısı transferi açısından olumlu sonuçlar doğursa da viskozitedeki ve yoğunluktaki artışta onların basınç kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Viskozitenin yüksek olması akışa ters yönde etki eden viskoz kuvvetlerin artmasına sebep olmakta bu da akışı sağlamak için gerekli pompalama gücünün artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, bir akış kanalında meydana gelen yük kaybını belirlenmesi için önemli bir yeri olan Darcy sürtünme faktörünün de artmasına sebep olmaktadır. Şekil 4.5 ve 4.6’da sırasıyla nanoakışkanlar ve saf suyun basınç düşümü ve sürtünme faktörü değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Şekil 4.5’te görüldüğü gibi nanoakışkan kullanımı basınç düşümü üzerinde oldukça fazla etkiye sahiptir. Nanoakışkan kullanımı ile birlikte meydana gelen basınç düşümündeki artış özellikler düşük Reynolds sayılarında çok daha fazla olmaktadır. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın basınç düşümünü baz akışkana kıyasla %100’e kadar arttırdığı diyagramdan açıkça görülmektedir. Bu oran Reynolds sayısının artmasıyla yaklaşık %40 değerine gerilemektedir. Benzer durum %1 hacimsel orana sahip nanoakışkan için de geçerlidir. %1 hacimsel oranlı nanoakışkanın oluşturduğu basınç kaybı baz akışkana göre 300 Reynolds sayısında 3 kat artmaktadır. Bu artış Reynolds sayısının artmasıyla azalmakta ve en yüksek Reynolds sayısı değerinde %62 değerine düşmektedir.

Bir önceki paragrafta bahsedildiği gibi nanoakışkan kullanımı ile meydana gelen basınç düşümü artışına bağlı olarak sürtünme faktöründe de belirgin bir artış olmaktadır. Şekil 4.6’da verilen diyagramda iki farklı hacimsel orandaki nanoakışkanların sürtünme

faktörleri baz akışkan olan saf su ile karşılaştırılmıştır. Basınç düşümünde olduğu gibi benzer bir trend elde edilmiş ve düşük Reynolds sayılarında sürtünme faktörü artışının oransal olarak daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Burada %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın sahip olduğu sürtünme faktörünün baz akışkana göre en düşük Reynolds sayısında neredeyse 1,5 katlık bir artış olduğu belirlenmiştir. Bu artış Reynolds sayısı arttıkça azalma eğiliminde olmuş ve en yüksek Reynolds sayısında %5,88 oranına kadar gerilemiştir. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanda ise en düşük Reynolds sayısı için, baz akışkana göre sürtünme faktörü 2,5 kattan fazla artış göstermiştir. Bu karşılaştırma için en az artış yüzdesi yaklaşık olarak %27 civarında elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Saf su ve nanoakışkanların farklı Reynolds sayılarında basınç düşümleri



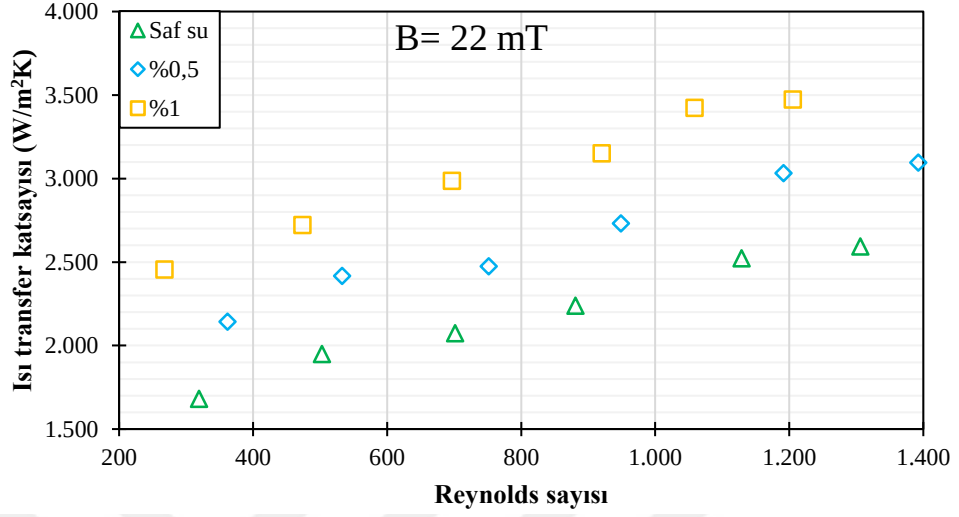
Şekil 4.6. Saf su ve nanoakışkanların farklı Reynolds sayılarında sürtünme faktörleri

4.3. DC Manyetik Alan ile Manipüle Edilen Nanoakışkanların Isı Transferleri

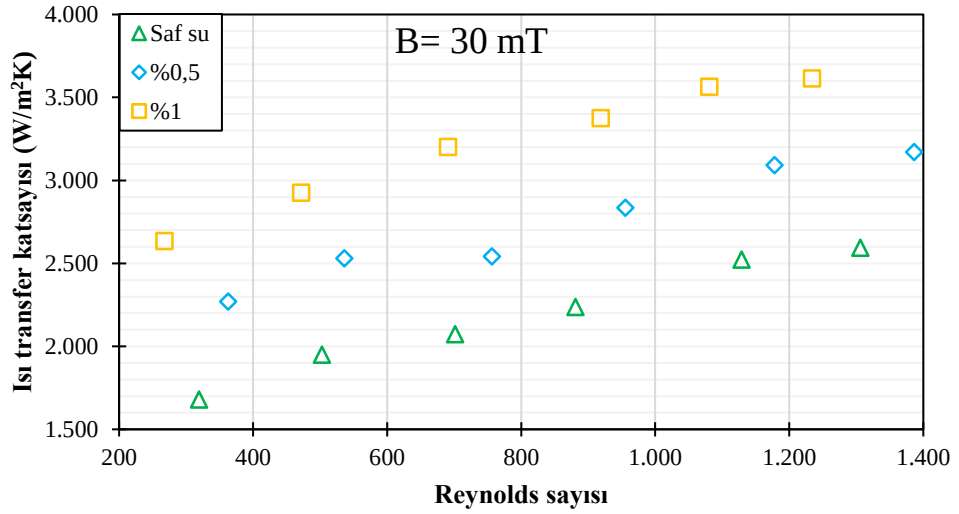
Manyetik özellik gösteren nanopartiküller ile hazırlanan nanoakışkanlar belirli bir manyetik alan yoğunluğu bulunan bölgede kullanılmaları durumunda, akışkan içerisine dağıtılmış nanopartiküller bu manyetik alandan etkisine girmektedir. Bu etki sebebiyle nanopartiküller manyetik alanın yönünde bir çekime maruz kalmaktadır. Bir kanal içerisinde pompalanan akışkan belirli bir hıza sahip olur. Bu akış atalet kuvvetleri olarak tanımladığımız kuvvetlerin etkisi ile hareket eder. Bu bahsedilen konu nanoakışkanlar içinde geçerlidir. Nanoakışkanlar, tek fazlı akışkan olarak tanımlanırlar, çünkü çok küçük boyutlara sahip partiküller içerisine dağıtıldıkları baz akışkan ile birlikte hareket ederler. Bu nanoakışkanlar manyetik alan etkisi olan bir bölgede sirküle edildiğinde nanopartiküller üzerine sadece atalet ve viskoz kuvvetler uygulanmaz. Bunun yanında manyetik çekim kuvvetleri de devreye girerler. Bu manyetik kuvvetler neticesinde nanopartiküller kanal yüzeyi ve birbirleri ile daha fazla etkileşime girerler. Bu etkileşimin neticesinde, soğutulmak istenen kanal yüzeyinden nanopartiküllere daha fazla ısı transferi meydana gelir. Bu da ısı transferinin artmasına sebep olmaktadır.

Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’da nanoakışkanlar üzerine üniform bir manyetik alan uygulaması gerçekleştirilmesi sonucu elde edilen ısı transferi katsayıları referans değer olan saf su ile farklı manyetik alan yoğunluklarında karşılaştırılmıştır. Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi her iki nanoakışkanın da ısı transfer katsayısı saf sudan daha yüksek çıkmıştır. Manyetik alan uygulanması ile bu artış oranı daha da arttırılmıştır. Saf su kullanıldığında elde edilen ısı transfer katsayısı değerleri ile nanoakışkanlar ile elde edilen ısı transferi katsayısı değerlerinin eğrileri arasındaki fark manyetik alan uygulanması ile biraz daha açılmıştır. Aynı şekilde manyetik alan uy artmasıyla da eğriler arasındaki farkın arttığı şekillerden açıkça görülmektedir. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkana uygulanan 22 mT’lik bir DC manyetik alan ile saf suya göre ısı transfer katsayısı ortalama %22 oranında bir artış sergilemiştir. Aynı manyetik alan yoğunluğunda %1 hacimsel oranlı nanoakışkanda ise bu oran %40 olarak elde edilmiştir. Manyetik alan yoğunluğu 30 mT ve 38 mT’ye çıkarıldığı zaman ise %0,5 hacimsel oranlı nanoakışkanın ısı transfer katsayısı saf suya göre sırasıyla ortalama %27 ve %33 daha yüksek bulunmuştur. Bu manyetik alan yoğunluklarında %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın ısı transferi katsayısının artış oranları ise %49 ve %55 olarak tespit edilmiştir. Bu da

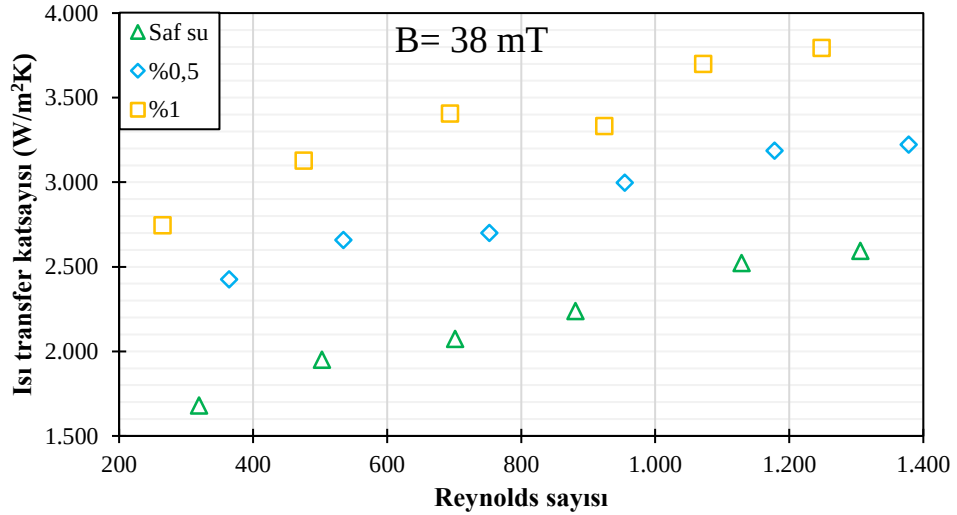
ferroakışkanlar üzerine manyetik alan uygulanmasının ısı transfer katsayısını son derece yükseltebileceğini göstermiştir.



Şekil 4.7. 22 mT’lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması.

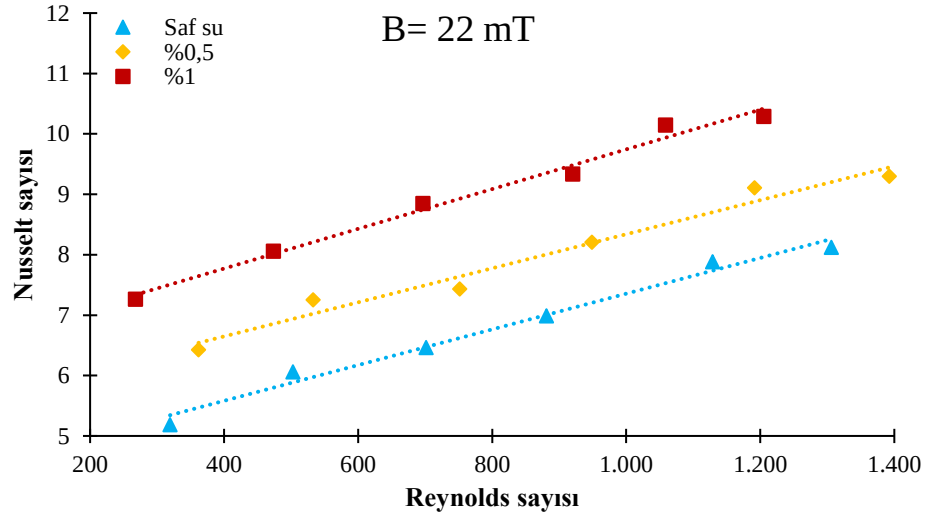


Şekil 4.8. 30 mT’lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması.

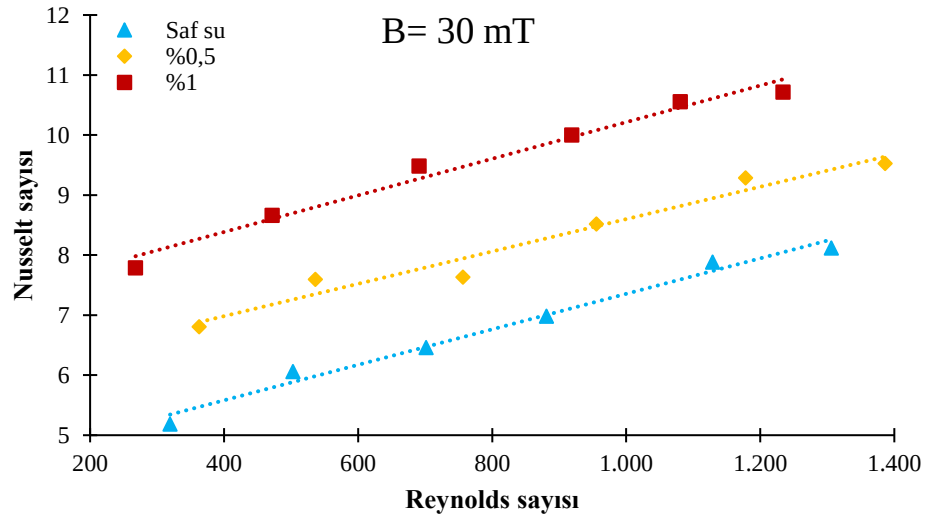


Şekil 4.9. 38 mT’lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması.

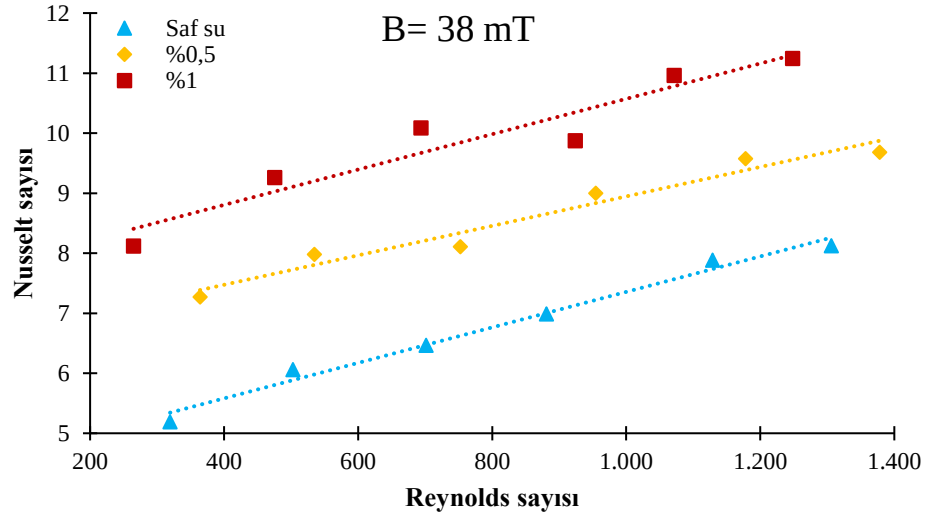
Nusselt sayısı, ısı transfer katsayısı ile doğru orantılı olduğu için nanoakışkanlara uygulanan manyetik alan ile Nusselt sayısında da benzer şekilde artışlar gözlemlenmiştir. Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de saf suya göre farklı DC manyetik alan yoğunluklarına maruz bırakılan nanoakışkanların Nusselt sayıları verilmiştir. Nanoakışkanlar üzerine uygulanan manyetik alanın yoğunluğunun artması ile nanoakışkanların Nusselt sayısı eğrileri biraz daha yukarı yönde kaydıgı görülmektedir. Saf suya göre %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın Nusselt sayılarındaki artış 38 mT manyetik alan ve en düşük Reynolds sayısında maksimum %40 olarak tespit edilmiştir. Bu manyetik alan yoğunluğunda ortalama Nusselt artışı ise %28 olarak tespit edilmiştir. Bu orandaki nanoakışkanın 22 mT ve 30 mT manyetik alanda ise ortalama Nusselt sayısı artış oranları sırasıyla, %18 ve %22 olarak bulunmuştur. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkan kullanıldığında Nusselt sayısında elde edilen maksimum artış %0,5’e benzer şekilde 38 mT manyetik alanda ve 300 Reynolds sayısında olmuştur. Bu artış oranı %56 olarak tespit edilmiştir. Bu nanoakışkanın Nusselt sayılarındaki ortalama artış, 22 mT, 30 mT ve 38 mT manyetik alan yoğunluklarında saf suya göre sırasıyla, %33, %41 ve %47 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.10. 22 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması.



Şekil 4.11. 30 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması.

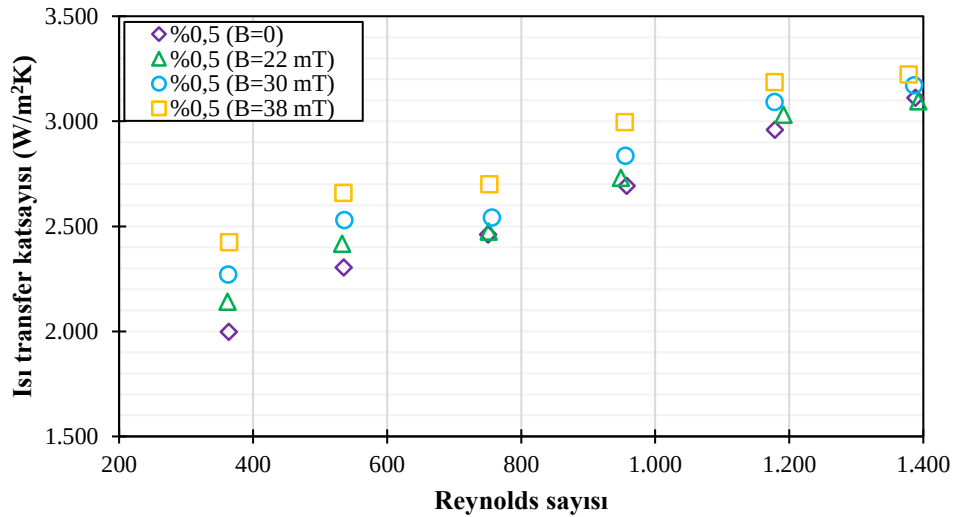


Şekil 4.12. 38 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması.

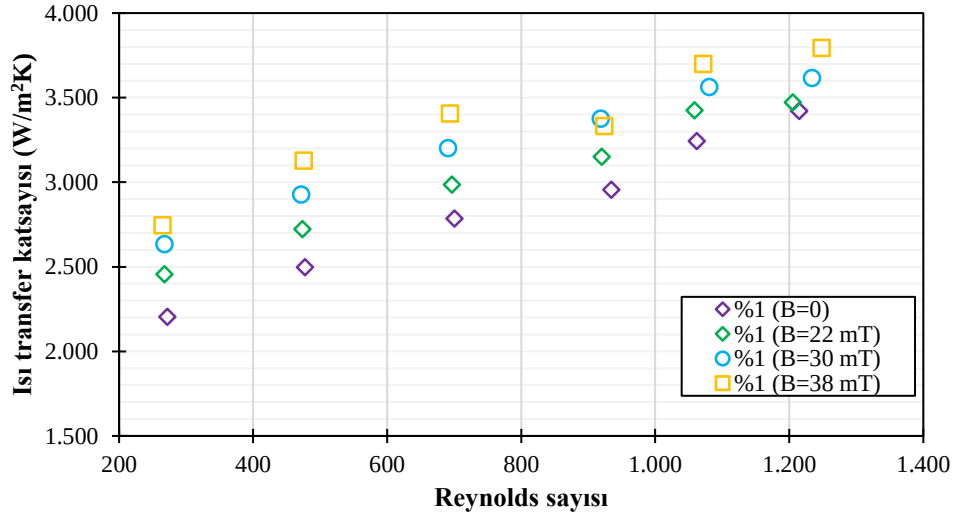
Manyetik alanın ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisine yukarıda biraz değinilmiştir. Bu kısımda manyetik alan yoğunluğunun her iki nanoakışkanın da ısı transfer katsayısına etkileri daha ayrıntılı bir şekilde sunulacaktır. Şekil 4.13'te 0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkan üzerine uygulanan farklı yoğunluktaki manyetik alanın ısı transfer katsayısına etkisi gösterilmiştir. Düşük Reynolds sayılarında atalet kuvvetlerinin daha düşük değerlerde olmasından dolayı manyetik alan etkisi daha fazla ortaya çıkmıştır. Manyetik kuvvetlerin daha yoğun bir şekilde nanopartikülleri etkilemesi sonucu düşük Reynolds sayılarında ısı transfer katsayısındaki artış oranı daha fazla olmaktadır. Her iki grafikte de bu bahsedilen konu açıkça görülmektedir. Farklı manyetik alan şiddetine maruz bırakılan nanoakışkanın sahip olduğu ısı transfer katsayısı değerleri, Reynolds sayısı arttıkça birbirine daha yakın değerler almaktadır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkan üzerine 22 mT'lik bir manyetik alan uygulandığında ısı transfer katsayısı en düşük Reynolds sayısında manyetik alan olmadığı duruma göre %6,7 oranında bir artış gösterirken en yüksek Reynolds sayısında belirgin bir fark ortaya çıkmamıştır. Aynı şekilde diğer manyetik alan yoğunlukları da göz önüne alınırsa, 30 mT'lik bir manyetik alan etkisi altında ısı transfer katsayısının artışı %12,56'dan %1,87 değerine düşmektedir. 38 mT'de ise bu oranlar en düşük ve en yüksek Reynolds sayısı değerinde sırasıyla, %21,19 ve %4,50 olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.14'te, %1 hacimsel orana sahip nanoakışkan üzerine uygulanan farklı şiddetlerdeki manyetik alanların ısı transfer katsayısına etkisi gösterilmiştir. %0,5'lik

nanoakışkana benzer sonuçlar elde edilse de nanopartikül oranının artması neticesinde manyetik alanın ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi de daha belirgin bir hal almıştır. Akışkan içerisine dağıtılan manyetik partikül miktarının artması, elde edilen nanoakışkanın manyetik alandan daha fazla etkilenmesine sebep olmaktadır. Manyetik nanopartikül miktarının çokluğu, manyetik alandan etkilenen partiküllerin kanal duvarı ile hem de birbirleri ile daha fazla etkileşime girmesine sebep olur. Bunun sonucunda ısı transfer katsayısı da %1 hacimsel oranlı nanoakışkanda manyetik alanla birlikte daha fazla artış gösterir. Yukarıdaki paragrafta da bahsedildiği gibi, Reynolds sayısı düşük olduğunda atalet kuvvetlerinin etkisinin az olması sebebiyle, manyetik kuvvetler daha fazla etkili olmuştur. 22 mT manyetik alana maruz kalan nanoakışkanın manyetik olmadığı durum ile karşılaştırıldığında en düşük Reynolds sayısında %11,78’lik bir artış meydana gelirken, en yüksek Reynolds sayısında bu oran %3,15’e gerilemektedir. 30 mT manyetik alanda ise en düşük Reynolds sayısında ısı transfer katsayısı %21,35 oranında artarken en yüksek Reynolds sayısında ise bu oran 3 kat azalarak yaklaşık %7 değerine ulaşmıştır. 38 mT manyetik alan etkisindeki nanoakışkan için yapılan karşılaştırmada ise ısı transfer katsayısındaki artış oranları en düşük ve en yüksek Reynolds sayılarında sırasıyla, %27,81 ve %10,11 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, manyetik alan uygulanması ile ısı transfer katsayısındaki ortalama artışlar 22 mT, 30 mT ve 38 mT değerlerinde sırasıyla, %6,95, %13,32 ve %17,92 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.13. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan yoğunluklarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.

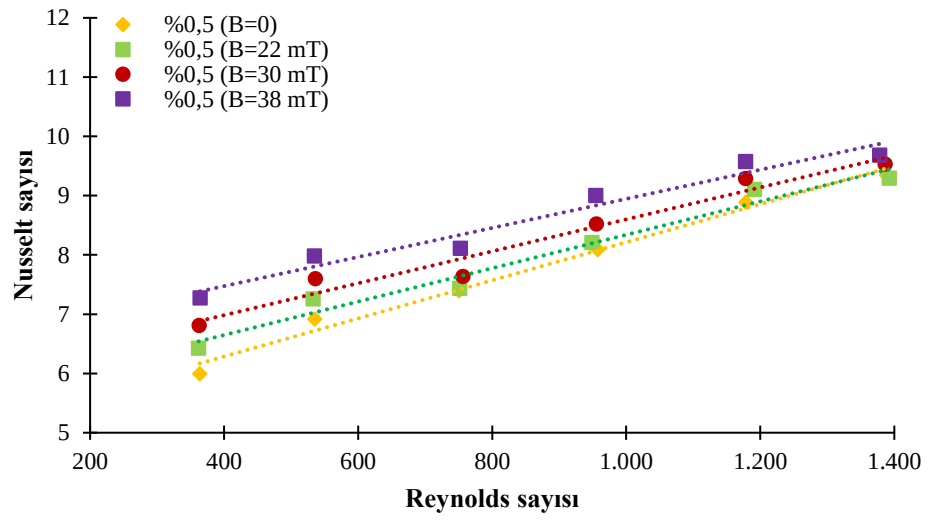


Şekil 4.14. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan yoğunluklarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.

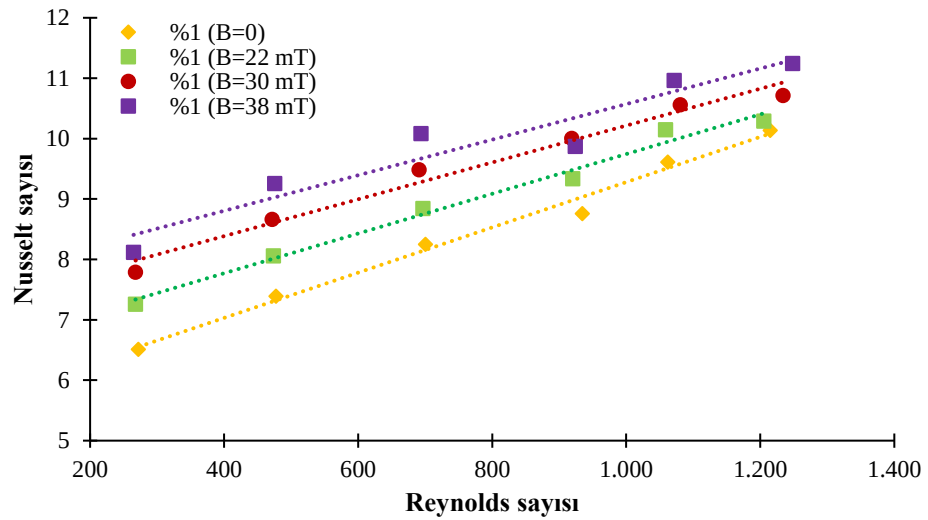
Bu kısımda nanoakışkanların üzerine manyetik alan uygulanması ile Nusselt sayısının nasıl etkilendiği ortaya konmuştur. Şekil 4.15'te %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan şiddetlerinde Nusselt sayısının Reynolds sayı ile değişimi verilmiştir. Isı transfer katsayısına benzer olarak Nusselt sayısı da düşük Reynolds sayılarında atalet kuvvetlerinin düşük olması ve bu sayede manyetik kuvvetlerin kendini daha iyi hissettirebilmesi sebebiyle daha yüksek Nusselt sayıları elde edilmiştir. Ayrıca manyetik alan şiddetinin artmasıyla Nusselt sayısı da parçacıkların daha fazla manyetik etkiye maruz kalmaları sebebiyle artmıştır. 22 mT'lik manyetik alan etkisindeki nanoakışkanın Nusselt sayısı en düşük Reynolds sayısında, manyetik alan etkisine maruz kalmayan nanoakışkana göre %7,80 daha yüksek değer almıştır. Bu değer Reynolds sayısının artmasıyla azalmış ve en yüksek Reynolds sayısında neredeyse hiçbir artış elde edilememiştir. Manyetik alan şiddeti 30 mT'ye çıkartıldığında, bu oranlar da yükselmiş ve en düşük Reynolds sayısında %13,80 ve en yüksek Reynolds sayısında %5,27'ye yükselmiştir. En yüksek Nusselt sayısı artışı en yüksek manyetik alan şiddetinde ve en düşük Reynolds sayısı değerinde elde edilmiştir. Bu artış oranı %22,73 olarak tespit edilmiştir.

Şekil 4.16'da %1 hacimsel orandaki nanoakışkanın farklı manyetik alan şiddetlerinde, sahip olduğu Nusselt sayılarının Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Nanopartikül oranının artmasıyla manyetik alanın Nusselt sayısı üzerindeki etkisi daha belirgin olmuştur. Manyetik alanın olmadığı durum ile karşılaştırıldığında %1 hacimsel

orana sahip nanoakışkanın Nusselt sayıları manyetik alanla birlikte yükselmiştir. Düşük Reynolds sayılarında daha belirgin olan Nusselt sayısı artışı en düşük Reynolds sayısında 22 mT, 30 mT ve 38 mT'lik manyetik alanlarda sırasıyla %12,08, %21,41 ve %27,90 olarak tespit edilmiştir. Reynolds sayısının artmasıyla bu artış oranları düşmekte ve en yüksek Reynolds sayısında sırasıyla, %3,89, %6,98 ve %10,19 olmuştur. Bütün bunlara ek olarak, manyetik alanın olmadığı duruma göre 22 mT, 30 mT ve 38 mT'lik manyetik alan etkisindeki nanoakışkanların Nusselt sayıları sırasıyla ortalama %7,51, %13,35 ve %18,01 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.15. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan yoğunluklarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.

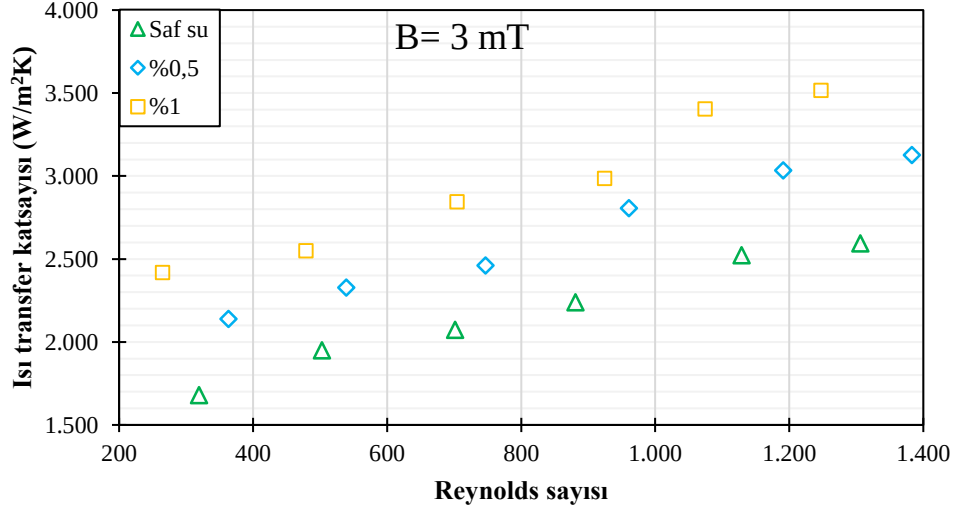


Şekil 4.16. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan yoğunluklarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.

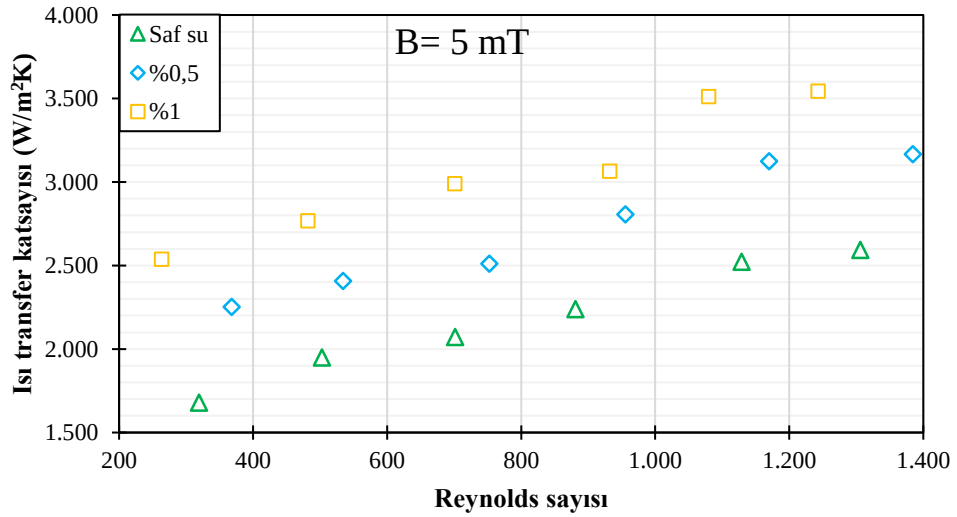
4.4. AC Manyetik Alan ile Manipüle Edilen Nanoakışkanların Isı Transferleri

Bu bölümde AC manyetik alan uygulamasının nanoakışkanların ısı transferi üzerine etkisi diyagramlar halinde ortaya konmuş ve tartışılmıştır. Bir önceki bölümde 3 farklı şiddette DC manyetik alanın ferroakışkanların ısı transferine etkisi gösterilmişti. %0,5 ve %1 hacimsel oranlardaki nanoakışkanlara 50 Hz frekansta 3 mT ve 5 mT'lik iki farklı AC manyetik alanını ısı transferine etkisi gösterilmektedir. Şekil 4.17'de 3 mT'lik AC manyetik alan uygulanan nanoakışkanların ısı transfer katsayıları saf su ile karşılaştırılmıştır. Manyetik alan olmadan da nanoakışkanların ısı transfer katsayıları saf suyun ısı transfer katsayılarından daha yüksek değerlere sahip olmaktadır. Buna karşın manyetik alan ile akış alanı içerisinde manipüle edilen nanoparçacıkların, manyetik etki ile çeşitli etkileşimleri neticesinde ısı transfer katsayısı daha da artmaktadır. 3 mT manyetik alan etkisi altında %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın, saf suya göre ısı transfer katsayısındaki artış oranı ortalama %19,23 olarak elde edilmiştir. Aynı şartlarda %1 hacimsel orandaki nanoakışkanda ise bu oran çok daha yüksek, %37,25 olarak tespit edilmiştir. Burada en yüksek artış oranı en düşük Reynolds sayısında ve %1 hacimsel orandaki nanoakışkanda %39,8 olmuştur. Reynolds sayısının artmasıyla birlikte bu oran düşmüş ve en yüksek Reynolds sayısında %35,2 değerine gerilemiştir.

Şekil 4.18'de 5 mT AC manyetik alana maruz bırakılan nanoakışkanların ısı transfer katsayıları saf suyun ısı transfer katsayısı ile karşılaştırılmıştır. Manyetik alan etkisinin yoğunlaşması neticesinde nanoparçacıklar daha fazla manipüle edilmiş ve bu sayede ısı transfer katsayısı eğrileri arasındaki fark 3 mT uygulanmış olana göre daha fazla açılmıştır. Her iki nanoakışkan için de saf suya göre en yüksek artış en düşük Reynolds sayısı değerinde elde edilmiştir. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın en düşük Reynolds sayısında ve 5 mT manyetik alan etkisinde ısı transfer katsayısındaki artış %26,66 iken bu oran %1 hacimsel oranlı nanoakışkan kullanıldığında %50,04 olarak tespit edilmiştir. Ek olarak, %0,5 ve %1 nanoakışkanları 5 mT manyetik alanda ısı transfer katsayısını ortalama olarak sırasıyla %22,58 ve %42,89 değerine çıkarmışlardır.



Şekil 4.17. 3 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması.

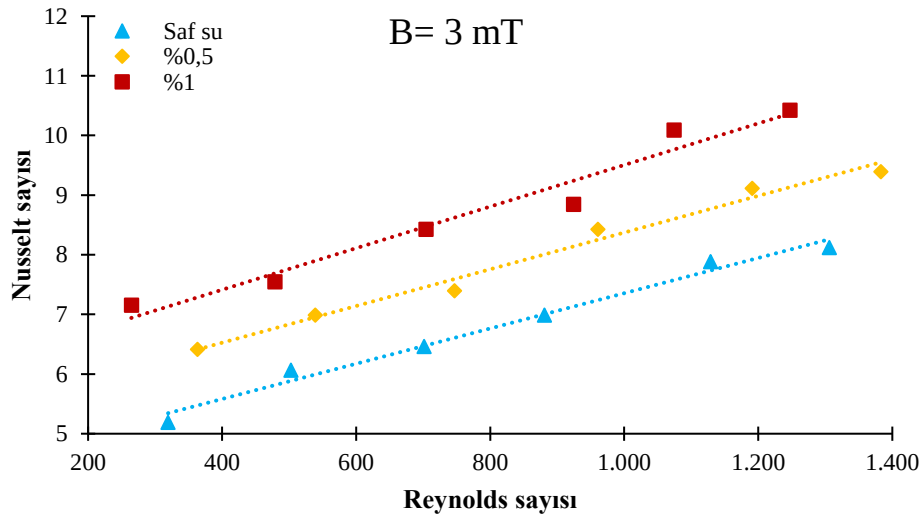


Şekil 4.18. 5 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların ısı transfer katsayılarının saf su ile karşılaştırılması.

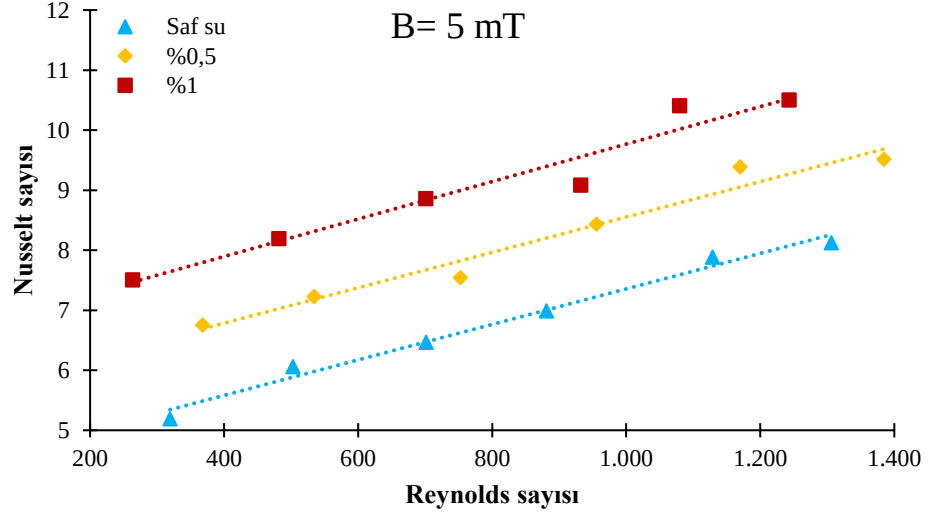
AC manyetik alan uygulaması ısı transfer katsayısında bir artışa sebep olduğu için ve Nusselt sayısı da ısı transfer katsayısına bağlı olduğu için, manyetik alanın uygulanması ile nanoakışkanların ısı transfer hızları arttırılmış ve Nusselt sayıları da bir miktar artış göstermiştir. Şekil 4.19'da 3 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması verilmiştir. Elde edilen sonuçlar manyetik alan etkisi altındaki %0,5'lik nanoakışkanın Nusselt sayılarının saf su ile tespit edilen Nusselt sayılarından ortalama olarak %14,60 daha fazla olduğunu göstermiştir. Öte yandan %1 hacimsel orandaki nanoakışkanda ise bu oran %30 seviyelerine çıkmıştır. Bu şartlar altında elde edilen en yüksek Nusselt sayısı %1 hacimsel

orandaki nanoakışkanda, en yüksek Reynolds sayısı değerinde 10,42 olarak bulunmuştur. Bu sayı aynı Reynolds sayısındaki saf suyun Nusselt sayısından %27,3 daha fazladır. Aynı nanoakışkanın saf suya göre oransal olarak en yüksek artış ise en düşük Reynolds sayısında %33,4 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.20’de 5 mT’lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf suyun Nusselt sayıları ile karşılaştırılması sunulmuştur. Manyetik alan şiddetinin artmasıyla Nusselt sayılarında da bir artış meydana gelmiştir. Yoğunluğu 5 mT olan manyetik alan etkisindeki %0,5 ve %1 hacimsel oranlara sahip nanoakışkanların Nusselt sayıları saf suya göre ortalama sırasıyla %17,04 ve %34,97’lik artışlar görülmüştür. Burada en yüksek Nusselt sayısı yine %1 hacimsel orandaki nanoakışkanda en yüksek Reynolds sayısında 10,50 olarak elde edilmiştir. Nusselt sayısındaki en yüksek artış oranı ise aynı orandaki nanoakışkanda, en düşük Reynolds sayısı değerinde %42,98 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca %0,5 hacimsel orandaki nanoakışkan için en yüksek Nusselt sayısı artışı yine en düşük Reynolds sayısında %22,2 olarak belirlenmiştir.

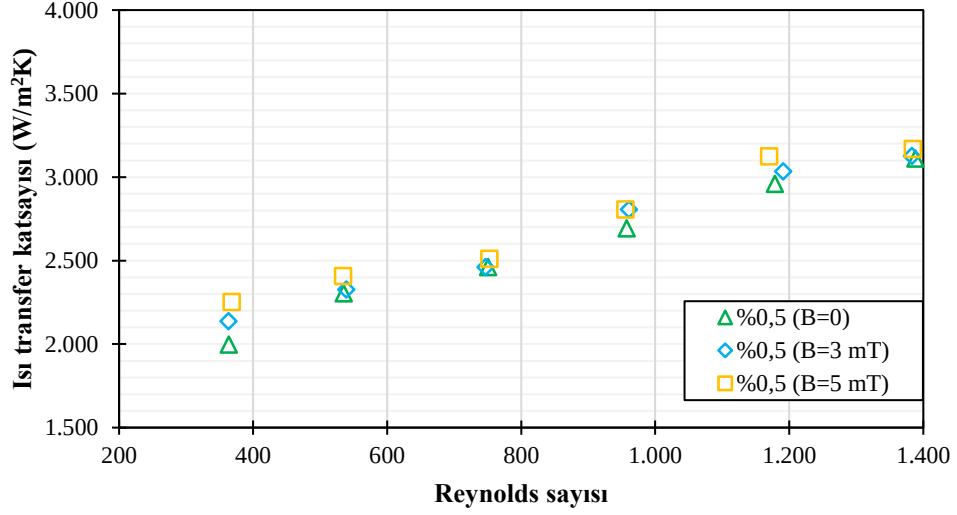


Şekil 4.19. 3 mT’lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması.

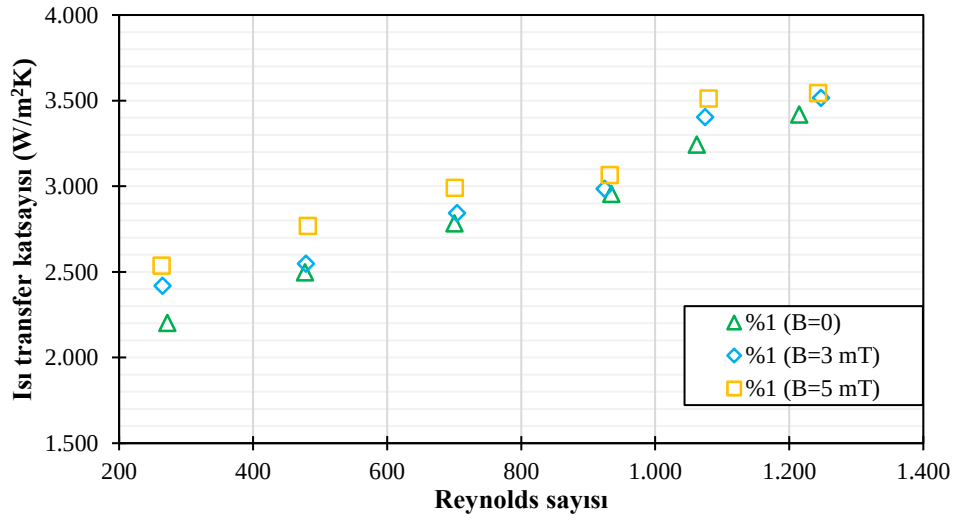


Şekil 4.20. 5 mT'lik manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkanların Nusselt sayılarının saf su ile karşılaştırılması.

Şekil 4.21'de %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı manyetik alan yoğunluklarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Çok yüksek değerlerde artışlar olmamakla birlikte, genel manada manyetik alan şiddetinin artmasıyla ısı transfer katsayısı artmıştır. Bu artış atalet kuvvetlerinin küçük olması sebebiyle düşük Reynolds sayılarında daha belirgin bir hal almaktadır. Elde edilen sonuçların genel eğilimleri göz önüne alındığında, ısı transfer katsayısında 3 mT ve 5 mT manyetik alan uygulanan durumlarda manyetik alan olmadığı duruma kıyasla ortalama %2,5 ve %5,5'lik bir artışın meydana geldiği görülmektedir. Bu durumda en yüksek artış 5 mT manyetik alan etkisi altında ve en düşük Reynolds sayısı değerinde %8,8 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.22'de ise %1 hacimsel orana sahip nanoakışkana uygulanan AC manyetik alanın ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Burada da görüldüğü gibi nanoparçacık oranının artmasıyla manyetik alan etkileri daha belirgin hal almaktadır. En düşük Reynolds sayısında 3 mT ve 5 mT'lik manyetik alan varlığında, manyetik alan olmadığı duruma göre ısı transfer katsayısı sırasıyla %6,1 ve %13,9 oranında artış göstermiştir. Ortalama ısı transfer katsayısı artışı ise 3 mT için %3,5 civarında iken 5 mT'lik manyetik alan etkisi altında %7,75 değerine ulaşmıştır.



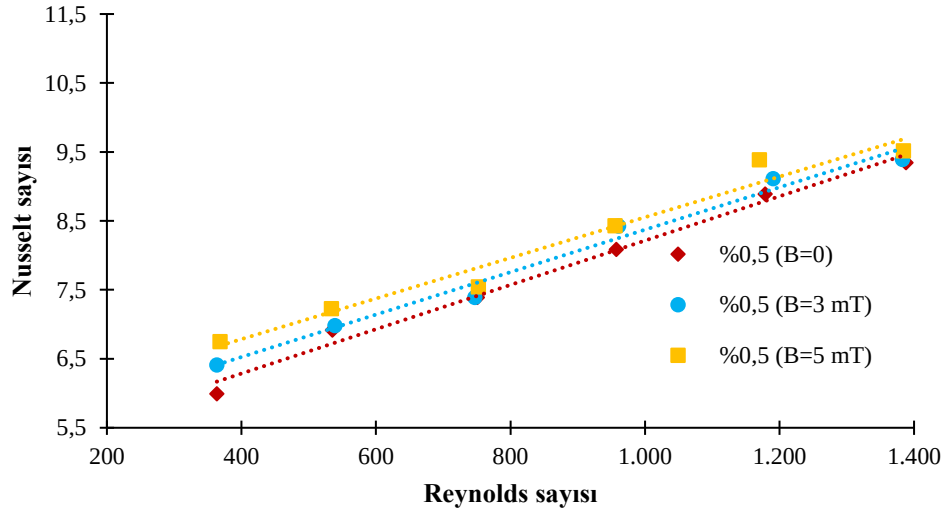
Şekil 4.21. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı AC manyetik alan yoğunluklarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.



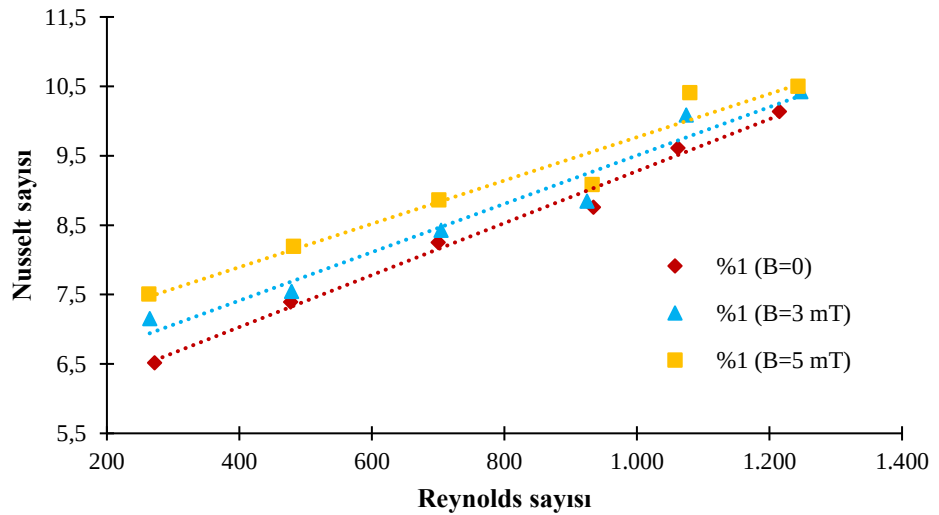
Şekil 4.22. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı AC manyetik alan yoğunluklarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi.

Şekil 4.23 ve 4.24'te farklı manyetik alan yoğunluklarının %0,5 ve %1 hacimsel oranlara sahip nanoakışkanların Nusselt sayılarına etkileri ortaya konmuştur. Manyetik alan yoğunluğunun artmasıyla birlikte Nusselt sayısında bir artış olduğu her iki diyagramda da açıkça görülmektedir. Nanoparçacık oranının artmasıyla nanoakışkanların ısı transferleri manyetik alandan daha fazla etkilenmektedir. Bu sebeple Şekil 4.24'te eğriler arası mesafeler diğer şekle göre daha belirgin bir halde karşımıza çıkmıştır. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın 3 mT ve 5 mT manyetik alan etkisi ile Nusselt sayısındaki ortalama artış sırasıyla %2,95 ve %5,13 olurken, %1 hacimsel oranındaki nanoakışkanda ise bu oranlar %4,05 ve %8,01 olarak elde edilmiştir. %1 hacimsel orana

sahip nanoakışkan en düşük Reynolds sayısında manyetik alan olmadığı ve 5 mT'lik manyetik alan etkisindeki Nusselt sayıları karşılaştırıldığında, manyetik alan uygulanan nanoakışkanın Nusselt sayısının %14 civarında daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Aynı Reynolds sayısı ve manyetik alan şiddetinde %0,5 hacimsel oranlı nanoakışkanın Nusselt sayısındaki artış ise %8,64 olarak tespit edilmiştir. Bu durum nanoparçacık miktarının artmasıyla, nanoakışkanın manyetik etkilerden daha fazla etkilendiğini bir kez daha ortaya koymuştur.



Şekil 4.23. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı AC manyetik alan yoğunluklarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.



Şekil 4.24. %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın farklı AC manyetik alan yoğunluklarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, düşük yoğunluklu manyetik $\text{NiZnFe}_4\text{O}_4$ nanoparçacıkları ile %0,5 ve %1 hacimsel oranlarda hazırlanan nanoakışkanların farklı yoğunluklarda AC ve DC manyetik alan etkisi altındaki ısı transferi performansı incelenmiştir. 300 – 1.300 Reynolds sayısı aralığında zorlanmış ısı taşınımı deneyleri, bir minikanalda sabit ısı akısı sınır şartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan etkileri iki elektromıknatıs ile sağlanmıştır. Sabit manyetik alan deneyleri için 22, 30 ve 38 mT olmak üzere üç farklı manyetik alan yoğunluğunda deneyler yapılmış ve tartışılmıştır. Alternatif manyetik alan etkisi ise 50 Hz frekansta 3 ve 5 mT yoğunluğa sahip manyetik alan etkisi altında deneyler yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen temel bulgular ve çıkarımlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- İletkenliği yüksek nanoparçacıkların baz akışkan olan saf su içerisine süspansiyon edilmesiyle ısı iletkenlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Ancak bu parçacıklar akışkanın akıcılığını azalttığından dinamik viskozite değerlerini de yükseltmişlerdir.
- Laminer akış koşullarında Nusselt sayısının tahmini için literatürde önerilen korelasyonlar ile deneysel verilerin oldukça iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.
- Laminer akış için sıklıkla kullanılan model ile deneysel veriler karşılaştırıldığında deneysel sonuçların model ile benzer eğime sahip olduğu, ancak bir miktar bu modelin altında kaldığı görülmüştür. Bu farkın önerilen modelin tam gelişmiş akış için geçerli olduğu gerçekleştirilen deneylerin ise geliştirmekte olan akış şartlarında yapıldığı için olduğu düşünülmektedir.
- Nanoakışkanlar yüksek ısı iletkenlikleri sebebiyle baz akışkana göre bütün Reynolds sayılarında daha yüksek ısı transfer katsayısına sahip olmuştur. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkan ısı transfer katsayısını saf suya göre maksimum %20,3 kadar arttırmıştır. Hacimsel oran %1 olduğunda ise bu değer %34,3 seviyesine yükselmiştir. Her iki nanoakışkan karşılaştırıldığında %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanın ısı

transfer katsayısı diğerinden ortalama %14 civarında daha yüksek olarak elde edilmiştir.

- Isı transfer katsayısına bağlı olarak Nusselt sayısında da nanoakışkan kullanımı ile kayda değer bir artış gözlemlenmiştir. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanda elde edilen Nusselt sayısı saf suya göre ortalama %14'lük bir artış sergilerken, %1'lik nanoakışkan ortalama %25'lik bir artış göstermiştir.
- Nanoakışkan kullanımı ile ısı transferinin yanı sıra basınç kaybı da önemli ölçüde artış göstermiştir. Her iki nanoakışkanda da basınç kaybı baz akışkana göre düşük Reynolds sayılarında daha fazla artmıştır. Bu artış oranları Reynolds sayısının artmasıyla azalmıştır. En düşük Reynolds sayısında, %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın basınç düşümü saf suya göre %100 artmıştır. Bu artış oranı en yüksek Reynolds sayısında %40 civarına gerilemiştir. Benzer şekilde %1 hacimsel oranlı nanoakışkan en düşük Reynolds sayısında basınç kaybını 3 kat arttırırken, en yüksek Reynolds sayısında 1,5 kat arttırmıştır.
- Basınç düşümündeki artışa bağlı olarak nanoakışkanlardan elde edilen sürtünme faktörü değerleri de artış göstermiştir. Basınç düşümündeki düşük Reynolds sayısında fazla artış ve Reynolds sayısı ile birlikte artış oranının düşmesi trendi sürtünme faktöründe de benzerdir. %0,5 hacimsel oranlı nanoakışkanın sürtünme faktörü saf suyun sürtünme faktöründen %5,9 – 30 aralığında yüksek çıkmıştır. Hacimsel oran %1 olduğunda sürtünme faktöründeki artış oranları %27 – 165 aralığına yükselmiştir.
- Akış kanalının ortasına yerleştirilen elektromıknatıslar ile uygulanan sabit manyetik alan ile nanoakışkanların ısı transferleri arttırılmıştır. Hacimsel oranın artmasıyla manyetik alanın ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısı üzerindeki etkisi daha belirgin bir hal almıştır.
- %0,5 hacimsel oranlı nanoakışkana 22, 30 ve 38 mT yoğunluğunda manyetik alan uygulandığı durumlarda ısı transfer katsayısı ortalama olarak saf suya göre sırasıyla, %22, %27 ve %33 oranında arttırılmıştır. Aynı manyetik alan yoğunlukları %1

hacimsel oranlı nanoakışkana uygulandığında bu oranlar %40, %49 ve %55 olarak tespit edilmiştir.

- Manyetik alan uygulanması ile Nusselt sayısında da kayda değer bir artış meydana gelmiştir. %0,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanın Nusselt sayısı 22, 30 ve 38 mT manyetik alan yoğunluklarında, saf suyun sahip olduğu Nusselt sayısından sırasıyla, %18, %22 ve %28 oranında daha yüksek çıkmıştır. Aynı manyetik alan yoğunluklarında %1'lik nanoakışkanın Nusselt sayısını artırma oranları ise %33, %41 ve %47 olarak tespit edilmiştir.
- Saf suyun Nusselt sayısına kıyasla en yüksek artış %1 hacimsel orana sahip nanoakışkanda, 300 Reynolds sayısında ve 38 mT manyetik alan etkisi altında %56 olarak belirlenmiştir.
- Nanoakışkanlar üzerine uygulanan manyetik alan ile ısı transfer katsayısında ve Nusselt sayısında önemli artışlar elde edilmiştir. Bu artışlar düşük Reynolds sayılarında daha belirgin olmuş, Reynolds sayısı arttıkça artış oranlarında azalma olduğu görülmüştür.
- %0,5 hacimsel oranlı nanoakışkan için manyetik alan olmadığı durum ile 22, 30 ve 38 mT'lik manyetik alan etkisinde kalan akışkan karşılaştırıldığında ısı transfer katsayıları en yüksek-en düşük Reynolds sayılarında sırasıyla, %0 – 6,70, %1,87 – 12,56 ve %4,5 – 21,19 oranlarında artış göstermiştir.
- Hacimsel oranın artmasıyla manyetik alanın etkisi daha fazla ortaya çıkmıştır. %1 oranlı nanoakışkan için manyetik alan olmadığı ve 22, 30 ve 38 mT'lik manyetik alan etkilerinde kalan nanoakışkanların ısı transfer katsayıları kıyaslandığında, olmadığı durumdan en yüksek-en düşük Reynolds sayılarında sırasıyla, %3,15 – 11,78, %7 – 21,35 ve %10,11 – 27,81 oranlarında artışlar meydana gelmiştir.
- Manyetik alanla birlikte Nusselt sayıları da önemli derecede artış göstermiş ve %0,5 oranlı nanoakışkan için en düşük Reynolds sayısında ve 38 mT manyetik alan etkisi altında, manyetik alan olmadığı duruma göre Nusselt sayısı %22,73 oranında

artmıştır. Hacimsel oran %1 değerine çıkarıldığında bu artış oranı %27,9 seviyesine yükselmiştir.

- Nanoakışkanlar üzerine sabit manyetik alan uygulandığında olduğu gibi alternatif manyetik alan uygulandığında da ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısında artış gözlemlenmiştir. 3 mT yoğunluğa ve 50 Hz frekansa sahip manyetik alan varlığında ısı transfer katsayısı %0,5 ve %1 hacimsel oranlı nanoakışkanlarda saf suya göre sırasıyla, ortalama %19,23 ve %37,25 oranlarında artış göstermiştir.
- Manyetik alan yoğunluğu 5 mT'ye çıkarıldığında ısı transfer katsayısı baz akışkana göre %0,5 ve %1 hacimsel oranlı nanoakışkanlar sırasıyla, ortalama %22,58 ve %42,89'luk artışlar sergilemişlerdir.
- Benzer şekilde AC manyetik alan ile Nusselt sayısında da artışlar meydana gelmiştir. %0,5 oranlı nanoakışkanın Nusselt sayısı saf su ile karşılaştırıldığında, 3 ve 5 mT manyetik alan etkileri altında sırasıyla, ortalama %14,6 ve %17,04 oranlarında artış göstermiştir.
- %1 hacimsel oranlı nanoakışkan saf suyun Nusselt sayısını 3 mT manyetik alan etkisi altında ortalama %30 arttırırken, 5 mT manyetik alan etkisi altında %34,97 oranında artış göstermiştir.
- %0,5 hacimsel oranlı nanoakışkan için, AC manyetik alan etkisinin olduğu durum ile olmadığı durum karşılaştırıldığında 3 mT için ortalama ısı transfer katsayısı artışı %2,5 iken, 5 mT'de bu oran %5,13 seviyesine yükselmiştir.
- %1 oranlı nanoakışkanda ise 3 mT'lik manyetik alan etkisi ile elde edilen artış oranı %3,5 ve 5 mT'lik manyetik alan etkisinde %7,75 olarak tespit edilmiştir.
- Nusselt sayıları, 3 ve 5 mT'lik AC manyetik alan varlığında yokluğuna kıyasla, %0,5'lik nanoakışkan için sırasıyla, %2,95 ve %5,13 oranlarında daha yüksek elde edilmiştir. %1 hacimsel oranlı nanoakışkanda ise bu oranlar %4,05 ve %8,01 olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Aberoumand, S., Jafarimoghaddam, A., Moravej, M., Aberoumand, H., Javaherdeh, K. 2016. Experimental study on the rheological behavior of silver-heat transfer oil nanofluid and suggesting two empirical based correlations for thermal conductivity and viscosity of oil based nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 101, 362-372.
- Abu-Nada, E. 2009. Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al_2O_3 -water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(4), 679-690.
- Abutaleb, A., Imran, M. 2021. Thermal conductivity enhancement for CuO nanoflakes in oil-based and oil blend-based nanofluids. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 68(8), 1400-1404.
- Afrand, M., Rostami, S., Akbari, M., Wongwises, S., Esfe, M. H., Karimipour, A. 2015. Effect of induced electric field on magneto-natural convection in a vertical cylindrical annulus filled with liquid potassium. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 418-426.
- Afrand, M., Toghraie, D., Ruhani, B. 2016b. Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe_3O_4 -Ag/EG hybrid nanofluid: an experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 77, 38-44.
- Afrand, M., Toghraie, D., Sina, N. 2016a. Experimental study on thermal conductivity of water-based Fe_3O_4 nanofluid: development of a new correlation and modeled by artificial neural network. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 75, 262-269.
- Afshari, F., Manay, E., Rahimpour, S., Sahin, B., Muratçobanoğlu, B., Teimuri-Mofrad, R. 2022. A review study on factors affecting the stability of nanofluids. *Heat Transfer Research*, 53(18), 77-91.
- Afshari, F., Muratçobanoğlu, B. 2023. Thermal analysis of Fe_3O_4 /water nanofluid in spiral and serpentine mini channels by using experimental and theoretical models. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 2037-2052.
- Afzal, A., Khan, S. A., Saleel, C. A. 2019. Role of ultrasonication duration and surfactant on characteristics of ZnO and CuO nanofluids. *Materials Research Express*, 6(11), 1150d8.
- Agarwal, D. K., Vaidyanathan, A., Kumar, S. S. 2015. Investigation on convective heat transfer behaviour of kerosene- Al_2O_3 nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 84, 64-73.

- Aguilar, T., Carrillo-Berdugo, I., Alcántara, R., Navas, J. 2022. Enhanced thermophysical properties in spinel CuFe_2O_4 -based nanofluids for concentrated solar power. *International Journal of Energy Research*, 46(4), 4908-4918.
- Akbari, M., Afrand, M., Arshi, A., Karimipour, A. 2017. An experimental study on rheological behavior of ethylene glycol based nanofluid: proposing a new correlation as a function of silica concentration and temperature. *Journal of Molecular Liquids*, 233, 352-357.
- Akilu, S., Baheta, A. T., Sharma, K. V. 2017. Experimental measurements of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol-based hybrid nanofluid with TiO_2 - CuO/C inclusions. *Journal of Molecular Liquids*, 246, 396-405.
- Akoh, H., Tsukasaki, Y., Yatsuya, S., Tasaki, A. 1978. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. *Journal of Crystal Growth*, 45, 495-500.
- Ali, H. M., Babar, H., Shah, T. R., Sajid, M. U., Qasim, M. A., Javed, S. 2018. Preparation techniques of TiO_2 nanofluids and challenges: a review. *Applied Sciences*, 8(4), 587.
- Ali, N., Teixeira, J. A., Addali, A. 2018. A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2018, 6978130.
- Alrashed, A. A., Karimipour, A., Bagherzadeh, S. A., Safaei, M. R., Afrand, M. 2018. Electro-and thermophysical properties of water-based nanofluids containing copper ferrite nanoparticles coated with silica: experimental data, modeling through enhanced ANN and curve fitting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 925-935.
- Alsarraf, J., Rahmani, R., Shahsavar, A., Afrand, M., Wongwises, S., Tran, M. D. 2019. Effect of magnetic field on laminar forced convective heat transfer of $\text{MWCNT-Fe}_3\text{O}_4$ /water hybrid nanofluid in a heated tube. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(5), 1809-1825.
- Altan, C. L., Elkatmis, A., Yüksel, M., Aslan, N., Bucak, S. 2011. Enhancement of thermal conductivity upon application of magnetic field to Fe_3O_4 nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 110(9), 093917.
- Amani, M., Ameri, M., Kasaeian, A. 2017a. Investigating the convection heat transfer of Fe_3O_4 nanofluid in a porous metal foam tube under constant magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82, 439-449.
- Amani, M., Amani, P., Kasaeian, A., Mahian, O., Wongwises, S. 2017b. Thermal conductivity measurement of spinel-type ferrite MnFe_2O_4 nanofluids in the presence of a uniform magnetic field. *Journal of Molecular Liquids*, 230, 121-128.

- Angayarkanni, S. A., Sunny, V., Philip, J. 2015. Effect of nanoparticle size, morphology and concentration on specific heat capacity and thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Nanofluids*, 4(3), 302-309.
- Anonim, 2023a. Web sitesi: <https://shoptr4.nice-ng.org/content?c=iletim%20nedir&id=6>, Erişim Tarihi: 31.03.2023.
- Anonim, 2023b. Web sitesi: <https://www.pinarlar.com/analitik-hassas-terazi-01-mg.-axis-acn220>, Erişim Tarihi: 25.05.2023.
- Anonymous, 2023a. Web sitesi: <https://www.directindustry.com/prod/hielscher/product-24814-789335.html>, Erişim Tarihi: 25.05.2023.
- Anonymous, 2023b. Web sitesi: <https://www.linseis.com/en/products/thermal-conductivity-instruments/thb-basic-advance-ultimate>, Erişim Tarihi: 25.05.2023.
- Anonymous, 2023c. Web sitesi: https://www.aandd.jp/products/test_measuring/sv10/sv10.html, Erişim Tarihi: 25.05.2023.
- Anonymous, 2023d. Web sitesi: <https://www.longerpump.com/index.php/GearPump/show/95.html>, Erişim Tarihi: 25.05.2023.
- Anonymous, 2023e. Web sitesi: <https://kiptm.ru/produktsiya/siemens/koriolisovye-massovye-raskhodomery-massflo-sitrans/sitrans-mass2100>, Erişim Tarihi: 25.05.2023.
- Anonymous, 2023f. Web sitesi: https://www.hioki.com/global/products/multichannel-data-loggers/multichannel/id_5846, Erişim Tarihi: 25.05.2023.
- Anonymous, 2023g. Web sitesi: <https://www.sigmaaldrich.com/TR/tr/sds/aldrich/641669>, Erişim Tarihi: 13.06.2023.
- Anoop, K. B., Sundararajan, T., Das, S. K. 2009. Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(9-10), 2189-2195.
- Anoop, K., Sadr, R., Yu, J., Kang, S., Jeon, S., Banerjee, D. 2012. Experimental study of forced convective heat transfer of nanofluids in a microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(9), 1325-1330.
- Arana, M., Bercoff, P. G., Jacobo, S. E. 2017. Thermomagnetic characterization of organic-based ferrofluids prepared with Ni ferrite nanoparticles. *Materials Science and Engineering: B*, 215, 1-8.
- Arora, N., Gupta, M. 2021. Stability evaluation and enhancement methods in nanofluids: A review. In *AIP Conference Proceedings*, 2341(1), 040022.
- Arora, N., Mukherjee, S., Mishra, P. C., Chakrabarty, S., Chaudhuri, P. 2021. Thermal conductivity enhancement of silica nanofluids for ultrafast cooling applications:

Statistical modeling and economic analysis. *International Journal of Thermophysics*, 42(5), 1-22.

Arshad, W., Ali, H. M. 2017. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a straight minichannel heat sink using TiO_2 nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 248-256.

Asadi, A., Alarifi, I. M. 2020. Effects of ultrasonication time on stability, dynamic viscosity, and pumping power management of MWCNT-water nanofluid: An experimental study. *Scientific Reports*, 10(1), 1-10.

Asadi, A., Asadi, M., Rezaei, M., Siahmargoi, M., Asadi, F. 2016. The effect of temperature and solid concentration on dynamic viscosity of MWCNT/MgO (20–80)–SAE50 hybrid nano-lubricant and proposing a new correlation: An experimental study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78, 48-53.

Asadi, A., Asadi, M., Siahmargoi, M., Asadi, T., Andarati, M. G. 2017. The effect of surfactant and sonication time on the stability and thermal conductivity of water-based nanofluid containing $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nanoparticles: An experimental investigation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 191-198.

Asadi, A., Pourfattah, F., Szilágyi, I. M., Afrand, M., Żyła, G., Ahn, H. S., Wongwises, S., Nguyen, H. M., Arabkoohsar, A., Mahian, O. 2019. Effect of sonication characteristics on stability, thermophysical properties, and heat transfer of nanofluids: A comprehensive review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104701.

Ashjaee, M., Goharkhah, M., Khadem, L. A., Ahmadi, R. 2015. Effect of magnetic field on the forced convection heat transfer and pressure drop of a magnetic nanofluid in a miniature heat sink. *Heat and Mass Transfer*, 51(7), 953-964.

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(21-22), 4331-4341.

Aydın, D. Y., Aydın, E., Gürü, M. 2023. The effects of particle mass fraction and static magnetic field on the thermal performance of NiFe_2O_4 nanofluid in a heat pipe. *International Journal of Thermal Sciences*, 183, 107875.

Aytaç, İ. 2022. Experimental investigation on heat transfer performance of Fe_2O_3 /Water and Fe_3O_4 /Water nanofluids in a plate heat exchanger. *Heat Transfer Research*, 53(15).

Azmi, W. H., Sharma, K. V., Mamat, R., Alias, A. B. S., Misnon, I. I. 2012. Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 36(1), 012029.

- Babar, H., Ali, H. M. 2019. Towards hybrid nanofluids: preparation, thermophysical properties, applications, and challenges. *Journal of Molecular Liquids*, 281, 598-633.
- Babita, Sharma, S. K., Gupta, S. M. 2016. Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 79, 202-212.
- Bakhtiari, R., Kamkari, B., Afrand, M., Abdollahi, A. 2021. Preparation of stable TiO₂-Graphene/Water hybrid nanofluids and development of a new correlation for thermal conductivity. *Powder Technology*, 385, 466-477.
- Bang, I. C., Chang, S. H. 2005. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nano-fluids from a plain surface in a pool. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(12), 2407-2419.
- Baratpour, M., Karimipour, A., Afrand, M., Wongwises, S. 2016. Effects of temperature and concentration on the viscosity of nanofluids made of single-wall carbon nanotubes in ethylene glycol. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 74, 108-113.
- Batchelor, G. K. 1977. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of Fluid Mechanics*, 83(1), 97-117.
- Beck, M. P., Yuan, Y., Warriar, P., Teja, A. S. 2010. The thermal conductivity of aqueous nanofluids containing ceria nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 107(6), 066101.
- Bhattacharya, P. S. S. K., 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.
- Brinkman, H. C. 1952. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20(4), 571-571.
- Bruggeman, V. D. 1935. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen. I. dielektrizitätskonstanten und leitfähigkeiten der mischkörper aus isotropen substanzen. *Annalen Der Physik*, 416(7), 636-664.
- Buongiorno, J. 2006. Convective transport in nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 128(3), 240-250.
- Cacua, K., Ordoñez, F., Zapata, C., Herrera, B., Pabón, E., Buitrago-Sierra, R. 2019. Surfactant concentration and pH effects on the zeta potential values of alumina nanofluids to inspect stability. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, 583, 123960.
- Cakmak, N. K., Said, Z., Sundar, L. S., Ali, Z. M., Tiwari, A. K. 2020. Preparation, characterization, stability, and thermal conductivity of rGO-Fe₃O₄-TiO₂ hybrid nanofluid: An experimental study. *Powder Technology*, 372, 235-245.

- Cengel, Y. A., Ghajar, A. 2011. Heat and mass transfer: A practical approach, SI version. McGraw-Hill Education, 671, New York, USA.
- Chandrasekar, M., Suresh, S., Srinivasan, R., Bose, A. C. 2009. New analytical models to investigate thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 9(1), 533-538.
- Chang, M. H., Liu, H. S., Tai, C. Y. 2011. Preparation of copper oxide nanoparticles and its application in nanofluid. *Powder Technology*, 207(1-3), 378-386.
- Charles, S. W. 2002. The preparation of magnetic fluids. In *ferrofluids*. Springer publishing, 3-18, Berlin, Heidelberg.
- Chaturvedi, K. R., Triverdi, J., Sharma, T. 2020. Single-step silica nanofluid for improved carbon dioxide flow and reduced formation damage in porous media for carbon utilization. *Energy*, 197, 117276.
- Chavan, D., Pise, A. 2019. Experimental investigation of effective viscosity and density of nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 16, 504-515.
- Chen, H., Ding, Y., Tan, C. 2007. Rheological behaviour of nanofluids. *New Journal of Physics*, 9(10), 367.
- Chevalier, J., Tillement, O., Ayela, F. 2007. Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. *Applied Physics Letters*, 91(23), 233103.
- Choi, S. U., Eastman, J. A. 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29. Argonne National Lab., 196525, United States.
- Chon, C. H., Kihm, K. D., Lee, S. P., Choi, S. U. 2005. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*, 87(15), 153107.
- Choudhary, S., Sachdeva, A., Kumar, P. 2020. Investigation of the stability of MgO nanofluid and its effect on the thermal performance of flat plate solar collector. *Renewable Energy*, 147, 1801-1814.
- Colangelo, G., Favale, E., Miglietta, P., Milanese, M., De Risi, A. 2016. Thermal conductivity, viscosity and stability of Al_2O_3 -diathermic oil nanofluids for solar energy systems. *Energy*, 95, 124-136.
- Corcione, M. 2011. Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 789-793.
- Çolak, A. B., Yıldız, O., Bayrak, M., Tezekici, B. S. 2020. Experimental study for predicting the specific heat of water based Cu- Al_2O_3 hybrid nanofluid using

- artificial neural network and proposing new correlation. *International Journal of Energy Research*, 44(9), 7198-7215.
- Dang, T., Teng, J. T. 2011. Comparisons of the heat transfer and pressure drop of the microchannel and minichannel heat exchangers. *Heat and Mass Transfer*, 47(10), 1311-1322.
- Das, P. K., Islam, N., Santra, A. K., Ganguly, R. 2017. Experimental investigation of thermophysical properties of Al_2O_3 -water nanofluid: Role of surfactants. *Journal of Molecular Liquids*, 237, 304-312.
- De Bruijn, H. 1942. The viscosity of suspensions of spherical particles. (The fundamental η -c and ϕ relations). *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, 61(12), 863-874.
- Dehaj, M. S., Rezaeian, M., Mousavi, D., Shamsi, S., Salarmofrad, M. 2021. Efficiency of the parabolic through solar collector using NiFe_2O_4 /Water nanofluid and U-tube. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 120, 136-149.
- Dehkordi, B. A. F., Abdollahi, A. 2018. Experimental investigation toward obtaining the effect of interfacial solid-liquid interaction and basefluid type on the thermal conductivity of CuO-loaded nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 97, 151-162.
- Devendiran, D. K., Amirtham, V. A. 2016. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 21-40.
- Dinarvand, M., Abolhasani, M., Hormozi, F., Bahrami, Z. 2023. Experimental investigation and performance comparison of Fe_3O_4 /water and CoFe_2O_4 /water ferrofluids in presence of a magnetic field in a cooling system. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 148, 104927.
- 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(1-2), 240-250.
- Dixit, T., Ghosh, I. 2015. Review of micro-and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1298-1311.
- Dong, J., Zheng, Q., Xiong, C., Sun, E., Chen, J. 2022. Experimental investigation and application of stability and thermal characteristics of SiO_2 -ethylene-glycol/water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 176, 107533.
- Duangthongsuk, W., Wongwises, S. 2009. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO_2 -water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(4), 706-714.

- Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., Thompson, L. J. 2001. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 78(6), 718-720.
- Ebrahimi, S., Saghravani, S. F. 2017. Influence of magnetic field on the thermal conductivity of the water based mixed $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$ nanofluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 441, 366-373.
- Einstein, A. 1905. Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. Doctoral Dissertation, Universität Zürich, 24, ETH Zurich.
- Elias, M. M., Mahbubul, I. M., Saidur, R., Sohel, M. R., Shahrul, I. M., Khaleduzzaman, S. S., Sadeghipour, S. 2014. Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al_2O_3 nanoparticles suspended in car radiator coolant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 54, 48-53.
- Esfe, M. H., Afrand, M., Karimipour, A., Yan, W. M., Sina, N. 2015a. An experimental study on thermal conductivity of MgO nanoparticles suspended in a binary mixture of water and ethylene glycol. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, 173-175.
- Esfe, M. H., Afrand, M., Yan, W. M., Akbari, M. 2015b. Applicability of artificial neural network and nonlinear regression to predict thermal conductivity modeling of Al_2O_3 -water nanofluids using experimental data. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66, 246-249.
- Esfe, M. H., Saedodin, S., Rejvani, M., Shahram, J. 2017. Experimental investigation, model development and sensitivity analysis of rheological behavior of $\text{ZnO}/10\text{W}40$ nano-lubricants for automotive applications. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 90, 194-203.
- Esmaeili, E., Chaydareh, R. G., Rounaghi, S. A. 2017. The influence of the alternating magnetic field on the convective heat transfer properties of Fe_3O_4 -containing nanofluids through the Neel and Brownian mechanisms. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1212-1219.
- Farajollahi, B., Etemad, S. G., Hojjat, M. 2010. Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1-3), 12-17.
- Ferrouillat, S., Bontemps, A., Poncelet, O., Soriano, O., Gruss, J. A. 2013. Influence of nanoparticle shape factor on convective heat transfer and energetic performance of water-based SiO_2 and ZnO nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2), 839-851.
- Fuskele, V., Sarviya, R. M. 2017. Recent developments in nanoparticles synthesis, preparation and stability of nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 4049-4060.

- Garg, J., Poudel, B., Chiesa, M., Gordon, J. B., Ma, J. J., Wang, J. B., Ren, Z. F., Kang, Y. T., Ohtani, H., Nanda, J., McKinley, G. H., Chen, G. J. 2008. Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid. *Journal of Applied Physics*, 103(7), 074301.
- Garoosi, F. 2020. Presenting two new empirical models for calculating the effective dynamic viscosity and thermal conductivity of nanofluids. *Powder Technology*, 366, 788-820.
- Gavili, A., Zabihi, F., Isfahani, T. D., Sabbaghzadeh, J. 2012. The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 41, 94-98.
- Ghanbarpour, M., Haghigi, E. B., Khodabandeh, R. 2014. Thermal properties and rheological behavior of water based Al_2O_3 nanofluid as a heat transfer fluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53, 227-235.
- Ghasemi, S., Karimipour, A. 2018. Experimental investigation of the effects of temperature and mass fraction on the dynamic viscosity of CuO-paraffin nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 128, 189-197.
- Ghofrani, A., Dibaei, M. H., Sima, A. H., Shafii, M. B. 2013. Experimental investigation on laminar forced convection heat transfer of ferrofluids under an alternating magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 193-200.
- Ghozatloo, A., Rashidi, A. M., Shariaty-Niasar, M. 2014. Effects of surface modification on the dispersion and thermal conductivity of CNT/water nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 54, 1-7.
- Giwa, S. O., Sharifpur, M., Goodarzi, M., Alsulami, H., Meyer, J. P. 2021. Influence of base fluid, temperature, and concentration on the thermophysical properties of hybrid nanofluids of alumina–ferrofluid: experimental data, modeling through enhanced ANN, ANFIS, and curve fitting. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 4149-4167.
- Giwa, S. O., Sharifpur, M., Meyer, J. P. 2020. Experimental investigation into heat transfer performance of water-based magnetic hybrid nanofluids in a rectangular cavity exposed to magnetic excitation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 116, 104698.
- Goharkhah, M., Salarian, A., Ashjaee, M., Shahabadi, M. 2015. Convective heat transfer characteristics of magnetite nanofluid under the influence of constant and alternating magnetic field. *Powder Technology*, 274, 258-267.
- Gunnasegaran, P., Mohammed, H. A., Shuaib, N. H., Saidur, R. 2010. The effect of geometrical parameters on heat transfer characteristics of microchannels heat sink with different shapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(8), 1078-1086.

- Gupta, M., Singh, V., Kumar, R., Said, Z. 2017. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638-670.
- Gupta, M., Singh, V., Said, Z. 2020. Heat transfer analysis using zinc Ferrite/water (Hybrid) nanofluids in a circular tube: An experimental investigation and development of new correlations for thermophysical and heat transfer properties. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 100720.
- Guzei, D. V., Minakov, A. V., Rudyak, V. Y. 2019. On efficiency of convective heat transfer of nanofluids in laminar flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139, 180-192.
- Hamid, K. A., Azmi, W. H., Nabil, M. F., Mamat, R., Sharma, K. V. 2018. Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO_2 - SiO_2 nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 1143-1152.
- Hamilton, R. L., Crosser, O. K. 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3), 187-191.
- Harandi, S. S., Karimipour, A., Afrand, M., Akbari, M., D'Orazio, A. 2016. An experimental study on thermal conductivity of F-MWCNTs- Fe_3O_4 /EG hybrid nanofluid: effects of temperature and concentration. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 171-177.
- Hassani, S., Saidur, R., Mekhilef, S., Hepbasli, A. 2015. A new correlation for predicting the thermal conductivity of nanofluids; using dimensional analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 121-130.
- Hatami, N., Banari, A. K., Malekzadeh, A., Pouranfard, A. R. 2017. The effect of magnetic field on nanofluids heat transfer through a uniformly heated horizontal tube. *Physics Letters A*, 381(5), 510-515.
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., Lu, H. 2007. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO_2 nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(11-12), 2272-2281.
- Hemmat Esfe, M., 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(3), 1817-1824.
- Ho, C. J., Chen, W. C. 2013. An experimental study on thermal performance of Al_2O_3 /water nanofluid in a minichannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 516-522.

- Hong, T. K., Yang, H. S., Choi, C. J. 2005. Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 97(6), 064311.
- Hu, X., Yin, D., Chen, X., Xiang, G. 2020. Experimental investigation and mechanism analysis: Effect of nanoparticle size on viscosity of nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 314, 113604.
- Huminic, A., Huminic, G., Fleaca, C., Dumitrache, F., Morjan, I. 2015. Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FeC nanoparticles. *Powder Technology*, 284, 78-84.
- Huminic, G., Huminic, A., Fleacă, C., Dumitrache, F., Morjan, I. 2021. Experimental study on viscosity of water based Fe-Si hybrid nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114938.
- Hwang, Y. J., 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. *Thermochimica Acta*, 455(1-2), 70-74.
- Hwang, Y., Park, H. S., Lee, J. K., Jung, W. H. 2006. Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. *Current Applied Physics*, 6, e67-e71.
- Ilyas, S. U., Pendyala, R., Marneni, N. 2017. Stability of nanofluids. In *Engineering Applications of Nanotechnology*, Springer, Cham, 1-31.
- Ilyas, S. U., Pendyala, R., Narahari, M., Susin, L. 2017. Stability, rheology and thermal analysis of functionalized alumina-thermal oil-based nanofluids for advanced cooling systems. *Energy Conversion and Management*, 142, 215-229.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 2010. *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri 4. Basım'dan Çeviri*. Literatür Yayıncılık, 960, İstanbul, Türkiye.
- Incropera, F.P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 6, 408-409, New York.
- Jacimovic, B., Genic, S., Lelea, D. 2018. Calculation of the heat transfer coefficient for laminar flow in pipes in practical engineering applications. *Heat Transfer Engineering*, 39(20), 1790-1796.
- Jamshidi, N., Farhadi, M., Ganji, D. D., Sedighi, K. 2012. Experimental investigation on the viscosity of nanofluids. *International Journal of Engineering*, 25(3), 201-209.
- Jarahnejad, M., Haghighi, E. B., Saleemi, M., Nikkam, N., Khodabandeh, R., Palm, B., Toprak, M. S., Muhammed, M. 2015. Experimental investigation on viscosity of water-based Al₂O₃ and TiO₂ nanofluids. *Rheologica Acta*, 54(5), 411-422.
- Jeong, J., Li, C., Kwon, Y., Lee, J., Kim, S. H., Yun, R. 2013. Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids. *International Journal of Refrigeration*, 36(8), 2233-2241.

- Kakavandi, A., Akbari, M. 2018. Experimental investigation of thermal conductivity of nanofluids containing of hybrid nanoparticles suspended in binary base fluids and propose a new correlation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 742-751.
- Kandlikar, S. G. 2002. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(2-4), 389-407.
- Kang, S. W., Wang, Y. C., Liu, Y. C., Lo, H. M. 2017. Visualization and thermal resistance measurements for a magnetic nanofluid pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 126, 1044-1050.
- Karamallah, A. A., Habeeb, L. J., Asker, A. H. 2016. The effect of magnetic field with nanofluid on heat transfer in a horizontal pipe. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 12(3), 99-109.
- Karimi, A., Afghahi, S. S. S., Shariatmadar, H., Ashjaee, M. 2014. Experimental investigation on thermal conductivity of MFe_2O_4 ($M=Fe$ and Co) magnetic nanofluids under influence of magnetic field. *Thermochimica Acta*, 598, 59-67.
- Karimi-Nazarabad, M., Goharshadi, E. K., Youssefi, A. 2016. Particle shape effects on some of the transport properties of tungsten oxide nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 223, 828-835.
- Karimipour, A., Bagherzadeh, S. A., Goodarzi, M., Alnaqi, A. A., Bahiraei, M., Safaei, M. R., Shadloo, M. S. 2018. Synthesized $CuFe_2O_4/SiO_2$ nanocomposites added to water/EG: evaluation of the thermophysical properties beside sensitivity analysis and EANN. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 1169-1179.
- Katiyar, A., Dhar, P., Nandi, T., Das, S. K. 2016. Enhanced heat conduction characteristics of Fe, Ni and Co nanofluids influenced by magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 78, 345-353.
- Kazemi-Beydokhti, A., Meyghani, N., Samadi, M., Hajiabadi, S. H. 2019. Surface modification of carbon nanotube: Effects on pulsating heat pipe heat transfer. *Chemical Engineering Research and Design*, 152, 30-37.
- Khan, W. A., Khan, Z. H., Haq, R. U. 2015. Flow and heat transfer of ferrofluids over a flat plate with uniform heat flux. *The European Physical Journal Plus*, 130(4), 1-10.
- Khanafer, K., Vafai, K. 2011. A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(19-20), 4410-4428.
- Kharat, P. B., Jadhav, S. A., Deshmukh, S. S., Keche, A. P., More, S. D., Sarnaik, M. N., Jadhav, K. M. 2019. Evaluation of thermal conductivity of the $NiFe_2O_4$ ferrofluids under influence of magnetic field. In *AIP Conference Proceedings*, 2115(1), 030523.

- Kharat, P. B., Somvanshi, S. B., Khirade, P. P., Jadhav, K. M. 2020. Effect of magnetic field on thermal conductivity of the cobalt ferrite magnetic nanofluids. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1644(1), 012028.
- Khedkar, R. S., Shrivastava, N., Sonawane, S. S., Wasewar, K. L. 2016. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of TiO₂-ethylene glycol nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 73, 54-61.
- Khosrojerdi, S., Vakili, M., Yahyaei, M., Kalhor, K. 2016. Thermal conductivity modeling of graphene nanoplatelets/deionized water nanofluid by MLP neural network and theoretical modeling using experimental results. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 74, 11-17.
- Kim, H. J., Lee, S. H., Lee, J. H., Jang, S. P. 2015. Effect of particle shape on suspension stability and thermal conductivities of water-based bohemite alumina nanofluids. *Energy*, 90, 1290-1297.
- Klazly, M., Bognár, G. 2022. A novel empirical equation for the effective viscosity of nanofluids based on theoretical and empirical results. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 135, 106054.
- Kline, S. J., McClintock, F. A. 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. *ASME Mechanical Engineering*, 75(3), 3-8.
- Kole, M., Dey, T. K. 2012. Effect of prolonged ultrasonication on the thermal conductivity of ZnO-ethylene glycol nanofluids. *Thermochimica Acta*, 535, 58-65.
- Koo, J., Kleinstreuer, C. 2004. A new thermal conductivity model for nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 6(6), 577-588.
- Kulkarni, D. P., Das, D. K., Chukwu, G. A. 2006. Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension (nanofluid). *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6(4), 1150-1154.
- Kumanek, B., Janas, D. 2019. Thermal conductivity of carbon nanotube networks: A review. *Journal of Materials Science*, 54(10), 7397-7427.
- Kumar, A., Subudhi, S. 2018. Preparation, characteristics, convection and applications of magnetic nanofluids: A review. *Heat and Mass Transfer*, 54(2), 241-265.
- Kumar, P. M., Kumar, J., Sendhilnathan, S. 2010. Theoretical model to determine the thermal conductivity of nanofluids. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(7), 2846-2852.
- Kumar, V., Sahoo, R. R. 2019. Viscosity and thermal conductivity comparative study for hybrid nanofluid in binary base fluids. *Heat Transfer-Asian Research*, 48(7), 3144-3161.

- Kumar, V., Sarkar, J. 2019. Numerical and experimental investigations on heat transfer and pressure drop characteristics of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ hybrid nanofluid in minichannel heat sink with different mixture ratio. *Powder Technology*, 345, 717-727.
- Kumaresan, V., Velraj, R. 2012. Experimental investigation of the thermo-physical properties of water-ethylene glycol mixture based CNT nanofluids. *Thermochimica Acta*, 545, 180-186.
- Kwek, D., Crivoi, A., Duan, F. 2010. Effects of temperature and particle size on the thermal property measurements of Al_2O_3 -water nanofluids. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 55(12), 5690-5695.
- Lajvardi, M., Moghimi-Rad, J., Hadi, I., Gavili, A., Isfahani, T. D., Zabihi, F., Sabbaghzadeh, J. 2010. Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(21), 3508-3513.
- Lee, A., Jeon, Y., Chinnasamy, V., Cho, H. 2021. Investigation of forced convective heat transfer with magnetic field effect on water/ethylene glycol-cobalt zinc ferrite nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 128, 105647.
- Lee, J. H., Hwang, K. S., Jang, S. P., Lee, B. H., Kim, J. H., Choi, S. U., Choi, C. J. 2008. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al_2O_3 nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(11-12), 2651-2656.
- Lee, J. H., Lee, S. H., Pil Jang, S. 2014. Do temperature and nanoparticle size affect the thermal conductivity of alumina nanofluids?. *Applied Physics Letters*, 104(16), 161908.
- Lee, S. W., 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(1-3), 433-438.
- 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(2), 245-254.
- Li, C. H., Peterson, G. P. 2006. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *Journal of Applied Physics*, 99(8), 084314.
- Li, H., Wang, L., He, Y., Hu, Y., Zhu, J., Jiang, B. 2015. Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 88, 363-368.
- Li, Q., Xuan, Y., Wang, J. 2005. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30(2), 109-116.

- Li, X., Chen, Y., Mo, S., Jia, L., Shao, X. 2014. Effect of surface modification on the stability and thermal conductivity of water-based SiO₂-coated graphene nanofluid. *Thermochimica Acta*, 595, 6-10.
- Li, X., Zou, C., Chen, W., Lei, X. 2016. Experimental investigation of β -cyclodextrin modified carbon nanotubes nanofluids for solar energy systems: Stability, optical properties and thermal conductivity. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 572-579.
- Li, Y., Tung, S., Schneider, E., Xi, S. 2009. A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology*, 196(2), 89-101.
- Lienhard, I. V., John, H. 2005. A heat transfer textbook. Phlogiston Press, 771, USA.
- Liu, M. S., Lin, M. C. C., Tsai, C. Y., Wang, C. C. 2006. Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(17-18), 3028-3033.
- Ma, M., Zhai, Y., Yao, P., Li, Y., Wang, H. 2021. Effect of surfactant on the rheological behavior and thermophysical properties of hybrid nanofluids. *Powder Technology*, 379, 373-383.
- Ma, X., Song, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Xu, J., Yao, S., Vafai, K. 2022. Experimental study of boiling heat transfer for a novel type of GNP-Fe₃O₄ hybrid nanofluids blended with different nanoparticles. *Powder Technology*, 396, 92-112.
- Mahbubul, I. M., Elcioglu, E. B., Saidur, R., Amalina, M. A. 2017. Optimization of ultrasonication period for better dispersion and stability of TiO₂-water nanofluid. *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 360-367.
- Maheshwary, P. B., Handa, C. C., Nemade, K. R. 2017. A comprehensive study of effect of concentration, particle size and particle shape on thermal conductivity of titania/water based nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 119, 79-88.
- Maiga, S. E. B., Palm, S. J., Nguyen, C. T., Roy, G., Galanis, N. 2005. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 26(4), 530-546.
- Malekzadeh, A., Pouranfard, A. R., Hatami, N., Kazemnejad Banari, A., Rahimi, M. R. 2016. Experimental investigations on the viscosity of magnetic nanofluids under the influence of temperature, volume fractions of nanoparticles and external magnetic field. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9(2), 693-697.
- Malvandi, A., Ganji, D. D. 2014. Magnetic field effect on nanoparticles migration and heat transfer of water/alumina nanofluid in a channel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 362, 172-179.
- Mandev, E. 2017. Mikrokanallarda nanoakışkanların karma taşınımıyla ısı transferi karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı, 181, Erzurum.

- Mandev, E., Manay, E. 2022. Effects of surface roughness in multiple microchannels on mixed convective heat transfer. *Applied Thermal Engineering*, 217, 119102.
- Masoumi, N., Sohrabi, N., Behzadmehr, A. 2009. A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(5), 055501.
- Maxwell, J. C. 1873. *A treatise on electricity and magnetism*. Clarendon Press, 333-335, England.
- Maxwell, J. C. 1881. *A treatise on electricity and magnetism*. Clarendon Press, 314, Oxford, England.
- Megatif, L., Ghozatloo, A., Arimi, A., Shariati-Niasar, M. 2016. Investigation of laminar convective heat transfer of a novel TiO₂–carbon nanotube hybrid water-based nanofluid. *Experimental Heat Transfer*, 29(1), 124-138.
- Mehendale, S. S., Jacobi, A. M., Shah, R. K. 2000. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design. *Applied Mechanics Reviews*, 53(7), 175-193.
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Akhiani, A. R., Latibari, S. T., Metselaar, H. S. C., Kherbeet, A. S., Mehrali, M. 2017. Heat transfer and entropy generation analysis of hybrid graphene/Fe₃O₄ ferro-nanofluid flow under the influence of a magnetic field. *Powder Technology*, 308, 149-157.
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S. T., Kazi, S. N., Mehrali, M., Zubir, M. N. B. M., Metselaar, H. S. C. 2014. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 1-12.
- Meriläinen, A., Seppälä, A., Saari, K., Seitsonen, J., Ruokolainen, J., Puisto, S., Rostedt, N., Ala-Nissila, T. 2013. Influence of particle size and shape on turbulent heat transfer characteristics and pressure losses in water-based nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 61, 439-448.
- Meybodi, M. K., Daryasafar, A., Koochi, M. M., Moghadasi, J., Meybodi, R. B., Ghahfarokhi, A. K. 2016. A novel correlation approach for viscosity prediction of water based nanofluids of Al₂O₃, TiO₂, SiO₂ and CuO. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 58, 19-27.
- Mills, A. F., Coimbra, C. F. M. 2015. *Basic heat and mass transfer*. Temporal Publishing, LLC, 1001, San Diego, USA.
- Minakov, A. V., Guzei, D. V., Pryazhnikov, M. I., Zhigarev, V. A., Rudyak, V. Y. 2016. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 745-755.

- Minakov, A. V., Rudyak, V. Y., Pryazhnikov, M. I. 2021. Systematic experimental study of the viscosity of nanofluids. *Heat Transfer Engineering*, 42(12), 1024-1040.
- Mintsa, H. A., Roy, G., Nguyen, C. T., Doucet, D. 2009. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(2), 363-371.
- Mishra, P. C., Mukherjee, S., Nayak, S. K., Panda, A. 2014. A brief review on viscosity of nanofluids. *International Nano Letters*, 4(4), 109-120.
- Miyazawa, T., Itaya, M., Burdeos, G. C., Nakagawa, K., Miyazawa, T. 2021. A critical review of the use of surfactant-coated nanoparticles in nanomedicine and food nanotechnology. *International Journal of Nanomedicine*, 16, 3937.
- Moghadam, I. P., Afrand, M., Hamad, S. M., Barzinjy, A. A., Talebizadehsardari, P. 2020. Curve-fitting on experimental data for predicting the thermal-conductivity of a new generated hybrid nanofluid of graphene oxide-titanium oxide/water. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 548, 122140.
- Mohammed, H. A., Gunnasegaran, P., Shuaib, N. H. 2011. Numerical simulation of heat transfer enhancement in wavy microchannel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(1), 63-68.
- Mohebbi, A. 2012. Prediction of specific heat and thermal conductivity of nanofluids by a combined equilibrium and non-equilibrium molecular dynamics simulation. *Journal of Molecular Liquids*, 175, 51-58.
- Moldoveanu, G. M., Huminic, G., Minea, A. A., Huminic, A. 2018. Experimental study on thermal conductivity of stabilized Al_2O_3 and SiO_2 nanofluids and their hybrid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 450-457.
- Moldoveanu, G. M., Minea, A. A. 2019. Specific heat experimental tests of simple and hybrid oxide-water nanofluids: proposing new correlation. *Journal of Molecular Liquids*, 279, 299-305.
- Mondragon, R., Julia, J. E., Barba, A., Jarque, J. C. 2012. Characterization of silica–water nanofluids dispersed with an ultrasound probe: A study of their physical properties and stability. *Powder Technology*, 224, 138-146.
- Moradi, A., Zareh, M., Afrand, M., Khayat, M. 2020. Effects of temperature and volume concentration on thermal conductivity of TiO_2 -MWCNTs (70-30)/EG-water hybrid nano-fluid. *Powder Technology*, 362, 578-585.
- Motozawa, M., Chang, J., Sawada, T., Kawaguchi, Y. 2010. Effect of magnetic field on heat transfer in rectangular duct flow of a magnetic fluid. *Physics Procedia*, 9, 190-193.
- Mousavi, S. M., Esmaeilzadeh, F., Wang, X. P. 2019. A detailed investigation on the thermo-physical and rheological behavior of MgO/TiO_2 aqueous dual hybrid nanofluid. *Journal of Molecular Liquids*, 282, 323-339.

- Muhammad, U. A., Bhattacharyya, D., Endrino, J. L., Fereres, S. 2021. Preparation of binary nanofluid with heat transfer additives by particle surface functionalisation. *Emergent Materials*, 4(6), 1649-1664.
- Mukherjee, S., Paria, S. 2013. Preparation and stability of nanofluids-a review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 9(2), 63-69.
- Munkhbayar, B., Tanshen, M. R., Jeoun, J., Chung, H., Jeong, H. 2013. Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics. *Ceramics International*, 39(6), 6415-6425.
- Nabil, M. F., Azmi, W. H., Hamid, K. A., Mamat, R., Hagos, F. Y. 2017. An experimental study on the thermal conductivity and dynamic viscosity of $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ nanofluids in water: ethylene glycol mixture. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 86, 181-189.
- Nadooshan, A. A., Eshgarf, H., Afrand, M. 2018. Measuring the viscosity of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-MWCNTs/EG}$ hybrid nanofluid for evaluation of thermal efficiency: Newtonian and non-Newtonian behavior. *Journal of Molecular Liquids*, 253, 169-177.
- Nagvenkar, A. P., Shani, L., Felner, I., Perelshtein, I., Gedanken, A., Yeshurun, Y. 2018. Surfactant effect on the thermal and electrical behaviors of sonochemically synthesized Fe and Fe-PVP nanofluids and insight into the magnetism of their in situ oxidized $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ analogues. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(36), 20755-20762.
- Namburu, P. K., Das, D. K., Tanguturi, K. M., Vajjha, R. S. 2009. Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(2), 290-302.
- Namburu, P. K., Kulkarni, D. P., Dandekar, A., Das, D. K. 2007. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids. *Micro and Nano Letters*, 2(3), 67-71.
- Nellis, G., Klein, S. 2008. *Heat transfer*. Cambridge University Press, 1148, United Kingdom.
- Nguyen, C. T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, E., Mintsa, H. A. 2007. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids-hysteresis phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(6), 1492-1506.
- Nikkam, N., Ghanbarpour, M., Khodabandeh, R., Toprak, M. S. 2017. The effect of particle size and base liquid on thermo-physical properties of ethylene and diethylene glycol based copper micro-and nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 86, 143-149.

- Nine, M. J., Chung, H., Tanshen, M. R., Osman, N. A., Jeong, H. 2014. Is metal nanofluid reliable as heat carrier?. *Journal of Hazardous Materials*, 273, 183-191.
- Nithiyanantham, U., González-Fernández, L., Grosu, Y., Zaki, A., Igartua, J. M., Faik, A. 2020. Shape effect of Al_2O_3 nanoparticles on the thermophysical properties and viscosity of molten salt nanofluids for TES application at CSP plants. *Applied Thermal Engineering*, 169, 114942.
- Nkurikiyimfura, I., Wang, Y., Pan, Z. 2013a. Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids- a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 548-561.
- Nkurikiyimfura, I., Wang, Y., Pan, Z. 2013b. Effect of chain-like magnetite nanoparticle aggregates on thermal conductivity of magnetic nanofluid in magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 607-612.
- Odenbach, S. 1998. Ferrofluids-magnetisable liquids and their application in density separation. *Magnetic and Electrical Separation*, 9, 1-25.
- Odenbach, S. 2004. Recent progress in magnetic fluid research. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 16(32), R1135.
- O'Hanley, H., Buongiorno, J., McKrell, T., Hu, L. W. 2012. Measurement and model validation of nanofluid specific heat capacity with differential scanning calorimetry. *Advances in Mechanical Engineering*, 4, 181079.
- Oliveira, A. G., Filhol, B. E. P., Wen, D. 2014. Synthesis and characterization of silver/water nanofluids. *High Temperatures-High Pressures*, 43(1), 69-83.
- Omrani, A. N., Esmaeilzadeh, E., Jafari, M., Behzadmehr, A. 2019. Effects of multi walled carbon nanotubes shape and size on thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *Diamond and Related Materials*, 93, 96-104.
- Ortiz-Salazar, M., Pech-May, N. W., Vales-Pinzon, C., Medina-Esquivel, R., Alvarado-Gil, J. J. 2018. Magnetic field induced tunability on the thermal conductivity of ferrofluids loaded with carbon nanofibers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(7), 075003.
- Pak, B. C., Cho, Y. I. 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11(2), 151-170.
- Pakdaman, M. F., Akhavan-Behabadi, M. A., Razi, P. 2012. An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 40, 103-111.
- Pantzali, M. N., Mouza, A. A., Paras, S. V. 2009. Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE). *Chemical Engineering Science*, 64(14), 3290-3300.

- Pare, A., Ghosh, S. K. 2021. A unique thermal conductivity model (ANN) for nanofluid based on experimental study. *Powder Technology*, 377, 429-438.
- Parekh, K. 2014. Thermo-magnetic properties of ternary polydispersed $\text{Mn}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite magnetic fluid. *Solid State Communications*, 187, 33-37.
- Parekh, K., Lee, H. S. 2010. Magnetic field induced enhancement in thermal conductivity of magnetite nanofluid. *Journal of Applied Physics*, 107(9), 09A310.
- Paul, G., Chopkar, M., Manna, I., Das, P. K. 2010. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1913-1924.
- Petzold, G., Rojas-Reyna, R., Mende, M., Schwarz, S. 2009. Application relevant characterization of aqueous silica nanodispersions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 30(8), 1216-1222.
- Philip, J., Shima, P. D., Raj, B. 2007. Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structures. *Applied Physics Letters*, 91(20), 203108.
- Pil Jang, S., Choi, S. U. 2007. Effects of various parameters on nanofluid thermal conductivity. *Journal of Heat Transfer*, 129(5), 617-623.
- Pryazhnikov, M. I., Minakov, A. V., Rudyak, V. Y., Guzei, D. V. 2017. Thermal conductivity measurements of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 1275-1282.
- Qi, C., Tang, J., Fan, F., Yan, Y. 2020. Effects of magnetic field on thermo-hydraulic behaviors of magnetic nanofluids in CPU cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115717.
- Qin, Z. B., Tan, L., Liu, Z. Q., Chen, S., Qin, J. H., Tang, J. J., Li, N. 2016. One-pot synthesis of ultrafine TiO_2 nanoparticles with enhanced thermal conductivity for nanofluid applications. *Advanced Powder Technology*, 27(2), 299-304.
- Ran, X., Yu, X., Zou, Q. 2017. Effect of particle concentration on tribological properties of ZnO nanofluids. *Tribology Transactions*, 60(1), 154-158.
- Rea, U., McKrell, T., Hu, L. W., Buongiorno, J. 2009. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina–water and zirconia–water nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8), 2042-2048.
- Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., Cho, Y. I. 1998. *Handbook of heat transfer*. McGraw-Hill, 1501, New York, USA.
- Ruan, B., Jacobi, A. M. 2012. Ultrasonication effects on thermal and rheological properties of carbon nanotube suspensions. *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 1-14.

- Rudyak, V. Y., Minakov, A. V., Krasnolutsii, S. L. 2016. Physics and mechanics of heat exchange processes in nanofluid flows. *Physical Mesomechanics*, 19(3), 298-306.
- Sadeghi, R., Etemad, S. G., Keshavarzi, E., Haghshenasfard, M. 2015. Investigation of alumina nanofluid stability by UV-vis spectrum. *Microfluidics and Nanofluidics*, 18(5), 1023-1030.
- Saeed, M., Kim, M. H. 2018. Heat transfer enhancement using nanofluids ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$) in mini-channel heatsinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 671-682.
- Safiei, W., Rahman, M. M., Hadi, M. A., Azmi, W. H., Arifin, M. N. 2021. Experimental investigation on preparation and stability of Al_2O_3 nanofluid in deionized water and ethylene glycol. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 77(2), 47-62.
- Said, Z., Jamei, M., Sundar, L. S., Pandey, A. K., Allouhi, A., Li, C. 2022. Thermophysical properties of water, water and ethylene glycol mixture-based nanodiamond+ Fe_3O_4 hybrid nanofluids: An experimental assessment and application of data-driven approaches. *Journal of Molecular Liquids*, 347, 117944.
- Said, Z., Kamyar, A., Saidur, R. 2013. Experimental investigation on the stability and density of TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 and TiSiO_4 . In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 16(1), 012002.
- Sajid, M. U., Bicer, Y. 2022. Impacts of ultrasonication time and surfactants on stability and optical properties of CuO , Fe_3O_4 , and CNTs/water nanofluids for spectrum selective applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 88, 106079.
- Salari, E., Peyghambarzadeh, S. M., Sarafriz, M. M., Hormozi, F., Nikkhah, V. 2017. Thermal behavior of aqueous iron oxide nano-fluid as a coolant on a flat disc heater under the pool boiling condition. *Heat and Mass Transfer*, 53(1), 265-275.
- Sekhar, Y. R., Sharma, K. V. 2015. Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al_2O_3 nanofluids at low particle concentrations. *Journal of Experimental Nanoscience*, 10(2), 86-102.
- Selvakumar, R. D., Wu, J. 2019. A comprehensive model for effective density of nanofluids based on particle clustering and interfacial layer formation. *Journal of Molecular Liquids*, 292, 111415.
- Senthilraja, S., Vijayakumar, K., Gangadevi, R. 2015. A comparative study on thermal conductivity of Al_2O_3 /water, CuO /water and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ /water nanofluids. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 10(4), 1449-1458.
- Sha, L., Ju, Y., Zhang, H. 2017. The influence of the magnetic field on the convective heat transfer characteristics of Fe_3O_4 /water nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 126, 108-116.

- Shah, R. K., London, A. L. 1974. Thermal boundary conditions and some solutions for laminar duct flow forced convection. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 96(2), 159-165.
- Shahsavar, A., Saghafian, M., Salimpour, M. R., Shafii, M. B. 2016. Experimental investigation on laminar forced convective heat transfer of ferrofluid loaded with carbon nanotubes under constant and alternating magnetic fields. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 76, 1-11.
- Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., Ganji, D. D. 2015. Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 444-469.
- Shenoy, U. S., Shetty, A. N. 2018. A simple single-step approach towards synthesis of nanofluids containing cuboctahedral cuprous oxide particles using glucose reduction. *Frontiers of Materials Science*, 12(1), 74-82.
- Shima, P. D., Philip, J. 2011. Tuning of thermal conductivity and rheology of nanofluids using an external stimulus. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(41), 20097-20104.
- Shoghl, S. N., Jamali, J., Moraveji, M. K. 2016. Electrical conductivity, viscosity, and density of different nanofluids: An experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 339-346.
- Siddiqui, F. R., Tso, C. Y., Chan, K. C., Fu, S. C., Chao, C. Y. 2019. On trade-off for dispersion stability and thermal transport of Cu-Al₂O₃ hybrid nanofluid for various mixing ratios. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, 1200-1216.
- Sidik, N. A. C., Mohammed, H. A., Alawi, O. A., Samion, S. 2014. A review on preparation methods and challenges of nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 54, 115-125.
- Sieder, E. N., Tate, G. E. 1936. Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(12), 1429-1435.
- Silambarasan, M., Manikandan, S., Rajan, K. S. 2012. Viscosity and thermal conductivity of dispersions of sub-micron TiO₂ particles in water prepared by stirred bead milling and ultrasonication. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(25-26), 7991-8002.
- Singh, V., Kumar, A., Alam, M., Kumar, A., Kumar, P., Goyat, V. 2022. A study of morphology, UV measurements and zeta potential of Zinc Ferrite and Al₂O₃ nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 59(1), 1034-1039.
- Soltani, O., Akbari, M. 2016. Effects of temperature and particles concentration on the dynamic viscosity of MgO-MWCNT/ethylene glycol hybrid nanofluid: experimental study. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 84, 564-570.

- Sonawane, S. S., Khedkar, R. S., Wasewar, K. L. 2015. Effect of sonication time on enhancement of effective thermal conductivity of nano TiO_2 -water, ethylene glycol, and paraffin oil nanofluids and models comparisons. *Journal of Experimental Nanoscience*, 10(4), 310-322.
- Sun, B., Guo, Y., Yang, D., Li, H. 2020. The effect of constant magnetic field on convective heat transfer of Fe_3O_4 /water magnetic nanofluid in horizontal circular tubes. *Applied Thermal Engineering*, 171, 114920.
- Sundar, L. S., Ramana, E. V., Graça, M. P. F., Singh, M. K., Sousa, A. C. 2016. Nanodiamond- Fe_3O_4 nanofluids: preparation and measurement of viscosity, electrical and thermal conductivities. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 73, 62-74.
- Sundar, L. S., Singh, M. K., Ferro, M. C., Sousa, A. C. 2017. Experimental investigation of the thermal transport properties of graphene oxide/ Co_3O_4 hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 84, 1-10.
- Sundar, L. S., Singh, M. K., Sousa, A. C. 2013. Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe_3O_4 nanofluid for heat transfer applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 7-14.
- Sundar, L. S., Singh, M. K., Sousa, A. C. 2014. Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT- Fe_3O_4 /water hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52, 73-83.
- Tajik, B., Abbassi, A., Saffar-Avval, M., Najafabadi, M. A. 2012. Ultrasonic properties of suspensions of TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles in water. *Powder Technology*, 217, 171-176.
- Tang, J., Qi, C., Ding, Z., Afrand, M., Yan, Y. 2021. Thermo-hydraulic performance of nanofluids in a bionic heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 127, 105492.
- Taurozzi, J. S., Hackley, V. A., Wiesner, M. 2012. Preparation of nanoparticle dispersions from powdered material using ultrasonic disruption. *NIST Special Publication*, 1200(2), 1200-2.
- Tawfik, M. M. 2017. Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239-1253.
- Tekir, M., Gedik, E., Arslan, K., Pazarlıoğlu, H. K., Aksu, B., Taskesen, E. 2022. Hydrothermal behavior of hybrid magnetite nanofluid flowing in a pipe under bi-directional magnetic field with different wave types. *Thermal Science and Engineering Progress*, 34, 101399.

- Teng, T. P., Hung, Y. H. 2014. Estimation and experimental study of the density and specific heat for alumina nanofluid. *Journal of Experimental Nanoscience*, 9(7), 707-718.
- Timofeeva, E. V., Gavrilov, A. N., McCloskey, J. M., Tolmachev, Y. V., Sprunt, S., Lopatina, L. M., Selinger, J. V. 2007. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. *Physical Review E*, 76(6), 061203.
- Timofeeva, E. V., Routbort, J. L., Singh, D. 2009. Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 106(1), 014304.
- Tiwari, A. K., Pandya, N. S., Said, Z., Chhatbar, S. H., Al-Turki, Y. A., Patel, A. R. 2021a. 3S (Sonication, surfactant, stability) impact on the viscosity of hybrid nanofluid with different base fluids: An experimental study. *Journal of Molecular Liquids*, 329, 115455.
- Tiwari, A. K., Pandya, N. S., Said, Z., Öztö, H. F., Abu-Hamdeh, N. 2021b. 4S consideration (synthesis, sonication, surfactant, stability) for the thermal conductivity of CeO_2 with MWCNT and water based hybrid nanofluid: An experimental assessment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 610, 125918.
- Tiwari, A. K., Pandya, N. S., Shah, H., Said, Z. 2020. Experimental comparison of specific heat capacity of three different metal oxides with MWCNT/water-based hybrid nanofluids: proposing a new correlation. *Applied Nanoscience*, 13, 189-199.
- Toghraie, D., Alempour, S. M., Afrand, M. 2016. Experimental determination of viscosity of water based magnetite nanofluid for application in heating and cooling systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 417, 243-248.
- Tong, Y., Boldoo, T., Mr, J. H., Cho, H. 2020. Improvement of photo-thermal energy conversion performance of MWCNT/ Fe_3O_4 hybrid nanofluid compared to Fe_3O_4 nanofluid. *Energy*, 196, 117086.
- Tripathi, A., Chandra, H. 2015. Performance investigation of automobile radiator operated with ZnFe_2O_4 nano fluid based coolant. 2nd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (ICMME 2015), September 15-16, MATEC Web of Conferences, Vol. 34, 01003, Singapore.
- Trisaksri, V., Wongwises, S. 2007. Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(3), 512-523.
- Tsung, T. T., Chang, H., Chen, L. C., Liu, M. K., Lin, H. M., Lin, C. K. 2004. Process development of a novel arc spray nanoparticle synthesis system (ASNSS) for preparation of a TiO_2 nanoparticle suspension. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(11), 879-885.

- Vadasz, P. 2010. Rendering the transient hot wire experimental method for thermal conductivity estimation to two-phase systems-theoretical leading order results. *Journal of Heat Transfer*, 132(8), 081601.
- Vajjha, R. S., Das, D. K. 2009a. Specific heat measurement of three nanofluids and development of new correlations. *Journal of Heat Transfer*, 131(7), 071601.
- Vajjha, R. S., Das, D. K. 2009b. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(21-22), 4675-4682.
- Vajjha, R. S., Das, D. K., Mahagaonkar, B. M. 2009. Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory. *Petroleum Science and Technology*, 27(6), 612-624.
- Vajravel, L. V., Swaminathan, S. K., Baskaran, S., Sekar, R. K. 2019. Experimental investigations on heat transfer in a new minichannel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 140, 144-153.
- Vand, V. 1948. Viscosity of solutions and suspensions. I. Theory. *The Journal of Physical Chemistry*, 52(2), 277-299.
- Vasheghani, M., Marzbanrad, E., Zamani, C., Aminy, M., Raissi, B., Ebadzadeh, T., Barzegar-Bafrooei, H. 2011. Effect of Al_2O_3 phases on the enhancement of thermal conductivity and viscosity of nanofluids in engine oil. *Heat and Mass Transfer*, 47(11), 1401-1405.
- Vinod, S., Philip, J. 2018. Experimental evidence for the significant role of initial cluster size and liquid confinement on thermo-physical properties of magnetic nanofluids under applied magnetic field. *Journal of Molecular Liquids*, 257, 1-11.
- Wamkam, C. T., Opoku, M. K., Hong, H., Smith, P. 2011. Effects of pH on heat transfer nanofluids containing ZrO_2 and TiO_2 nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 109(2), 024305.
- 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(14), 2665-2672.
- Wang, J., Fan, M., Bian, X., Yu, M., Wang, T., Liu, S., Yang, Y., Tian, Y., Guan, R. 2018. Enhanced magnetic heating efficiency and thermal conductivity of magnetic nanofluids with FeZrB amorphous nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 465, 480-488.
- Wang, J., Li, G., Li, T., Zeng, M., Sundén, B. 2021. Effect of various surfactants on stability and thermophysical properties of nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 4057-4070.

- Wang, L., Wang, Y., Yan, X., Wang, X., Feng, B. 2016. Investigation on viscosity of Fe_3O_4 nanofluid under magnetic field. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 72, 23-28.
- Wang, X. J., Zhu, D. S., Yang, S. 2009. Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids. *Chemical Physics Letters*, 470(1-3), 107-111.
- Witharana, S., Palabiyik, I., Musina, Z., Ding, Y. 2013. Stability of glycol nanofluids the theory and experiment. *Powder Technology*, 239, 72-77.
- Wole-Osho, I., Okonkwo, E. C., Kavaz, D., Abbasoglu, S. 2020. An experimental investigation into the effect of particle mixture ratio on specific heat capacity and dynamic viscosity of Al_2O_3 -ZnO hybrid nanofluids. *Powder Technology*, 363, 699-716.
- Wu, Y. Y., Kao, M. J. 2011. Using TiO_2 nanofluid additive for engine lubrication oil. *Industrial Lubrication and Tribology*, 63(6), 440-445.
- Xia, G., Jiang, H., Liu, R., Zhai, Y. 2014. Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al_2O_3 /de-ionized water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 84, 118-124.
- Xie, X. L., Liu, Z. J., He, Y. L., Tao, W. Q. 2009. Numerical study of laminar heat transfer and pressure drop characteristics in a water-cooled minichannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 29(1), 64-74.
- Xuan, Y., Li, Q. 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58-64.
- Xuan, Y., Li, Q., Hu, W. 2003. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. *AIChE Journal*, 49(4), 1038-1043.
- Xuan, Y., Roetzel, W. 2000. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3701-3707.
- Xue, Q. Z. 2005. Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. *Physica B: Condensed Matter*, 368(1-4), 302-307.
- Yarahmadi, M., Goudarzi, H. M., Shafii, M. B. 2015. Experimental investigation into laminar forced convective heat transfer of ferrofluids under constant and oscillating magnetic field with different magnetic field arrangements and oscillation modes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 601-611.
- Yarmand, H., Gharehkhani, S., Ahmadi, G., Shirazi, S. F. S., Baradaran, S., Montazer, E., Zubir, M. N. M., Alehashem, M. S., Kazi, Z. N. Dahari, M. 2015. Graphene nanoplatelets-silver hybrid nanofluids for enhanced heat transfer. *Energy Conversion and Management*, 100, 419-428.

- Yoo, D. H., Hong, K. S., Yang, H. S. 2007. Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids. *Thermochimica Acta*, 455(1-2), 66-69.
- Younes, H., Christensen, G., Luan, X., Hong, H., Smith, P. 2012. Effects of alignment, pH, surfactant, and solvent on heat transfer nanofluids containing Fe_2O_3 and CuO nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 111(6), 064308.
- 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(4), 355-361.
- Yu, W., Xie, H., Wang, X., Wang, X. 2011. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets. *Physics Letters A*, 375(10), 1323-1328.
- Yu-Hua, L., Wei, Q., Jian-Chao, F. 2008. Temperature dependence of thermal conductivity of nanofluids. *Chinese Physics Letters*, 25(9), 3319.
- Zhang, H., Qing, S., Zhai, Y., Zhang, X., Zhang, A. 2021b. The changes induced by pH in TiO_2 /water nanofluids: Stability, thermophysical properties and thermal performance. *Powder Technology*, 377, 748-759.
- Zhang, H., Wang, S., Lin, Y., Feng, M., Wu, Q. 2017. Stability, thermal conductivity, and rheological properties of controlled reduced graphene oxide dispersed nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 119, 132-139.
- Zhang, R., Wang, S., Qing, S., Luo, Z., Zhang, X. 2022. Research on convective heat transfer characteristics of Fe_3O_4 magnetic nanofluids under vertical magnetic field. *Thermal Science*, 26(1 Part B), 667-679.
- Zhang, T., Zou, Q., Cheng, Z., Chen, Z., Liu, Y., Jiang, Z. 2021a. Effect of particle concentration on the stability of water-based SiO_2 nanofluid. *Powder Technology*, 379, 457-465.
- Zhang, X., Zhang, Y. 2021. Experimental study on enhanced heat transfer and flow performance of magnetic nanofluids under alternating magnetic field. *International Journal of Thermal Sciences*, 164, 106897.
- Zhao, M., Lv, W., Li, Y., Dai, C., Zhou, H., Song, X., Wu, Y. 2018. A study on preparation and stabilizing mechanism of hydrophobic silica nanofluids. *Materials*, 11(8), 1385.
- Zheng, Y., Shahsavar, A., Afrand, M. 2020. Sonication time efficacy on Fe_3O_4 -liquid paraffin magnetic nanofluid thermal conductivity: an experimental evaluation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105004.
- Zhou, S. Q., Ni, R. 2008. Measurement of the specific heat capacity of water-based Al_2O_3 nanofluid. *Applied Physics Letters*, 92(9), 093123.

- Zhu, D., Li, X., Wang, N., Wang, X., Gao, J., Li, H. 2009. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanofluids. *Current Applied Physics*, 9(1), 131-139.
- Zhu, H. T., Lin, Y. S., Yin, Y. S. 2004. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277(1), 100-103.
- Zonouzi, S. A., Khodabandeh, R., Safarzadeh, H., Aminfar, H., Trushkina, Y., Mohammadpourfard, M., Ghanbarpour, M., Alvarez, G. S. 2018. Experimental investigation of the flow and heat transfer of magnetic nanofluid in a vertical tube in the presence of magnetic quadrupole field. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 91, 155-165.

