

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FERROAKIŞKANIN MANYETİK ALAN ETKİSİ ALTINDAKİ İÇ
AKIŞINDA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Esra YAĞCI

NİSAN 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FERROAKIŞKANIN MANYETİK ALAN ETKİSİ ALTINDAKİ İÇ
AKIŞINDA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

Esra YAĞCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14.02.2025

Tezin Savunma Tarihi : 11.04.2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tülin BALI

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Ferroakışkanın Manyetik Alan Etkisi Altındaki İç Akışında Isı Transferinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı kapsamında hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasına sağladığı değerli katkılar için kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Tülin BALI'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez sürecinde ve proje çalışmalarında gösterdiği emek ve destekleriyle büyük katkı sağlayan Prof. Dr. Orhan AYDIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Tez İzleme Komitesi üyesi Prof. Dr. Emin BACAŞIZ'a teşekkürlerimi iletmek isterim.

Doktora sürecime başladığım andan itibaren, yalnızca motive edici desteğiyle değil, aynı zamanda deney düzenliğimin kurulumu, manyetik alan üreticisinin tasarlayıp üretmesi ve teknik her konuda sağladığı katkılarla yanımda olan sevgili eşim Arş. Gör. Oğuz Kaan YAĞCI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu süreçte karşılaştığım her zorlukta yanımda olan, desteklerini daima hissettiren ve sevgileriyle bana güç veren kıymetli aileme sonsuz minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Bu doktora tezimi, varlığıyla hayatıma renk katan, en zorlu ve stresli anlarda bile ışığıyla yolumu aydınlatan, bana güç, moral ve motivasyon kaynağı olan en büyük şükür sebebim canım oğlum Selçuk Kerim YAĞCI'ya ithaf ediyorum.

Bu doktora tez çalışması TÜBİTAK tarafından 221M510 numaralı proje ve Karadeniz Teknik Üniversitesi FHD-2023- 10615 nolu Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK'a ve Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne verdiği maddi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Esra YAĞCI

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Ferroakışkanın Manyetik Alan Etkisi Altındaki İç Akışında Isı Transferinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Tülin BALI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 11/04/2025

XXXXXX

Esra YAĞCI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Nanoakışkanların Geliştirilmesi, Özellikleri ve Hazırlama Yöntemleri	3
1.1.1. Tek Adım Yöntemi.....	6
1.1.2. İki Adım Yöntemi	7
1.2. Nanoakışkanların Kararlılığını Arttırma Yöntemleri.....	8
1.3. Ferroakışkanlar, Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	11
1.4. Literatür Araştırması	13
1.4.1. Ferroakışkanın Karakterizasyonu ve Termofiziksel Özellikleri	14
1.4.2. Manyetik Alan Şiddetinin ve Hidrodinamik Parametrelerin Akış ve Isı Transferine Etkisi.....	17
1.4.3. Manyetik Alan Türünün Akış ve Isı Transferine Etkisi	21
1.4.4. Elektromıknatıs Konumlarının Akış ve Isı Transferine Etkisi.....	25
1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	34
2.1. Ferroakışkanın Hazırlanması	34
2.1.1. Ferroakışkanın Karakterizasyonu.....	37
2.1.2. Ferroakışkanın Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	43
2.2. Faz Açılı Manyetik Alan Uygulaması.....	44
2.2.1. Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi	44
2.2.2. Isı Transfer Bölgesinin Tasarımı, Ferroakışkan Şartlandırılması ve Sirkülasyonu	45
2.2.3. Manyetik Alan Üreticinin Tasarım ve Akış Hattına Uygulanması	48
2.2.4. Manyetik Alan Frekansı	52

2.2.5. Manyetik Alan Şiddeti ve Reynolds Sayısı	52
2.3. Değişken Yönlü Manyetik Alan Uygulaması	52
2.3.1. Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi	53
2.3.2. Mıknatıs Konumları.....	54
2.3.3. Değişken Yönlü Manyetik Alanın Akış Hattına Uygulanması.....	57
2.4. Deneysel Yöntem	59
2.4.1. Veri Analizi ve Performans Çıktıları.....	59
2.4.2. Belirsizlik Analizi.....	62
2.5. Deney Düzeneğinin Doğrulanması	63
2.6. Mıknatısların Yerleşim Bölgesinin Belirlenmesi.....	63
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	66
3.1. Faz açılı Manyetik Alan Uygulamasından Elde Edilen Bulgular	66
3.1.1. Faz Açılı Manyetik Alanın Isı Transferine Etkisi	67
3.1.2. Manyetik Alan Frekansının Isı Transferine Etkisi	77
3.1.3. Reynolds Sayısının Isı Transferine Etkisi.....	78
3.1.4. Nanoparçacık Hacim Oranının Isı Transferine Etkisi	80
3.1.5. Basınç Düşümü ve Termal Etkinlik Analizleri	81
3.2. Değişken Yönlü Sabit Manyetik Alan Uygulamasından Elde Edilen Bulgular	85
3.2.1. Mıknatıs Konumlarının Isı Transferine Etkisi	85
3.2.2. Reynolds Sayısının Isı Transferine Etkisi.....	92
3.2.3. Nanoparçacık Hacim Oranının Isı Transferine Etkisi	93
3.2.4. Basınç Düşümü ve Termal Etkinlik Analizleri	94
3.3. Faz Açılı ve Değişken Yönlü Manyetik Alan Uygulamalarının Karşılaştırılması	97
4. SONUÇLAR	101
5. ÖNERİLER.....	104
6. KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

FERROAKIŞKANIN MANYETİK ALAN ETKİSİ ALTINDAKİ İÇ AKIŞINDA ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

Esra YAĞCI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Tülin BALI
2025, 113 Sayfa

Bu tezde; manyetik alan etkisi altında, Fe_3O_4 nanoparçacıktan oluşan su bazlı ferroakışkanın dairesel kesitli borudaki laminar zorlanmış taşınım performansı deneysel olarak incelenmiştir. Manyetik alan uygulaması için, “faz açılı manyetik alan” ve “değişken yönlü manyetik alan” olmak üzere iki özgün sistem tasarlanmıştır. Deneyler 700 G manyetik alan şiddeti altında, farklı Reynolds sayıları (400 -1000) ve nanoparçacık hacim oranlarında (%0,5 ve %1) yapılmıştır. Faz açılı manyetik alan uygulamasında, belli manyetik alan frekansı (0 Hz, 1 Hz ve 5 Hz) ve faz açıları (0° , 90° ve 180°) için ısı transfer performansı incelenmiştir. Değişken yönlü manyetik alan uygulamasında ise 6 farklı mıknatıs konumu (M1a, M1b, M1c, M2a, M2b ve M2c) için ısı transferi performansı incelenmiştir. Isı transferindeki artış ile basınç düşümü değerleri bir Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) kullanılarak analiz edilmiştir. Bulgulara göre ısı transferindeki en fazla artışlar %1 nanoparçacık oranı ve düşük Reynolds sayılarında gözlemlenirken; en yüksek termal performans, faz açılı manyetik alan uygulamasında 1 Hz frekans ve 180° faz açısı için, değişken yönlü manyetik alan uygulamasında ise M2b yerleşim düzeni için elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı transferi, iç akış, laminar akış, ferroakışkan, manyetik alan, faz açısı

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN THE INTERNAL FLOW OF FERROFLUID UNDER THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD

Esra YAĞCI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Tülin BALI
2025, 113 Pages

In this thesis, the laminar forced convective heat transfer performance of a water-based ferrofluid composed of Fe_3O_4 nanoparticles under the influence of a magnetic field is experimentally investigated in a circular cross-section pipe. Two novel systems are designed for the application of the magnetic field as, phase-shifted magnetic field and variable-direction magnetic field. The experiments were conducted under a magnetic field intensity of 700 G, at various Reynolds numbers (ranging from 400 to 1000) and nanoparticle volume fractions (0.5% and 1%). In the phase-shifted magnetic field application, the heat transfer performance is evaluated for specific magnetic field frequencies (0 Hz, 1 Hz, and 5 Hz) and phase angles (0° , 90° , and 180°). In the variable-direction magnetic field application, heat transfer performance are analyzed for six different magnet configurations (M1a, M1b, M1c, M2a, M2b, and M2c). The enhancements in heat transfer rates, along with the corresponding pressure drop values are analyzed using a Performance Evaluation Criterion (PEC). According to the findings, the highest enhancements in heat transfer were observed at a 1% nanoparticle concentration and low Reynolds numbers. The maximum thermal performance is achieved at a frequency of 1 Hz and a phase angle of 180° for the phase-shifted magnetic field and with the M2b configuration for the variable-direction magnetic field.

Key Words: Heat transfer, Internal flow, Laminar flow, Ferrofluid, Magnetic field, Phase shift

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Aktif teknikler ile ısı transferi iyileştirme yöntemleri	1
Şekil 2. Pasif teknikler ile ısı transferi iyileştirme yöntemleri.....	2
Şekil 3. Mikroparçacıklarla nanoparçacıkların karşılaştırılması (Şahin vd. 2006)	3
Şekil 4. Google akademik veri tabanında nanoakışkan ile ilgili yapılan yayın sayıları (Kalsi vd. 2023).....	6
Şekil 5. Tek adım yöntemi (Bakthavatchalam vd. 2020)	7
Şekil 6. İki adım yöntemi (Bakthavatchalam vd. 2020)	8
Şekil 7. Kararlı ve kararsız durumlarda nanoakışkanlar (İlyas vd. 2017)	9
Şekil 8. Nanoakışkan kararlılığını artırma teknikleri (Çoğan, 2021)	10
Şekil 9. Ferroakışkanın taşınımıyla ısı transfer karakteristiğini etkileyen parametreler (Abbas vd. 2023).....	11
Şekil 10. Ferromanyetik nanoparçacıklar, (a) manyetik alan yokken, (b) üniform manyetik alan altında zincir benzeri yapılar, (c) manyetik kuvvet altında yüzeyde yığılma.....	12
Şekil 11. Fe ₃ O ₄ nanoparçacık tozu.....	35
Şekil 12. Feroakışkan üretiminde kullanılan (a) Mekanik karıştırıcı, (b) Ultrasonik titreşim (homojenizatör, karıştırıcı), (c) Ultrasonik banyo	37
Şekil 13. Fe ₃ O ₄ nanoparçacık tozuna ait TEM görüntüsü	38
Şekil 14. Fe ₃ O ₄ nanoparçacık tozuna ait XRD analiz sonucu.....	38
Şekil 15. VSM (titreşimli numune manyetometresi) analiz cihazı	39
Şekil 16. Fe ₃ O ₄ nanoparçacık tozuna ait VSM ölçümü.....	39
Şekil 17. Hazırlanan ferroakışkanların zeta potansiyel analiz sonuçları (a) ferroakışkan@Tween 20 (b) ferroakışkan@TMAOH (c) ferroakışkan@Sitrik Asit (d) ferroakışkan@Triton X 100	40
Şekil 18. TMAOH yüzey aktif madde ile hazırlanan ferroakışkanların 30 gün sonraki zeta potansiyel analizi.....	41
Şekil 19. Hazırlanan ferroakışkanların görüntüleri (a) ilk gün (b) 30 gün sonra.....	41
Şekil 20. Fe ₃ O ₄ nanoparçacık tozu ile belli hacim oranlarında hazırlanan ferroakışkanlar (a) $\phi_p = \%0,5$ ve (b) $\phi_p = \%1$	42
Şekil 21. Ferroakışkanlara ait zeta potansiyel analiz sonuçları (a) $\phi_p = \%1$ (b) $\phi_p = \%0,5$	42
Şekil 22. Faz açılı manyetik alan uygulamasına ait (a) deney düzeneği ve (b) fotoğrafı.....	45

Şekil 23.	Boru yüzeyine (a) ısıtıcı kablonun sarılması ve (b) termoelemanın yerleşimi.....	46
Şekil 24.	Deney düzeneğine ait (a) pompa, plakalı ısı eşanjörü, türbin ve şamandıralı debimetreler, (b) sirkülatörlü kalibrasyon banyosu.....	47
Şekil 25.	(a) Veri kayıt cihazı, (b) basınç manometresi	48
Şekil 26.	Üretimi yapılan (a) elektromıknatıs ve (b) Gaussmetre.....	49
Şekil 27.	Manyetik alan devresi	49
Şekil 28.	Elektromıknatlara gönderilen sinyallere ait bağlantı şeması ve faz açılı sinyal örneğine ait şematik gösterimi.....	50
Şekil 29.	Farklı manyetik alan uygulamaları için manyetik alan şiddetinin akışa dik yöndeki değişimi.....	51
Şekil 30.	Değişken yönlü sabit manyetik alan uygulamasına ait deney düzeneğinin (a) şematik görüntüsü, (b) fotoğrafı	53
Şekil 31.	Karşılıklı konumlandırılan mıknatıs sistemleri (a) M1a (0°-aynı yönlü-referans) (b) M1b (45°-değişken yönlü) (c) M1c (90°-değişken yönlü)	55
Şekil 32.	Kaydırılmış şekilde konumlandırılan mıknatıs sistemleri (a) M2a (0°-aynı yönlü-referans) (b) M2b (45°-değişken yönlü) ve (c) M2c (90°-değişken yönlü)	56
Şekil 33.	Mıknatıslar ve mıknatısların yerleşimi için kullanılan aparat.....	57
Şekil 34.	Mıknatısların yerleşim düzeni (a) M1a-(Ref.1), (b) M2a-(Ref.-2).....	57
Şekil 35.	Manyetik alan şiddetinin akışa dik yönde dağılımı	58
Şekil 36.	Boru boyunca yerel Nusselt sayıları	63
Şekil 37.	Farklı elektromıknatıs konumları için yerel Nusselt sayılarının boru boyunca değişimi	65
Şekil 38.	Farklı faz açısı ve frekans değerleri için yerel Nusselt sayısının boru boyunca değişimi (tüm Reynolds sayıları) (a) $\phi_p = \%0,5$ (b) $\phi_p = \%1$	67
Şekil 39.	Faz açılı manyetik alan uygulamaları için ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \%0,5$, (b) $\phi_p = \%1$ ($B = 700$ G)	70
Şekil 40.	Manyetik alan uygulama yöntemleri ve nanoparçacık hareketinin görselleri (a) sabit manyetik alan, (b) faz açılı manyetik alan ($\phi = 0^\circ$) ($\phi_p = \%1$, $Re = 400$, $f = 1$ Hz)	72
Şekil 41.	$\phi = 90^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulaması ve nanoparçacık hareketinin görselleri ($\phi_p = \%1$, $Re = 400$, $f = 1$ Hz).....	72
Şekil 42.	$\phi = 180^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulaması ve nanoparçacık hareketinin görselleri ($\phi_p = \%1$, $Re = 400$, $f = 1$ Hz)	73
Şekil 43.	$Re = 400$ ve $Re = 1000$ için yerel Nusselt sayılarının karşılaştırılması (a) $f = 1$ Hz (b) $f = 5$ Hz ($\phi_p = \%0,5$).....	78
Şekil 44.	$Re = 400$ ve $Re = 1000$ için yerel Nusselt sayılarının karşılaştırılması (a) $f = 1$ Hz (b) $f = 5$ Hz ($\phi_p = \%1$).....	79

Şekil 45.	Basınç düşümünün Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \%0,5$, (b) $\phi_p = \%1$ (B=700G).....	82
Şekil 46.	Termal iyileşme oranlarının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \%0,5$, (b) $\phi_p = \%1$ (B= 700G).....	84
Şekil 47.	Değişken yönlü mıknatıs konumları için yerel Nusselt sayısının boru boyunca değişimi (tüm Reynolds sayıları) (a) $\phi_p = \%0,5$ (b) $\phi_p = \%1$	86
Şekil 48.	Ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \% 0,5$, (b) $\phi_p = \% 1$ (B= 700 G)	88
Şekil 49.	Nanoparçacık hareketinin görselleri, (a) M1a (düşük gradyanlı manyetik alan uygulaması), (b) M2a (yüksek gradyanlı manyetik alan uygulaması)	90
Şekil 50.	Basınç düşümünün Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \%0,5$, (b) $\phi_p = \%1$ (B=700G).....	95
Şekil 51.	Termal iyileşme oranlarının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \%0,5$, (b) $\phi_p = \%1$ (B= 700G)	97
Şekil 52.	Faz açılı ve değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırılması	98
Şekil 53.	Faz açılı ve değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için PEC değerlerinin karşılaştırılması	98

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Nanoparçacık türüne bağlı olarak nanoakışkan türleri	4
Tablo 2. Nanoakışkan üretiminde kullanılan temel akışkanlara ait termal iletkenlik değerleri (Tawfik vd. 2017).....	4
Tablo 3. Nanoparçacıkların termal iletkenlik değerleri (Tawfik vd. 2017).....	5
Tablo 4. Zeta potansiyel analiz değerinin nanoakışkanın kararlılık üzerindeki etkisi.....	10
Tablo 5. Ferroakışkanların bazı uygulama alanları	13
Tablo 6. Ferroakışkanın manyetik alan etkisi altındaki iç akışında ısı transferinin incelenmesine dair literatür özeti.....	29
Tablo 7. Fe ₃ O ₄ nanoparçacık tozuna ait teknik özellikler	35
Tablo 8. Farklı yüzey aktif maddeler için zeta potansiyel analiz değerleri	40
Tablo 9. Saf su ve ferroakışkanlara ait termofiziksel özellikler (25°C)	44
Tablo 10. Kullanılan parametrelerin ölçüm cihazları ve hata oranları.....	62
Tablo 11. Belirsizlik analiz sonuçları.....	62
Tablo 12. Faz açılı manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayısındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%0,5$)	70
Tablo 13. Faz açılı manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayısındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%1$)	70
Tablo 14. Değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayısındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%0,5$)	89
Tablo 15. Değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayısındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%1$).....	89
Tablo 16. Faz açılı ve değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayısındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%1$, $f = 1$ Hz)	99

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	: Manyetik alan büyüklüğü (T, G)
c_p	: Özgül ısı (kJ/kgK)
D	: Çap (m)
DC	: Sabit manyetik alan
f	: Frekans (Hz)
f_d	: Darcy sürtünme faktörü
$\vec{F}_M$	: Manyetik kuvvet (N)
G	: Gauss
h	: Taşınım ile ısı transferi katsayısı (W/m ² °C)
Hz	: Hertz
I	: Akım (A)
k	: Isı iletim katsayısı (W/m°C)
L	: Kanal uzunluğu (m)
$\dot{m}$	: Kütleli debi (kg/s)
m	: Akışkanın kütlesi (kg)
N	: Kuzey kutup bölgesi
Nu	: Nusselt sayısı
P	: Statik basınç (Pa)
Pr	: Prandtl sayısı
S	: Güney kutup bölgesi
q''	: Isı akısı (W/m ²)
Re	: Reynolds sayısı
T	: Sıcaklık (°C)
V	: Voltaj (V)
V_p	: Nanoparçacığın hacmi (m ³)
x	: Eksenel mesafe

Alt İndis

ff	: Ferroakışkan
i	: Giriş

lam	: Laminer
m	: Yığın
net	: Net
p	: Nanoparçacık
o	: Çıkış
ort	: Ortalama
s	: Yüzey
w	: Baz akışkan
x	: Yerel

Yunan Harfleri

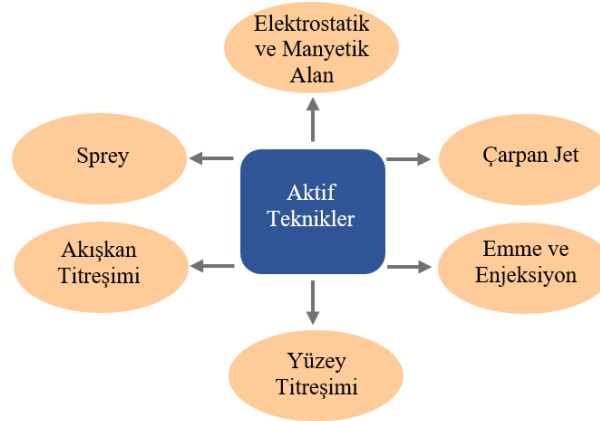
μ	: Dinamik viskozite (kg/ms)
μ_0	: Manyetik geçirgenlik (H/m)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
ε	: Termal iyileşme oranı
η	: Termal iyileşme yüzdesi
ϕ_p	: Nanoparçacık hacim oranı
ϕ	: Faz açısı (°)
Ω	: Direnç (Ohm)
∇	: Gradyan
χ_i	: Manyetik alınganlık
λ	: Dalga boyu (m)
ΔP	: Basınç düşüşü

KISALTMALAR

PEC	: Termal İyileşme Oranı
XRD	: X-Ray Diffraction (X Işını Kırınım Yöntemi)
DLS	: Dinamik Işık Saçılımı
TEM	: Transmission Electron Microscope (Geçirimli Elektron Mikroskobu)
TGA	: Termogravimetrik Analizi
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi

1. GENEL BİLGİLER

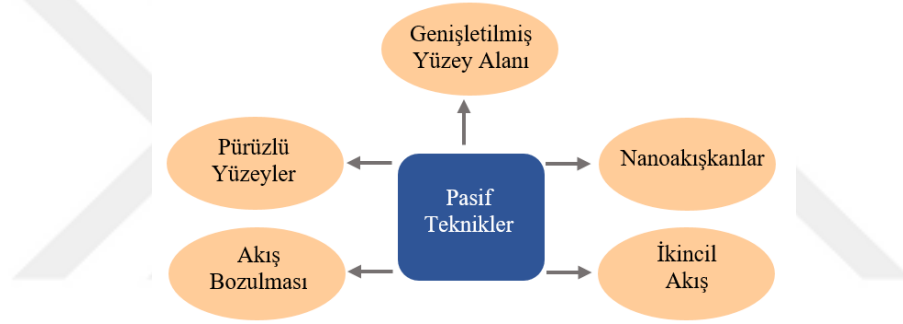
Isı transferini iyileştirmede kullanılan yaygın yöntemler aktif, pasif ve hibrit (karma) yöntemler olarak adlandırılmaktadır. Aktif yöntemlerde ısı transferinin iyileştirilmesi için dışarıdan enerji girdisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemlere örnek olarak elektrostatik alan oluşturma, manyetik alan kullanımı, jet ve sprej akışları, akışkan ve yüzey titreşimi gibi uygulamalar gösterilebilir (Şekil 1). Aktif iyileştirme yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu yöntemlerle pasif yöntemlere kıyasla genellikle daha yüksek ısı transfer katsayılarının elde edilebildiği görülmektedir. Buna karşın aktif yöntemler, enerji girdisi ihtiyacı, bakım zorunluluğu ve uygulandıkları sistem üzerinde oluşan ek titreşimlerin malzeme üzerindeki yıpratıcı etkiler gibi önemli olumsuzlukları da beraberinde getirebilmektedir. Pasif iyileştirme yöntemleri ise ısı transferini artırmak amacıyla dışarıdan enerji aktarımına ihtiyaç duyulmayan yöntemlerdir. Bu yöntemler aktif yöntemlere kıyasla genellikle daha düşük ısı transfer katsayıları ve daha yüksek basınç kayıpları sunmasına karşın, daha az bakım maliyeti, daha kolay kurulum ve uzun ömürlülük gibi önemli avantajlar sunabilmektedir.



Şekil 1. Aktif teknikler ile ısı transferi iyileştirme yöntemleri

Pasif yöntemlere örnek olarak ise pürüzlü yüzeylerin kullanımı, ısı transfer yüzey alanının büyütülmesi, akış ortamına akış bozucu cisimlerin eklenmesi, nanoakışkan kullanımı gibi yöntemler verilebilir (Şekil 2). Bu yöntemler içerisinde nanoakışkan kullanımı, güncel süreçte araştırmacıların üzerine yoğunlaştığı yenilikçi bir uygulama olarak

öne çıkmaktadır. Bu akışkanlar, çapları 100 nm'den küçük olan nano boyuttaki parçacıkların (nanoparçacık), farklı hacim oranlarında su veya yağ gibi taşıyıcı bir akışkan içerisinde (carrier fluid) çeşitli yöntemlerle dağıtılmasıyla elde edilmektedir. Isı transfer uygulamalarında nanoparçacık olarak genellikle yüksek termal iletkenliğe sahip metal veya metal-oksitler tercih edilmektedir. TiO_2 , Al_2O_3 , Cu, CuO, Ag, C ve grafit bu malzemelere örnek olarak verilebilir. Taşıyıcı bir akışkan içerisinde bu parçacıkların dağılımı, akışkanın termofiziksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirmekte ve konvansiyonel akışkanlara kıyasla daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede bu akışkanlar, su, yağ, etilen, glikol gibi konvansiyonel ısı transfer akışkanlarına kıyasla daha yüksek termal iletkenlik sunabilmekte ve konvansiyonel akışkanların kullanımı durumunda termal performans üzerinde ortaya çıkabilen olumsuzlukları azaltabilmektedirler.



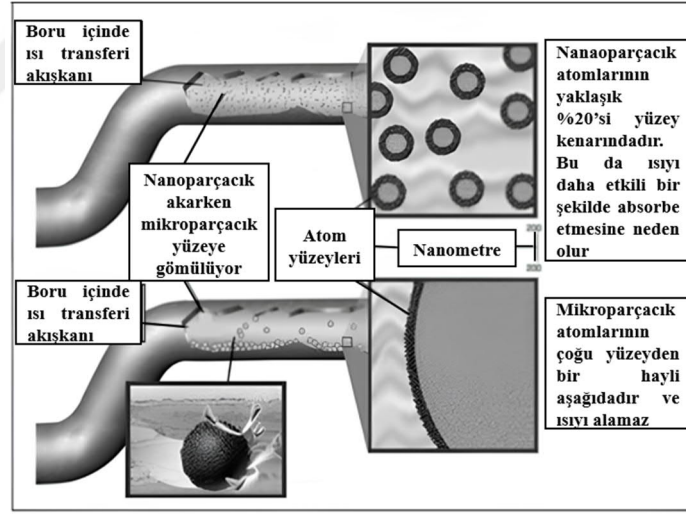
Şekil 2. Pasif teknikler ile ısı transferi iyileştirme yöntemleri

Nanoakışkanlar barındırdıkları nanoparçacık türüne bağlı olarak birbirlerinden farklı özellikler gösterebilmektedirler. Bu duruma literatürde öne çıkan bir örnek olarak manyetik nanoakışkanlar verilebilir. Bu akışkanlar bünyelerindeki nanoparçacıkların manyetik özellik göstermeleri sebebiyle diğer nanoakışkan türlerinden ayrılmaktadır. Bu gruba dâhil olan ve ferromanyetik nanoparçacık içeren nanoakışkanlar ise literatürde ferroakışkanlar (ferrofluids) olarak tanımlanmaktadır. Bu akışkanların bünyesindeki metal oksit nanoparçacıklar (Fe_3O_4 , Fe_2O_3) manyetik alana maruz kaldıklarında kutuplaşarak nano boyutlarda birer mıknatıs haline gelmekte ve ferroakışkanlar bu özellikleriyle klasik nanoakışkanlardan ayrılmaktadırlar. Ayrıca, ferroakışkanlar, Newtonumsu özellik göstermekte olup; manyetik nanoparçacıkların ve taşıyıcı akışkan moleküllerinin birlikte hareketi sonucu tek fazlı akışkan gibi davranabilmektedirler (Güden F. 2013). Nanoakışkanlar türleri ve özellikle ferroakışkanların özellikleri ve kullanım alanları oldukça

geniş kapsamlıdır. Bu bağlamda, bu akışkanların özelliklerine ait detaylı bilgiler, tez çalışmasının odak noktasında olması sebebiyle ilgili başlıklar altında ayrıca sunulmuştur.

1.1. Nanoakışkanların Geliştirilmesi, Özellikleri ve Hazırlama Yöntemleri

Nanoakışkanlar, ısı transferi performansını artırmaya yönelik çabalar sonucu geliştirilen yenilikçi bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. İlk olarak Maxwell'in 1873 yılında, konvansiyonel akışkanlara mikrometre boyutunda parçacıklar ekleyerek ısı iletimini artırma fikrini ortaya koymasıyla temelleri atılmıştır. Ancak o dönemde teknolojik kısıtlamalar, parçacıkların yeterince küçültülememesine ve süspansiyon kararlılığının sağlanamamasına yol açmıştır. Bu durum, ısı transfer performansında beklenen iyileşmenin elde edilememesi, çökme, basınç kaybı ve tıkanma gibi problemleri beraberinde getirmiştir. Şekil 3'te mikroparçacıklarla nanoparçacıkların karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 3. Mikroparçacıklarla nanoparçacıkların karşılaştırılması (Şahin vd. 2006)

Nanoteknolojinin ilerlemesiyle birlikte Choi (1995), 50 nm boyutundaki metal nanoparçacıkları konvansiyonel akışkanlara ekleyerek "nanoakışkan" terimini literatüre kazandırmış ve bu alanın gelişimini hızlandırmıştır. Bu akışkanlar, metalik, metal oksit, karbon bazlı veya seramik nanoparçacıkların su, yağ veya etilen glikol gibi taşıyıcı akışkanlarda homojen ve kararlı bir şekilde dağıtılmasıyla elde edilmektedir. Nanoparçacıkların boyutlarının 1-100 nm aralığında olması, geniş yüzey alanı sağlayarak akışkanın termal iletkenliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, Brownian hareketi ile

nanoparçacıkların taşıyıcı akışkan içinde sürekli hareket halinde olması, ısı enerjisinin daha etkin bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır (Manay, 2014).

Nanoakışkanların özellikleri, kullanılan nanoparçacıkların boyutu, şekli, malzemesi ve hacim oranı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bu bağlamda kullanılan bu parçacıklar, malzeme çeşitliliğine göre dört gruba ayrılabilirler (Goharshadi vd. 2013). Bunlar seramik, saf metaller, alaşımlar ve karbon esaslı malzemeler olup gruplandırılmış halde Tablo 1’te verilmiş, temel akışkanlara ve nanoparçacıklara ait termal iletkenlik değerleri ise Tablo 2 ve Tablo 3 de özetlenmiştir. Tablolarda görüldüğü üzere sıklıkla kullanılan nanoparçacıklar taşıyıcı akışkana göre daha yüksek termal iletkenliğe sahiplerdir. Bu parçacıklar içerisinde Al_2O_3 , CuO, Fe_3O_4 , TiO_2 , ZnO ve karbon nanotüpler (CNT), literatürde yüksek termal iletkenlikleri sebebiyle sıklıkla kullanılan nanoparçacıklar arasında yer almaktadır. Yüksek iletkenliğe sahip bu nanoparçacıklar küresel, çubuk, silindirik veya daha karmaşık geometrilere sahip olabilir ve farklı termofiziksel avantajlar sunmaktadır (Altun, 2020). Örneğin, Al_2O_3 ve CuO gibi yüksek termal iletkenliğe sahip nanoparçacıklar, ısı transferi performansını artırmada önemli bir rol oynamaktadırlar (Duangthongsuk & Wongwises, 2009).

Tablo 1. Nanoparçacık türüne bağlı olarak nanoakışkan türleri

Seramik	SiC, Al_2O_3 , CeO_2 , CuO, Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , SiO_2 , TiO_2 , ZnO
Saf Metaller	Ag, Au, Cu, Fe, Ni
Alaşımlar	Ag-Cu, Ag-Al, Al-Cu
Karbon Esaslı Malzemeler	Karbon Nano Tüp, Elmas Grafit

Tablo 2. Nanoakışkan üretiminde kullanılan temel akışkanlara ait termal iletkenlik değerleri (Tawfik vd. 2017)

Temel (Baz, taşıyıcı) Akışkan	Termal iletkenlik [W/mK]
Etilen glikol	0,257
Motor yağı	0,139-0,146
Etanol	0,161-0,171
Gliserol	0,285
Kerosen	0,145-0,168
Toluen	0,133
Su	0,608

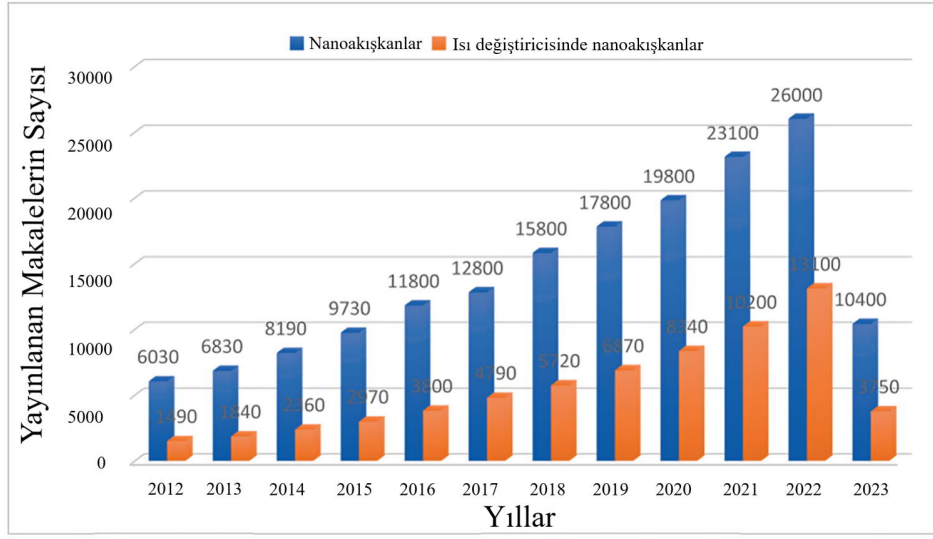
Tablo 3. Nanoparçacıkların termal iletkenlik değerleri (Tawfik vd. 2017)

Nanoparçacık	Termal iletkenlik [W/mK]
Al ₂ O ₃	40
CuO	76,5
Fe ₂ O ₃	6
Fe ₃ O ₄	9,7
SiO ₂	1,34-1,38
TiO ₂	8,9538
ZnO	29
Ag	429
Al	238-273
Au	310
Cu	401
Fe	75-80
SiC	490

Nanoakışkanların sunduğu temel avantajlar ise şu şekilde özetlenebilir:

- Yüksek termal iletkenlik: Geniş yüzey alanı sayesinde ısı transferi büyük ölçüde artmaktadır.
- Düşük çökelme oranı ve kararlılık: Nanoparçacıkların küçük boyutu ve uygun stabilizatörlerin kullanımı sayesinde süspansiyon uzun süre kararlı kalabilmektedir.
- Basınç kaybı ve tıkanma riskinin azalması: Mikrokanallarda tıkanma veya aşınma gibi problemler minimize edilmektedir.
- Enerji verimliliği: Nanoakışkanlar, sürtünme katsayısını azaltarak pompalama için gereken enerjiyi düşürmekte ve daha verimli sistem tasarımlarına olanak tanımaktadır.
- Kompakt tasarımlar: Daha küçük ve hafif ısı değiştiriciler üretilebilmekte, bu da maliyet ve enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Nanoakışkanların geliştirilmesi, ısı transferi sistemlerinden daha yüksek performans beklentisi, laboratuvar altyapılarındaki iyileşmeler ve nanoteknoloji alanındaki ilerlemeler sayesinde hız kazanmıştır. Şekil 4'te, yıllara göre ısı transferi alanında nanoakışkan kullanımı üzerine yapılan çalışmalar gösterilmektedir. Bu akışkanların termofiziksel özelliklerini optimize etmeye yönelik çalışmalar, şekilde görüldüğü üzere 2012 yılından sonra önemli düzeyde artmıştır. Günümüzde nanoakışkanlar, ısı değiştiriciler, mikrokanallar, elektronik cihazların soğutulması ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi çeşitli uygulama alanlarında etkili bir alternatif olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4. Google akademik veri tabanında nanoakışkan ile ilgili yapılan yayın sayıları (Kalsi vd. 2023)

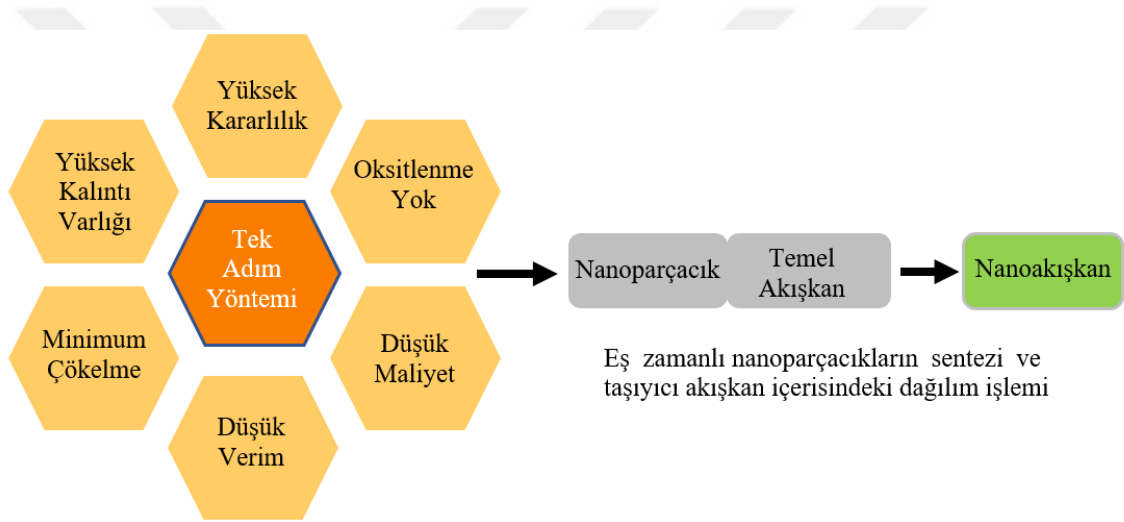
Nanoakışkanların istenilen termofiziksel özellikleri sağlayabilmesi ve hedeflenen ısı transfer performansını sunabilmesi, üretim sürecinin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesine bağlıdır. Üretim sırasında nanoparçacıkların taşıyıcı akışkan içerisinde homojen ve kararlı bir şekilde dağıtılması, çökelme ve aglomerasyon riskinin minimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde bu doğrultuda genellikle tek adım ve iki adım olmak üzere iki farklı yöntem tercih edildiği görülmektedir. Bu yöntemler detaylı olarak aşağıda sunulmuştur.

1.1.1. Tek Adım Yöntemi

Tek adım yönteminde nanoparçacıkların sentezi ve taşıyıcı akışkan içerisindeki dağılım işlemi tek aşamada gerçekleşmektedir. Diğer bir ifadeyle bu yöntemde nanoparçacık, taşıyıcı akışkanın içerisinde bir dizi kimyasal işlemle sentezlenmekte ve nanoparçacıklar akışkan içerisinde o esnada dağılmaktadırlar. Tek adım yöntemi genellikle buhar depozisyon yöntemi kullanılarak elde edilmekte olup bu işlem ile nanoakışkan üretiminde nanoparçacıkların oksitlenmesi engellenmektedir. Ayrıca kurutma, depolama, taşıma ve nanoparçacıkların dağılımı gibi ek işlemlere gerek kalmadığından nanoparçacıkların topaklanması en az seviyede, kararlılıkları ise oldukça iyi olmaktadır (Şekil 5). Fakat bu yöntemin, bitmemiş tepkimelere bağlı kalıntı varlığı ve konsantrasyonun net olarak belirlenememesi gibi bazı dezavantajlara da sahip olduğu da ifade edilmelidir.

Literatürde yer alan tek adım tekniğine ile nanoakışkan hazırlamaya yönelik çeşitli metotlara aşağıda yer verilmiştir (Dağdevir, 2020).

- Lazer ile eritme
- Ark ile nanoparçacık sentezi
- Mikro dalga ısıtımı
- Faz geçişi
- Poliol yöntemi
- Fiziksel buhar yoğunlaştırma
- Plasma deşarjı

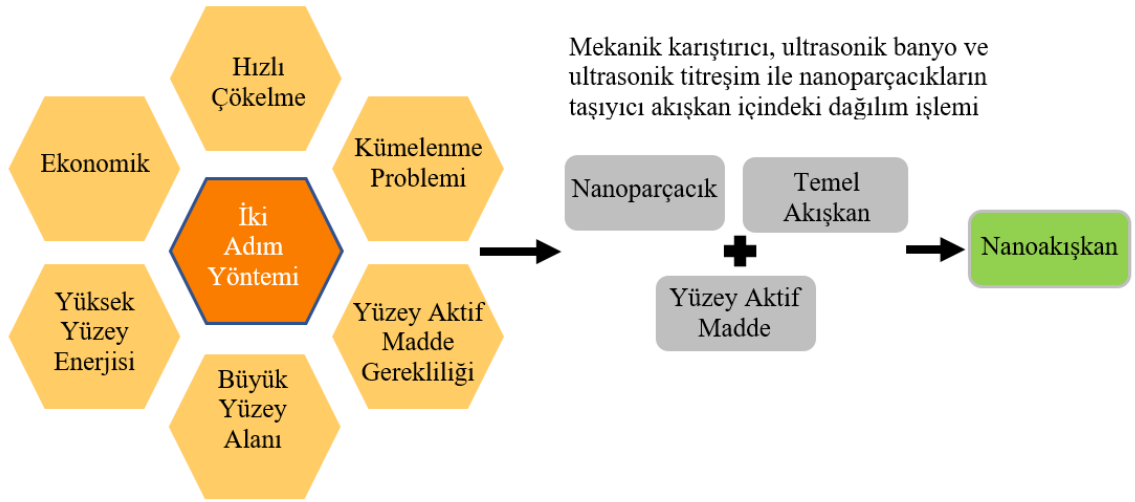


Şekil 5. Tek adım yöntemi (Bakthavatchalam vd. 2020)

1.1.2. İki Adım Yöntemi

İki adım yöntemi nanoakışkanların hazırlanması doğrultusunda literatürde en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde birinci adımda nanoparçacıklar çeşitli kimyasal, fiziksel veya mekanik yollarla üretilip kuru toz formuna getirilmektedirler. Daha sonra elde edilen nanoparçacıklar ikinci adımda temel akışkan içerisine belli hacim oranlarında mekanik karıştırıcı, ultrasonik banyo ve ultrasonik titreşim cihazları yardımıyla kararlı bir formda dağılımı gerçekleştirilmektedir (Şekil 6). Bu yöntemin avantajı büyük nanoparçacık hacim oranlarında nanoakışkan hazırlamada hem ekonomik hem de daha kullanışlı olmasıdır. Bu yöntemin dezavantajı ise nanoparçacıkların kurutma, depolama ve taşıma aşamalarında nanoparçacık çökmesi gerçekleşebilmekte ve karışımın kararlılığını sağlamak tek adımlı

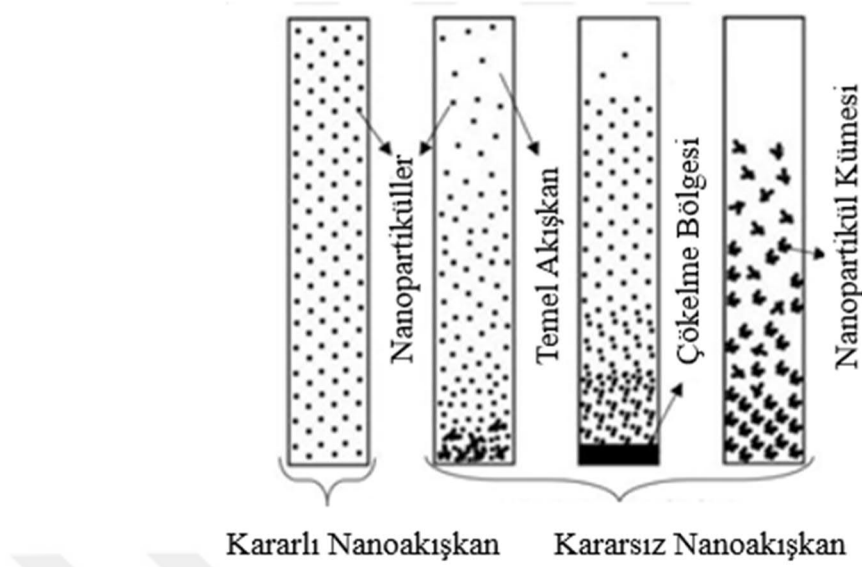
metoduna göre daha zor olmaktadır. Nanoparçacıkların yüksek yüzey aktiviteleri ve büyük yüzey alanlarına sahip olmaları nedeniyle temel akışkan içerisinde topaklanıp kümelenmeye yatkın olmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için yüzey aktif madde (sürfaktan, surfactant) kullanımı bu yöntemdeki en önemli tekniklerden biridir. Bu amaçla kullanılan yüzey aktif maddeler, suyun yüzey gerilimini azaltan maddeler olarak ifade edilmektedirler. Kimyasal ya da mikrobiyolojik yollarla üretilen yüzey aktif maddeler, farklı yüzeyleri bir araya getirme özelliği göstermektedirler. Nanoakışkan üretiminde en yaygın kullanılan yüzey aktif maddeler; oleik asit, tetrametilamonyumhidroksit, arabik gam, sodyum dodesil sülfat, setil trimetil amonyum bromit, dodesil trimetil amonyum bromit, sodyum oktaoat, heksadesil trimetil amonyum bromür, polivinil pirrolidon şeklindedir. Kararlılığın sağlanması adına bu maddeler genellikle akışkan miktarının %10'u kadar nanoakışkana ilave edilmektedir.



Şekil 6. İki adım yöntemi (Bakthavatchalam vd. 2020)

1.2. Nanoakışkanların Kararlılığını Arttırma Yöntemleri

Nanoparçacıklar arasında doğal olarak var olan Van der Waals etkileşimleri ve kohezif kuvvetler, nanoakışkanların kararsız olmasına neden olabilmektedir. Oluşan bu bağları parçalamak ve kararlı nanoakışkanlar üretmek büyük ölçüde hazırlama metoduna bağlıdır. Nanoakışkan karışımı kararlı formda olmadığı durumlarda sistemler tıkanmakta, nanoparçacıklar arası topaklanma ve çökelmeler yaşanmaktadır (Şekil 7).



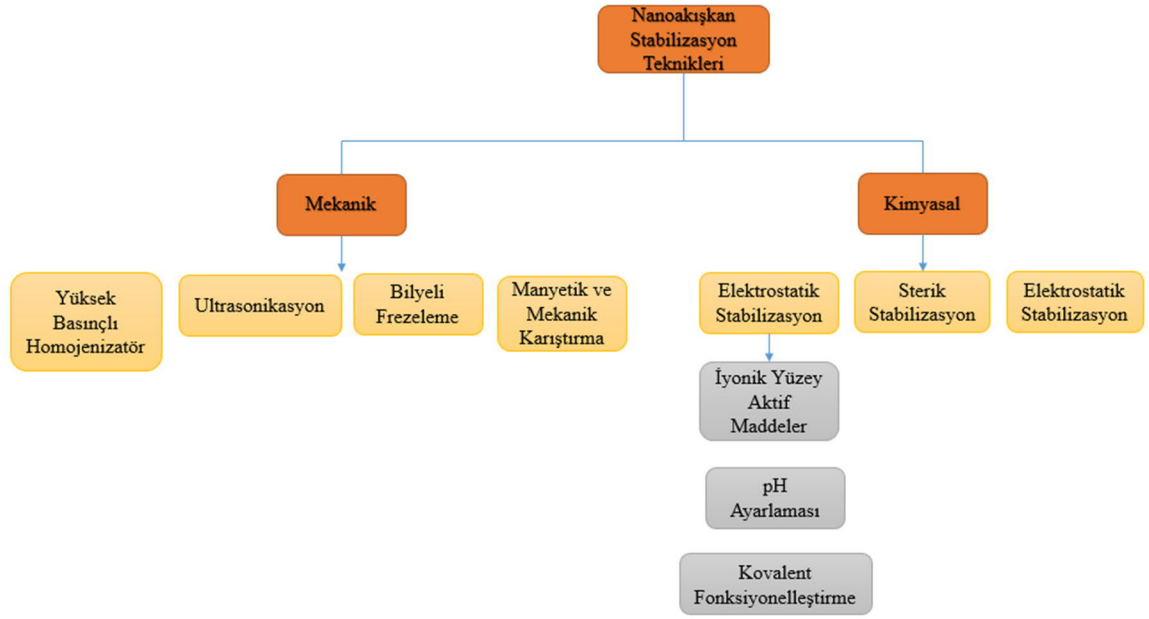
Şekil 7. Kararlı ve kararsız durumlarda nanoakışkanlar (İlyas vd. 2017)

Bu bağlamda, kararlı bir nanoakışkan elde edilmesi doğrultusunda çeşitli faktörler etkili olabilmektedir. Bu faktörler özetle şu şekildedir:

- Nanoparçacık ve temel akışkanın türü
- Nanoparçacık hacim oranı
- Yüzey modifikasyonu
- Yüzey aktif madde kullanımı
- Ultrasonikasyon süresi
- pH

Bu faktörler genel olarak nanoakışkanların kararlılığı üzerinde belirleyici rol oynamakta olup nanoakışkanın kararlılığının sağlanması ve artırılması amacıyla çeşitli işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemler mekanik ve kimyasal işlemler olarak iki grup altında Şekil 8’de özetlenmiştir. Bu işlemler arasından literatürde en sık uygulanan metot ultrasonikasyon ve yüzey aktif maddenin birlikte kullanımındır. Bu amaçla kullanılan ultrasonik homojenizatörler, nanoparçacıklar arasındaki bağları koparmakta ve temel akışkan içinde kararlı bir şekilde dağılımına yardımcı olmaktadır. Yüzey aktif maddeler ise nanoparçacıklar ile sıvı molekülleri arasında bir köprü oluşturarak nanoparçacıkların sıvı içerisinde homojen dağılımını desteklemektedirler. Yüzey modifikasyonu ile elektrokimyasal bölgeler oluşturulmakta ve bu sayede nanoakışkan içerisinde nanoparçacık dağılımı iyileştirilerek kararlı nanoakışkanlar elde edilebilmektedir. Nihai durumda

ferroakışkanların kararlılığının belirlenmesinde kullanılan en yaygın yöntem zeta potansiyel ölçümüdür. Zeta potansiyel, nanoparçacığın çevresindeki sıvı tabaka ile sıvı ortam arasındaki elektriksel potansiyel farkını ifade etmektedir. Bu fark, [mV] birimiyle ölçülmekte ve nanoakışkanın türüne bağlı olarak pozitif ya da negatif olabilmektedir. Elektriksel potansiyel farkının mutlak değeri ne kadar büyükse, nanoakışkanın çökelme eğilimi de o kadar düşük olmaktadır. Tablo 4'te zeta potansiyel analiz değerinin nanoakışkanın kararlılık üzerindeki etkisi verilmiştir.



Şekil 8. Nanoakışkan kararlılığını artırma teknikleri (Çoğan, 2021)

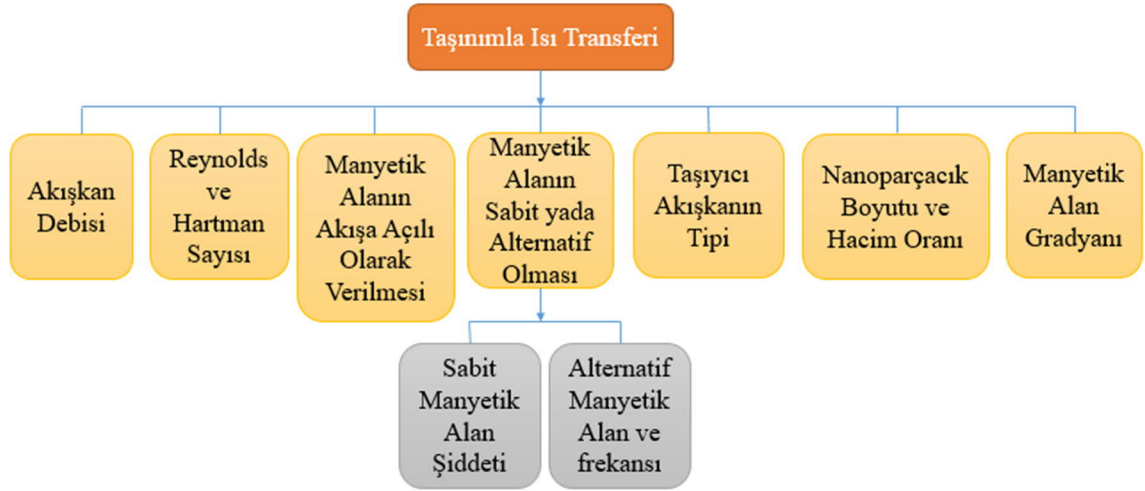
Tablo 4. Zeta potansiyel analiz değerinin nanoakışkanın kararlılık üzerindeki etkisi

Zeta Potansiyel Değeri (mV)	Kararlılık Durumu
0	Kararlılık çok kısa süre sağlanmakta veya hiç sağlanamamaktadır.
15	Kararlılık kısa süreli sağlansa dahi, çöküntü oluşumu gözlenmektedir.
30	Kararlılık orta düzeyde sağlanmaktadır.
45	İyi bir kararlılık durumu ve çok az çöküntü oluşmaktadır.
60	Çok iyi kararlılık durumu gözlenmektedir.

1.3. Ferroakışkanlar, Özellikleri ve Kullanım Alanları

Nanoakışkan türlerinden biri olan ferroakışkanlar, manyetik alan altında benzersiz davranış sergileyen özel bir sınıfı oluşturmaktadır. Bu akışkanlar ayrıca bu tez çalışmasının üzerinde odaklandığı akışkan türüdür. Ferroakışkanlar, taşıyıcı akışkan içinde dağıtılmış manyetik demir oksit nanoparçacıklar içermekte olup, manyetik alanın etkisiyle fiziksel ve termal özelliklerini değiştirerek ısı transfer performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir. Ferroakışkanların temel bileşenleri genellikle demir oksit (Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) gibi manyetik nanoparçacıklardır. Bu nanoparçacıklar, yüzey aktif maddelerle stabilize edilerek akışkan içinde homojen bir şekilde dağılmaları sağlanır.

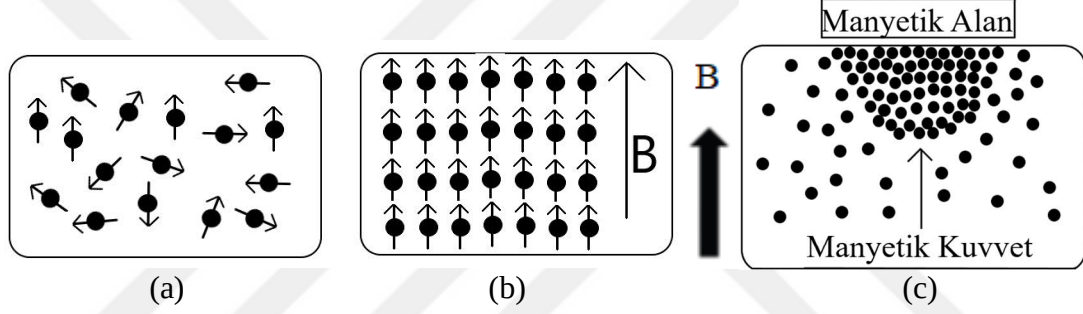
Ferroakışkanların ısı transfer performansları manyetik alan etkisi altında büyük ölçekte artabilmektedir. Özellikle ferroakışkanların taşınımıyla ısı transfer karakteristiği birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu önemli parametreler Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil 9. Ferroakışkanın taşınımıyla ısı transfer karakteristiğini etkileyen parametreler (Abbas vd. 2023)

Bu parametreler içerisinde manyetik alanın türü (sabit, alternatif) ve gradyanı nanoparçacıkların davranış biçimini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu parametreler ayrıca çalışmanın odaklandığı manyetik parametreleri oluşturması nedeniyle önem arz etmektedir. İlgili parametrelere bağlı manyetik alan altında oluşabilen bu yapılar Şekil 10'da şematik olarak verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ferromanyetik nanoparçacıklar taşıyıcı akışkan içerisinde serbest haldeyken manyetik alana maruz kaldığında bu alana tepki

göstermektedirler. Manyetik alanın üniform olması durumunda nanoparçacıklar manyetik alan çizgileri doğrultusunda uc uca birleşerek zincir benzeri (chain-like) olarak ifade edilen yapıları oluşturmaktadır. Bu yapılar manyetik alan yönünde termal iletkenliğin artırılmasına ve ısı transferinin yönlendirilmesine katkıda bulunmaktadır. Uygulanan manyetik alanın üniform olmaması, diğer bir ifadeyle bir gradyana sahip olması durumunda ise nanoparçacıklar üzerinde belirli bir manyetik kuvvet oluşmakta ve nanoparçacıklar bu kuvvet karşısında kanal yüzeylerinde yığılabilmektedir. Bu yığılmalar, bölgesel termal iletkenliğin iyileşmesini sağlarken aynı zamanda akış esnasında akış bozucu olarak rol oynayabilmektedirler. Manyetik nanoparçacıklar arasındaki etkileşim ve çarpışmalar çalkantı ve türbülans şiddetini arttırmaktadır (Xuan vd. 2000, Buschmann, 2020).



Şekil 10. Ferromanyetik nanoparçacıklar, (a) manyetik alan yokken, (b) üniform manyetik alan altında zincir benzeri yapılar, (c) manyetik kuvvet altında yüzeyde yığılma

Ferroakışkanlar, bu özgün karakteristikleri ve sundukları üstün ısı transfer performanslarından dolayı birçok potansiyel uygulama alanının yanında özellikle ısı transferi alanında önemli yer tutmaktadırlar. Bu uygulama alanlarına örnekler Tablo 5'te verilmiştir (Selim vd. 2023).

Ferroakışkanlar, Tablo 5'ten de görüldüğü üzere mekanik, biyomedikal ve elektronik alanlarının yanı sıra aynı zamanda ısı transferi alanında gelecek vadede bir ısı transfer akışkanı olarak öne çıkmaktadırlar.

Tablo 5. Ferroakışkanların bazı uygulama alanları

Isı transferi ve endüstriyel soğutma uygulamaları	Ferroakışkanların endüstriyel soğutmada uygulanması enerji tasarrufu sağladığı gibi ayrıca karbondioksit, nitrojen oksit ve sülfür dioksit emisyonlarında azalma sağlanmaktadır.
Isı eşanjörü uygulamaları	Isı eşanjörlerinde ferroakışkan kullanımının ısıl performansını önemli ölçüde arttırmakta ve daha kompakt eşanjörler tasarlanabilmektedir.
Elektronik uygulamalar	Elektronik cihazlar tarafında üretilen ısıнын etkin bir şekilde uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır.
Ulaşım	Makine yağlarındaki yenilikler ve motor soğutucularının performansındaki iyileşmeler sayesinde, motor bloğunun soğutulması sırasında nanoakışkanların kullanımıyla zayıf olan ısı transfer kapasitesi arttırılmaktadır.
Enerji depolama uygulamaları	Faz değiştiren maddelerin içerisine nanoparçacık ilavesiyle ısı depolama kapasiteleri arttırılmaktadır.
Mikro elektromekanik sistemler	Mikro elektromekanik sistemlerin soğutulması ferroakışkanlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir.
Tıbbi uygulamalar	Kanserli hücrelerin ve tümörlerin bulunduğu bölgelere ilaçların taşınması ve bu bölgelerde etkili bir şekilde tutunabilmesi için manyetik nanoparçacıklar kullanılabilmektedir.
Güneş enerjisi uygulamaları	Suya kıyasla güneş kolektörlerinde nanoakışkan kullanılması termal performansta iyileşmeler sağlamaktadır.
Nükleer reaktörlerin soğutulması	Nükleer reaktörlerin soğutulmasında nanoakışkanların kullanımı kritik ısı akısı değerini arttırmaktadır.
Savunma sanayi	Savunma sanayisinde yer alan araçlarda nanoakışkanlar kullanılarak yüksek ısı akısı soğutma gerçekleştirilmektedir.
Tribolojik uygulamalar	Sürtünmeyi engellemede kullanılan yağlara nanoparçacıklar eklenerek aşınmaların önüne geçilmektedir.

1.4. Literatür Araştırması

Ferroakışkanlar, manyetik özellikleri ve ısı transferi performansları nedeniyle son yıllarda geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Literatürde, ferroakışkanların ısı transfer akışkanı olarak kullanımına yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar, ferroakışkanların farklı geometrilerde ve çeşitli sınır koşulları altında davranışlarını inceleyerek, bu akışkanların termal ve hidrodinamik özelliklerini detaylı bir şekilde analiz etmektedir. Tez kapsamında ise ferroakışkanların manyetik alan etkisi altındaki iç akışlarda ısı transfer performansının incelenmesi amaçlandığından, literatür araştırması bu alandaki

çalışmalara odaklanmıştır. Literatür araştırması; ferroakışkanın karakterizasyonu ve termofiziksel özellikleri, manyetik alan şiddeti ve hidrodinamik parametrelerin akış ve ısı transferine etkisi, manyetik alan türünün (sabit ya da alternatif) akış ve ısı transferine etkisi ve elektromıknatıs konumlarının akış ve ısı transferine etkisini inceleyen dört ana başlık altında sunulmuştur.

1.4.1. Ferroakışkanın Karakterizasyonu ve Termofiziksel Özellikleri

Ferroakışkanların performansı manyetik alan altında gösterdikleri davranışlar ve termofiziksel özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, ferroakışkanların karakterizasyonu ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi, bu malzemelerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için büyük önem taşımaktadır. Karakterizasyon yöntemleri arasında manyetik özelliklerin belirlenmesinde; parçacık boyutu dağılımı için dinamik ışık saçılımı (DLS), taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM) yüzey kimyası için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), titreşimli numune manyetometresi (VSM) gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, ferroakışkanların yapısını, stabilitesini ve manyetik alan etkisindeki davranışını anlamada kritik bilgiler sağlamaktadır.

Termofiziksel özellikler de ferroakışkanların ısı transferi uygulamalarındaki performansını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Özellikle, yoğunluk, viskozite, ısı iletkenlik ve özgül ısı kapasitesi gibi özellikler, ferroakışkanların farklı sıcaklık ve manyetik alan koşulları altındaki davranışlarını belirlemektedir. Örneğın, viskozite ve termal iletkenlik, akışkanın hidrodinamik ve termal performansını doğrudan etkilerken, manyetik alan altında bu özelliklerde meydana gelen değışimler, ferroakışkanların benzersiz davranışlarını ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, ferroakışkanların karakterizasyonu ve termofiziksel özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, bu malzemelerin ısı transferi uygulamalarındaki potansiyellerinin ortaya çıkarılması için vazgeçilmez bir adımdır.

Yıllar içerisinde ferroakışkanların karakterizasyonu ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve ferroakışkanların ısı transfer uygulamaları için kullanılabilirliğının arttığı gösterilmiştir (Kalsi vd. 2023). şahin & Namlı, (2018) yaptıkları bir çalışmada, nanoakışkanların ısı iletim katsayısı ve kararlılık özelliklerini, en sık kullanılan nanoakışkan hazırlanma yöntemlerini ve diğerk farklı yöntemleri incelemişlerdir. Nanoakışkanda kararlılığa etkileyen mekanizmalar ve kararlılığın

artırılması için yapılan çalışmalar gözden geçirilmiş ve her bir yöntemle elde edilen kararlılık süreleri araştırılmıştır. Çalışmada ısı iletim katsayısında elde edilen artışlar ve kararlılık süreleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur.

Li vd. (2005), ferroakışkanın termofiziksel özelliklerinin manyetik alan etkisi altındaki değişimini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında, ferroakışkanın viskozite ve termal iletkenlik değerlerinin manyetik alan şiddeti ve nanoparçacık hacim oranına bağlı değişimi araştırılmış ve çalışma sonuçları, ferroakışkanın nanoparçacık hacim oranındaki artışla birlikte termal iletkenlik değerinin 1,028'den 1,149'a kadar yükseldiğini ortaya koymuştur.

Yu & Xie (2011), nanoakışkanların hazırlanma yöntemleri, kararlılıklarının artırılması ve bunların ısı transferi üzerindeki etkileri üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, literatürdeki gelişmeleri derleyerek nanoakışkanların kullanım alanlarını sunmuşlardır. Çalışmada, nanoakışkanların diğer taşıyıcı akışkanlara kıyasla daha yüksek viskoziteye sahip olmasının pompalama gücü açısından önemli bir dezavantaj oluşturduğuna dikkat çekilmiştir. Bu olumsuz etkinin termal performans üzerindeki etkisini en aza indirmek amacıyla, düşük viskoziteli ve yüksek termal iletkenliğe sahip nanoakışkanların kullanımı önerilmiştir.

Gavili vd. (2012), %5 Fe_3O_4 nanoparçacık hacim oranına sahip su bazlı bir ferroakışkanın zamana bağlı olarak değişen termal iletkenliğini manyetik alan altında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, manyetik alana maruz bırakılan ferroakışkanın termal iletkenliğinin arttığı ve manyetik alan yoğunluğunun artırılmasının, ferroakışkanın termal iletkenliğini yükselttiği ancak maksimum değere ulaşma süresinin daha kısa olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, akışkana 1000 G'lik bir manyetik alan uygulandığında, termal iletkenliğin yaklaşık olarak 0,6'dan 1,9 W/mK'ye yükseldiği belirlenmiştir.

Sidik vd. (2014), literatürde kararlı yapıda nanoakışkanlar hazırlamak için önerilen farklı yöntemleri ele alan bir derleme çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada, metalik ve metalik olmayan nanoparçacıklar ile farklı taşıyıcı akışkanlar için tercih edilen kararlılık artırıcı yöntemler sunulmuş ve detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, nanoakışkanların uygulamalarında karşılaşılan zorluklar ve gelecekteki araştırma yönleri değerlendirilmiş, nanoakışkan sentezi ve karakterizasyonu üzerine ilgili yıla kadar elde edilen gelişmeler özetlenmiştir.

Angayarkanni & Philip (2015) ise çalışmalarında, nanoakışkanların farklı tekniklerle hazırlanma süreçlerini ayrıntılı olarak ele almış; termal iletkenlik ölçüm teknikleri, nanoakışkanlar ve faz değiştiren malzemelerde termal iletkenlik ile ısı kapasitesi üzerine

yapılan çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca, nanoakışkanların termal özelliklerini etkileyen faktörler (hacim oranı, nanoparçacık boyutu, nanoparçacık morfolojisi, arayüzey gerilimi, sıcaklık, baz akışkanın özellikleri ve aglomerasyon) detaylandırılmış, çeşitli mekanizmalar ve termal iletkenlik üzerine geliştirilen teorik modeller tartışılmıştır. Benzer bir araştırma Bahiraei & Hangi M. (2015) tarafından gerçekleştirilmiş olup, bu çalışmada manyetik nanoakışkanların termofiziksel özellikleri, ısı transferi türleri ve pratik uygulamaları incelenmiştir.

Alsaady vd. (2015) yaptıkları çalışmada taşıyıcı akışkan türü, manyetik alan yönü ve nanoakışkan oranının, ferroakışkanın termal iletkenlik ve viskozite değeri üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Çalışma sonuçları, taşıyıcı akışkan türünün termal iletkenlik üzerinde az bir etkisi olduğunu gösterirken, nanoparçacık oranı, manyetik alan şiddeti ve manyetik alan yönünün iletkenlik ve viskozite üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermiştir. Çalışmada özellikle manyetik alanın ısı geçiş yönüne dik uygulanmasıyla iletkenliğin %300'e kadar arttığı ortaya konulmuştur. Çalışmada ayrıca termal iletkenliğin belirlenmesi için teorik bir model önerilmiş ve ilgili model deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Wang vd. (2016) farklı manyetik alan şiddeti (0–30 mT) altında su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacığından oluşan ferroakışkanın viskozitesinin sıcaklığa bağlı (293–333 K) değişimi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, manyetik alan şiddetinin ve nanoparçacık hacim oranının artmasıyla ferroakışkanın viskozitesinin arttığını ve sıcaklık artışıyla da azaldığını göstermiştir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmayla, farklı sıcaklıklarda, hacim oranlarında ve manyetik alan şiddetlerinde ferroakışkanın viskozitesini tahmin etmek için ampirik bir korelasyon geliştirilmiştir.

Harandi vd. (2016), nanoparçacık hacim oranı ve sıcaklığın hibrit nanoakışkanların ısı iletim katsayısı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, nanoparçacık hacim oranı ve sıcaklık arttıkça termal iletkenliğin yükseldiği belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda, nanoparçacık hacim oranındaki artışın termal iletkenlik üzerindeki etkisinin düşük sıcaklıklara kıyasla daha belirgin olduğu vurgulanmıştır. Deneysel bulgulara dayanarak, f-MWCNTs– Fe_3O_4 /EG hibrit nanoakışkanlarının termal iletkenliğini tahmin etmek amacıyla sıcaklık ve nanoparçacık hacim oranına bağlı bir korelasyon önerilmiştir.

Sadeghinezhad vd. (2017), sabit bir manyetik alan altında laminar akış rejiminde gerçekleşen zorlanmış taşınım ile ısı transferi sürecinde hibrit grafen-manyetit nanoakışkanların ısı transfer özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir.

Çalışmada, bu hibrit nanoakışkanın termofiziksel ve manyetik özellikleri detaylı şekilde karakterize edilmiş ve termal iletkenliği değerlendirilmiştir. Nanoakışkan sentezi sırasında kullanılan grafen levhaların, manyetit nanoparçacıkların kararlılığını ve termal özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Beş farklı mıknatıs konumunda gerçekleştirilen deneyler sonucunda, manyetik alan etkisi altındaki hibrit nanoakışkanın taşınımıyla ısı transferinin önemli ölçüde arttığı ve yerel ısı transferinde %82'ye varan bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir.

Abadeh vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, su bazlı ferroakışkanların kararlı formda hazırlanmasında farklı parametrelerin (yüzey aktif madde türü, yüzey aktif madde miktarı, ısıtıcı-karıştırıcı hızı ve süresi, pH, ilk ve son sonikasyon süreleri) etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Hazırlanan ferroakışkanın kararlılık ve manyetik özellikleri sırasıyla Zeta potansiyeli ve titreşimli numune manyetometresi (VSM) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Birden fazla parametre içeren deneylerde Taguchi yöntemi uygulanmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Cheng & Kai (2021), tek adım metodu ile hazırlanan su bazlı bir ferroakışkanın kararlılığını, manyetik alan altındaki davranışları üzerinden değerlendiren deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, manyetik alan etkisiyle ferroakışkan yüzeyinde oluşan ve Taylor cone olarak adlandırılan konik yapı incelenmiştir. Ayrıca, tek adım yöntemiyle ferroakışkan üretiminde pH değerinin önemi vurgulanmış ve en uygun pH değeri 12,47 olarak belirlenmiştir.

1.4.2. Manyetik Alan Şiddetinin ve Hidrodinamik Parametrelerin Akış ve Isı Transferine Etkisi

Ferroakışkanlar, manyetik nanoparçacıklar içermesi nedeniyle manyetik alanlara karşı duyarlı bir akışkan olup uygulanan manyetik alanın şiddeti ve yönüne bağlı olarak farklı davranışlar sergilemektedirler. Aynı zamanda, hidrodinamik parametreler de (akış hızı-Reynolds sayısı, yoğunluk, viskozite ve kanal geometrisi) ferroakışkanların ısı transferi ve akış özelliklerini etkileyebilmektedir.

Lajvardi vd. (2010), su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıklar içeren bir ferroakışkanın dairesel kesitli bir kanaldaki akış ve ısı transferini, akışa dik uygulanan manyetik alan etkisi altında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma kapsamında Reynolds sayısı, nanoparçacık hacim oranı ve mıknatıs konumları araştırma parametreleri olarak dikkate alınmıştır. Yüksek hacim

oranlarında yapılan deneylerde, manyetik alan şiddetinin artmasıyla birlikte ısı transfer katsayılarının artış gösterdiği belirlenmiştir.

Sundar vd. (2012) ise dairesel kesitli bir kanalda akmakta olan ferroakışkanın zorlanmış taşınımıyla ısı transferini ve sürtünme faktörünü, belirli bir Reynolds sayısı aralığında ($3000 < Re < 22000$) ve belirli bir nanoparçacık hacim oranında ($0 < \phi_p < \%0,6$) deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, $\%0,6$ hacim oranına sahip ferroakışkanla yapılan deneylerde, ısı transfer katsayısının saf suya göre $\%30,96$ oranında arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu çalışma koşullarında yapılan deneylerden elde edilen verilerle Nusselt sayısı için, nanoparçacık hacim oranı, Reynolds sayısı ve Prandtl sayısına bağlı bir korelasyon elde edilmiştir.

Ashjaee vd. (2015), bir minyatür ısı alıcısında, su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacığından oluşan ferroakışkanın zorlanmış taşınımıyla ısı transferini ve basınç düşüşünü manyetik alan etkisi altında deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı akış hızları ($200 < Re < 900$), manyetik alan yoğunlukları ($B < 1400$ G) ve nanoparçacık hacim oranları ($\phi_p = 0,5, 1, 2$ ve 3) çalışma parametreleri olarak dikkate alınmış ve optimum çalışma koşulu olarak, basınç kaybı başına maksimum ısı transferi artışı esas alınmıştır. $\%3$ hacim oranı ve $Re = 300$ için yapılan deneylerde, 1200 G şiddetinde manyetik alan uygulanarak ısı transferinde $\%38$ oranında artış elde edilmiştir.

Hosseinzadeh vd. (2016), dairesel kesitli bir kanalda akmakta olan su bazlı ve Fe_3O_4 nanoparçacıklı bir ferroakışkanın taşınımıyla ısı transferini ve sürtünme katsayısını deneysel olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, manyetik alan şiddeti, Reynolds sayısı ve nanoparçacık kütle oranındaki artışla birlikte Nusselt sayısının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Çalışmada, $\%0,2$ kütle oranına sahip ferroakışkan ile yapılan deneylerde, Reynolds sayısının 2000 değeri için ısı transferinin saf suya kıyasla $\%25,17$ oranında arttığı tespit edilmiştir.

Sheikhnejad vd. (2017), sabit ısı akısı altında kısmen gözenekli ortamla doldurulmuş dairesel kesitli bir kanalda laminar akış rejiminde akmakta olan ferroakışkanın manyetik alan etkisi altında taşınımıyla ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. $\%2$ hacim oranına sahip ferroakışkan ile yapılan deneylerde, gözenekli ortam ve manyetik alan etkilerinin eş zamanlı bulunmasının temel akışkana kıyasla ısı transferini $\%2,4$ oranında iyileştirdiği bulunmuştur.

Sha vd. (2017), dairesel kesitli bir kanalda türbülans akış rejiminde akmakta olan ve farklı hacim oranlarında ($\%0,5, \%1, \%2$ ve $\%3$) Fe_3O_4 nanoparçacıklara sahip ferroakışkanın

zorlanmış taşınım ile ısı transferini, manyetik alan etkisi altında deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, manyetik alanın gradyanlı olarak uygulanmasının, üniform olarak uygulanmasına kıyasla ısı transferinde %8,1'lik bir artış sağladığını göstermiştir.

Türbülanslı akış rejimini dikkate alan benzer bir çalışma Ebaid vd. (2022) tarafından yapılmış olup, çalışmada su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıklı ferroakışkanın manyetik alan etkisi altındaki ısı transferi ve basınç düşüşü deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, 30 mT manyetik alan etkisi altında Nusselt sayısında %26,1 oranında bir artış sağlanmıştır.

Fadaei vd. (2017), manyetik nanoakışkanların zorlanmış taşınım ile ısı transferinin incelenmesine yönelik sayısal üç boyutlu bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, kalıcı mıknatıs ve elektromıknatısın etkilerini karşılaştırarak manyetik alan yoğunluğu ile Reynolds sayısının ısı transferine etkilerini değerlendirmişlerdir.

Guzel vd. (2017), sabit manyetik alan etkisi altında akan su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıklarından oluşan ferroakışkanın zorlanmış taşınım ile ısı transferi ve basınç düşüşünü incelemişlerdir. %0,25 nanoparçacık hacim oranına sahip ferroakışkan için belirli bir Reynolds sayısında gerçekleştirilen deneylerde, manyetik alan etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, ferroakışkanın ortalama ısı transfer katsayısının, manyetik alan etkisiyle saf suya göre %35 oranında arttığını ayrıca basınç düşümünün temel akışkana kıyasla %30 daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Dibaei vd. (2017), dairesel kesitli bir bakır boruda, sabit ve alternatif manyetik alan altında laminar rejimde ($670 \leq Re \leq 1700$) akan ferroakışkanın zorlanmış taşınım ile ısı transferini, hidrodinamik ve termal olarak tam gelişmiş akış koşullarında incelemişlerdir. Çalışma kapsamında, nanoparçacık hacim oranı, Reynolds sayısı ve manyetik alan türüne bağlı olarak frekans değeri gibi parametreler ele alınmıştır. Alternatif manyetik alan frekansının ve nanoparçacık hacim oranının artmasıyla ısı transferinde 4,62 kat artış gözlemlenmiş, ancak Reynolds sayısının artmasıyla bu değer 0,29'a kadar düşmüştür. Sonuç olarak, alternatif manyetik alanın sabit manyetik alana kıyasla daha verimli olduğu vurgulanmıştır.

Tetuko vd. (2020), dairesel kesitli bir kanalda %2, %3 ve %4 hacim oranlarında hazırlanan su bazlı ferroakışkanın, kanalın dış yüzeyinin belirli bir bölgesini çevreleyen dairesel kesitli bir mıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alan altındaki ısı transferini farklı Reynolds sayıları için ($Re = 171, 228$ ve 285) hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal analizler, sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiş olup, ek

olarak kanalın belirli bir bölgesine yerleştirilen ısıtıcı yardımıyla farklı ısılarda (15,75 W ve 20,6 W) deneyler yapılmıştır.

Eslahchi vd. (2021), Fe_3O_4 nanoparçacıklarından oluşan ferroakışkanın hidrodinamik ve termal davranışını değişken bir manyetik alan altında ve yatay bir yüzey üzerindeki bakırdan yapılmış U şeklindeki bir tüp içinde deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, nanoparçacık hacim oranı, Reynolds sayısı, eğrilik yarıçapı ve manyetik alan frekansı gibi parametrelerin akış davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Wang vd. (2023), dairesel kesitli bir kanalda manyetik alanın akış yönüne açılı olarak uygulanmasının ısı transferine etkisini sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, düşük Reynolds sayılarında ve manyetik alan açısının küçük olması durumunda ortalama ısı transfer katsayısının %102,65 oranında arttığı belirlenmiştir.

Shahsavar vd. (2023), yivli bir tüp içinde akan ferroakışkanın davranışını, farklı Reynolds sayıları (500–2000), nanoparçacık hacim oranları (%0–2), titreşim ivmeleri ($0\text{--}5\text{ m/s}^2$) ve döner manyetik alan koşullarını dikkate alarak incelemişlerdir. Nanoparçacık hacim oranı düşük olması durumunda titreşim etkisinin termal sınır tabakasını bozarak Nusselt sayısında daha yüksek iyileşmeye neden olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, Nusselt sayısında yaklaşık %21’lik bir artış sağlanmıştır. Benzer bir çalışma Rasaei vd. (2021) tarafından gerçekleştirilmiş olup, saat yönünde ve tersi yönde dönen iki manyetik alan kullanılarak dört farklı manyetik alan düzenlemesi oluşturulmuştur. $Re = 2000$ ve %2 nanoparçacık hacim oranı için en yüksek performans değerlendirme kriteri (PEC) değeri 1,601 olarak elde edilmiştir.

Kamyabi & Hosseini (2024), eş merkezli ikili halkasal boru sisteminde (annular), iç kısımda su ve dış kısımda ferroakışkanın akışını sağlayarak ferroakışkanın ısı eşanjörlerinde ısı transfer performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, farklı Reynolds sayıları, manyetik alan şiddetleri (446 G ve 907 G) ve nanoparçacık hacim oranları (%0,08 ve %0,16) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, maksimum ısı transfer iyileşmesinin düşük Reynolds sayılarında ortaya çıktığını göstermiştir. Ayrıca, deney tasarımı ve analizinde Taguchi yöntemi de kullanılmıştır.

Valizadeh vd. (2024), eş merkezli halkasal bir kanalda akan newtonumsu olmayan ferroakışkanın manyetik alan etkisi altındaki hidrodinamik ve termal davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, manyetik alanın ısı transferi üzerindeki etkisinin Reynolds sayısının artmasıyla azaldığı, ancak termal olarak gelişmekte olan bölgede belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Isı transferinde %70 oranında iyileşme

sağlanmıştır. Çalışmada ayrıca, akışta meydana gelen değişimlerin altındaki fiziksel süreçleri daha iyi ortaya koymak amacıyla sayısal analizler de gerçekleştirilmiştir.

1.4.3. Manyetik Alan Türünün Akış ve Isı Transferine Etkisi

Manyetik alan türü (sabit veya alternatif), ferroakışkanların akışı ve ısı transferi üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Manyetik alanın türüne bağlı olarak ferroakışkanların davranışları değişmekte ve bu da ısı transferi performansını ve akış özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Sabit manyetik alan, daha kontrollü ve yönlü bir ısı transferi sağlarken, alternatif manyetik alan, mikrokarıştırma etkisiyle homojen bir ısı transferi sağlamaktadır.

Ghofrani vd. (2013), alternatif bir manyetik alanın varlığında, dairesel bir bakır borudan akan su bazlı ferroakışkanın zorlanmış taşınım yoluyla ısı transferini, laminar akış koşulları altında deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada, alternatif manyetik alan, nanoparçacık hacim oranı ve Reynolds sayısının taşınım ile ısı transfer katsayısına etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve optimum çalışma koşulları belirlenmiştir. Alternatif manyetik alan frekansının ve hacim oranının artırılmasıyla yüksek ısı transfer oranları elde edilmiş olup, en yüksek %27,6'lık artış, $Re = 80$ 'de gözlemlenmiştir.

Goharkhah vd. (2015), üniform olarak ısıtılmış paralel plaka kanalında laminar rejimde akan ferroakışkanın zorlanmış taşınım ile ısı transferini, elektromıknatıslar tarafından akışa dik yönde uygulanan manyetik alan altında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, farklı nanoparçacık hacim oranları ve Reynolds sayıları için hem termal olarak gelişen hem de tam gelişmiş akış bölgelerinde çalışmalar yapılmış ve taşınım ile ısı transfer katsayılarını tahmin edebilmek amacıyla farklı termal iletkenlik modellerinin doğruluğunu değerlendirmek için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sabit manyetik alan altında %18,9, alternatif manyetik alan altında ise %31,4 oranında ısı transfer iyileşmesi rapor edilmiştir.

Bonab vd. (2015), dairesel kesitli bir bakır kanalda, üniform sabit ısı akışı altında akış gösteren Fe_3O_4 nanoparçacıklı ferroakışkanın zorlanmış taşınım ile ısı transferini alternatif manyetik alan etkisi altında hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada farklı nanoparçacık hacim oranları (%1, %2,5 ve %5) incelenmiş olup, %2,5 hacim oranına sahip ferroakışkanın %30'a varan iyileşme sağladığı belirtilmiştir.

Shahsavar vd. (2016), farklı yüzey aktif maddeler (TMAH, GA) kullanılarak üretilen ferroakışkanlar ile karbon nanoparçacıkları (CNT) içeren hibrit nanoakışkanın, sabit ve

alternatif manyetik alan etkisi altında, değişen Reynolds sayıları ve manyetik alan şiddetlerinde taşınım ile ısı transferini incelemişlerdir. Sonuçlar, özellikle sabit manyetik alan varlığında hibrit nanoakışkanların ısı transferinde önemli iyileşmeler sağladığını ve maksimum Nusselt sayısı artışının %62,7 olduğunu göstermiştir. Bu iyileşmenin, düşük Reynolds sayılarında ve yüksek nanoparçacık hacim oranlarında daha belirgin olduğu vurgulanmıştır.

Esmaili vd. (2017), Fe_3O_4 nanoparçacıklarından oluşan ferroakışkanın, laminar rejimde iç akış koşullarında alternatif manyetik alan etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, alternatif manyetik alan ile ısı transferinde %118 oranında artış sağlandığı belirlenmiş olup, bu artışın, alternatif manyetik alanın neden olduğu Neel ve Brownian mekanizmaları ile ilişkili olduğu vurgulanmıştır.

Amani vd. (2018), metal bir tüp içerisinde akan su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıkları içeren ferroakışkanın, sabit ve alternatif manyetik alan altındaki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün nanoparçacık hacim oranı, Reynolds sayısı, manyetik alan şiddeti ve frekans gibi parametrelere bağlı değişimi rapor edilmiştir. Sonuç olarak, Nusselt sayısını ve sürtünme faktörünü tahmin etmek için grup veri işleme yöntemi (GMDH) tabanlı bir polinom sinir ağı modeli oluşturulmuştur. En yüksek ısı transfer artışı, $\text{Re} = 200$ 'de, 20 Hz frekansındaki alternatif manyetik alan altında %2 hacim oranına sahip ferroakışkanla yapılan deneylerde elde edilmiş olup, Nusselt sayısında %36,2'lik bir artış sağlanmıştır. Aynı parametrelerde gerçekleştirilen deney sonucunda, termal iyileşme oranı 1,26 olarak belirlenmiştir.

Shyam vd. (2019), sabit ve alternatif manyetik alan etkisi altında, ısıtılmış paslanmaz çelik bir boruda akan ferroakışkanın ısı transfer özelliklerini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, manyetik kuvvet ile akışa ait atalet kuvvetlerinin etkileşimi araştırılmıştır. Sabit manyetik alan uygulamasıyla, manyetik alanın olmadığı duruma kıyasla ısı transferinde %23 oranında artış sağlandığı belirlenmiştir. Maksimum artış ise yaklaşık %39 olup, 0,1 Hz frekans değerindeki alternatif manyetik alan uygulaması ile elde edilmiştir.

Alsarraf vd. (2019), su bazlı Fe_3O_4 ve karbon nanotüp (CNT) içeren hibrit manyetik nanoakışkanın, sabit ancak üniform olmayan bir manyetik alan varlığındaki hidrodinamik ve termal performanslarını COMSOL programı aracılığıyla sayısal olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada, farklı yüzde hacim oranlarına sahip hibrit nanoakışkanlar belirli Reynolds sayıları ve manyetik alan şiddetlerinde analiz edilmiştir. Elde edilen

sonuçlara göre, en yüksek ortalama Nusselt sayısı, $Re = 500$ değerinde, %0,9 Fe_3O_4 ve %1,35 CNT içeren hibrit manyetik nanoakışkanında %109,31 olarak hesaplanmıştır.

Tekir vd. (2020), su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıklarından oluşan ferroakışkanın, dairesel kesitli bir kanalda zorlanmış taşınım ile ısı transferini, laminar akış koşullarında ($1122 < Re < 2124$), sabit ve alternatif manyetik alan etkisi altında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma parametreleri; nanoparçacık hacim oranı ($0 \leq \phi_p \leq 0,05$), alternatif manyetik alana bağlı olarak farklı dalga tipleri (sinüs, kare ve üçgen) ve frekans değerleri (2, 5 ve 15 Hz) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, alternatif manyetik alanın ısı transferini %35 oranında artırdığı ve bu etkinin düşük frekanslarda daha belirgin olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, kare dalga tipinin diğer dalga tiplerine kıyasla daha yüksek ısı transfer performansı sergilediği belirlenmiştir.

Ghadiri vd. (2021), laminar akış koşulları ($200 \leq Re \leq 1600$) altında, su bazlı ferroakışkanın ısıtılmış dairesel kesitli bir kanalda taşınım ile ısı transfer katsayısını sabit ve alternatif manyetik alan (10 Hz ve 50 Hz) etkisi altında deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, %3 hacim oranına sahip ferroakışkan kullanılarak 50 Hz frekansında alternatif manyetik alan uygulandığında, manyetik alan uygulanmayan duruma kıyasla ısı transfer katsayısında maksimum %5'lik bir artış sağlandığı belirlenmiştir.

Mehrez & Cafsi (2021), dikdörtgen kesitli bir kanalda akış gösteren su bazlı ferroakışkanın ısı transferine sabit manyetik alanın etkisini, sonlu hacim metodu kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, nanoparçacık hacim oranı (%0,01 ve %0,05), Reynolds sayısı ve manyetik alan şiddeti parametre olarak ele alınmıştır. Elde edilen bulgulara göre, miknatısın bulunduğu bölgenin yakınında termal sınır tabakasının kalktığı ve sirkülasyon bölgesi oluşarak yerel ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle, $\phi_p = 0,05$ ve $Re = 500$ olduğunda, ısı transferinde %86'ya kadar bir artış elde edilmiştir.

Zhang & Zhang (2021), alternatif manyetik alan etkisi altında su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıkları içeren ferroakışkanın akış ve ısı transferi özelliklerini, farklı Reynolds sayıları ve belirli nanoparçacık hacim oranlarında deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, düşük Reynolds sayılarında ve yüksek manyetik alan frekanslarında taşınım ile ısı transferinde iyileşmelerin görüldüğünü ortaya koymuştur. Ayrıca, ısı transfer performansındaki iyileşmenin, alternatif manyetik alan frekansı ve Reynolds sayıları ile birlikte başlangıçta arttığı, ancak belirli bir noktadan sonra kayda değer bir artış gözlemlenmediği belirtilmiştir.

Zhang vd. (2022), akış yönüne dik olarak uygulanan sabit manyetik alan altında ferroakışkanın akış ve ısı transferini laminar ve türbülanslı akış koşulları altında incelemiştir. Laminar akış koşulları altında, ferroakışkanın taşınımıyla ısı transfer katsayısı, $Re = 2000$, manyetik alan şiddeti 600 G, sıcaklık 30 °C ve nanoparçacık hacim oranı %2 olduğunda, saf suya kıyasla %11,31 oranında artış göstermiştir.

Şahin & Namlı (2023), sabit manyetik alan etkisi altında akan su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıklarından oluşan manyetik nanoakışkanın ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, sabit manyetik alan, dairesel kesitli test düzeneği etrafına helisel eksen boyunca yerleştirilen mıknatıslar aracılığıyla oluşturulmuştur. Farklı nanoparçacık kütle oranlarında (%0,5, %1 ve %2) hazırlanan manyetik nanoakışkan, belirli Reynolds sayılarında (3500-15000) sabit manyetik alan altında test edilmiş ve ortalama Nusselt sayıları hesaplanmıştır. %2 kütle oranına sahip ferroakışkan ile yapılan deneylerde, saf suya kıyasla ortalama Nusselt sayısında %60 oranında artış sağlandığı belirlenmiştir.

Gürdal vd. (2023), düz ve çukur yüzeye sahip bir kanalda akış gösteren su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıklı ferroakışkanın zorlanmış taşınımıyla ısı transferini alternatif manyetik alan ($B = 0,16$ T, $f = 5$ Hz) etkisi altında deneysel olarak incelemiştir. Laminar akış koşullarında ($1131 \leq Re \leq 2102$), %1 hacim oranına sahip ferroakışkan kullanılarak yapılan deneylerde, manyetik alan dalga tiplerinin ısı transferi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. $Re = 1131$ 'de üçgen dalga tipi kullanılarak alternatif manyetik alan uygulanan çukur yüzeyli kanalda, en yüksek Performans Değerlendirme Kriteri yaklaşık 1,45 olarak hesaplanmıştır. Benzer bir çalışma Gürdal vd. (2022) tarafından sayısal olarak Ansys Fluent programı ile gerçekleştirilmiş olup, yüksek manyetik alan değerlerinde ve %2,5 nanoparçacık hacim oranında Nusselt sayısında %72,48 oranında bir artış sağlandığı ve 1,126 PEC değeri elde edildiği belirtilmiştir. Altunay vd. (2022) tarafından yapılan diğer bir benzer çalışmada ise, çukur yüzeyli kanalın, pürüzsüz yüzeyli kanala kıyasla alternatif manyetik alan altında daha yüksek ısı transfer performansı ve sürtünme faktörü sunduğu gösterilmiştir.

Adogbeji vd. (2024), farklı manyetik alan şiddetleri ve dalga formları (kare, üçgen ve sinüs) altında, ısıtılmış dairesel kesitli bir bakır kanal içerisinde Fe_3O_4/TiO_2 nanoparçacıkları içeren farklı hacim oranlarındaki ($0,0065 \leq \phi_p \leq 0,1$) nanoakışkanların ısı transfer özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, yüksek nanoparçacık hacim oranlarında (%0,1) akış direncinin arttığı, ancak termal verimliliğin azaldığı, düşük hacim oranlarında ise termal performansın arttığı belirlenmiştir. %0,0125 hacim oranında ve kare dalga formunda

manyetik alan uygulanarak yapılan deneylerde, ısı transferinde %28,21 oranında artış sağlandığı belirtilmiştir.

Mulka vd. (2024), ferroakışkanın dairesel kesitli bir kanaldaki laminar akışı sırasında, beş kalıcı mıknatıs tarafından oluşturulan sabit manyetik alanın farklı açılarda uygulanmasının ısı transferi ve basınç düşümü üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

1.4.4. Elektromıknatıs Konumlarının Akış ve Isı Transferine Etkisi

Ferroakışkanların manyetik alan altında gösterdikleri bazı davranışlar iç akışlarda zorlanmış taşınım ile ısı transferini olumlu yönde etkilemekte ve böylece ısı taşınım katsayısı artmaktadır. Elektromıknatısların konumu taşınım ile ısı transferini değerlendirmede önemli bir parametredir.

Azizian vd. (2014), dikey bir kanalda laminar akış rejiminde akmakta olan manyetik nanoakışkanın, farklı mıknatıs konumları altında manyetik alan etkisiyle nasıl davrandığını hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, farklı konumlandırılan mıknatıslar ile oluşturulan manyetik alanın üniform veya gradyan formda (üniform olmayan) uygulanmasının taşınım ile ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, en yüksek bölgesel ısı taşınım katsayısı artışının (%300), üniform olmayan manyetik alanın termal olarak tam gelişmiş bölgeye uygulanmasıyla sağlandığını göstermiştir.

Yarahmadi vd. (2015), sabit ısı akışı altında dairesel kesitli bir kanalda laminar rejimde akmakta olan ferroakışkanın manyetik alan etkisi altındaki zorlanmış taşınım ile ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada manyetik alan şiddeti ve türü (sabit, alternatif), Reynolds sayısı ve nanoparçacık hacim oranı gibi parametreler dikkate alınarak farklı mıknatıs konumlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, alternatif manyetik alan uygulandığında düşük Reynolds sayılarında ve yüksek nanoparçacık hacim oranlarında ısı transferinde iyileşme gözlemlenmiştir. Alternatif manyetik alan altında %19,8 oranında artış sağlandığı belirlenmiştir.

Goharkhah vd. (2015, 2016), üniform olarak ısıtılmış paralel plakalar arasında laminar rejimde akan su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacık içeren ferroakışkanın manyetik alan altındaki zorlanmış taşınım ile ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, ferroakışkanın farklı nanoparçacık hacim oranlarında ve belirli Reynolds sayılarında davranışı araştırılmıştır. Elektromıknatısların konumlarına ilişkin optimum düzenleme,

COMSOL programı ile simüle edilmiş ve elde edilen manyetik kuvvet dağılımlarına dayalı olarak ısı transferi analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, mıknatısların dağınık yerleşimiyle oluşturulan yüksek gradyanlı manyetik alanların, ısı transferinde daha yüksek iyileşmelere yol açtığını göstermiştir.

Asfer vd. (2016), sabit ısı akısı sınır koşullarında, dairesel kesitli bir kanalda akış halinde bulunan ferroakışkanın taşınımıyla ısı transferini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, ferroakışkanın farklı akış hızlarında ve uygulanan manyetik alan altında farklı mıknatıs konumlarına verdiği tepki, infrared termografi (IRT) tekniği kullanılarak COMSOL programı ile analiz edilmiştir.

Cherief vd. (2017), manyetik kaynağın uzunluğunun ferroakışkan akışı üzerindeki termo-hidrolik etkilerini incelemişlerdir. Laminer akış koşulları altında gerçekleştirilen çalışmada, manyetik kaynağın uzunluğu, Reynolds sayısı ve nanoparçacık hacim oranı gibi parametrelerin taşınımıyla ısı transferi ve basınç düşüşüne etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, en iyi termal performansın manyetik alanın akışa dik olarak uygulandığı ve düşük Reynolds sayılarında elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, nanoparçacık hacim oranının artışının ısı transfer katsayısını iyileştirdiği ancak aynı zamanda basınç düşüşünde de artışa yol açtığı tespit edilmiştir.

Khairul vd. (2017), kimyasal çökertme yöntemiyle üretilen ve farklı nanoparçacık hacim oranlarına (%0,25 ve %0,5) sahip ferroakışkanları, dairesel kesitli dikey bir kanalda kalıcı mıknatısların ürettiği manyetik alana maruz bırakarak, farklı mıknatıs konumlarında hem laminer hem de türbülanslı akış rejimlerinde ısı transferi ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, test bölgesine daha fazla mıknatıs yerleştirilmesiyle %21 oranında ısı transferi iyileştirilmiş ancak manyetik alanın basınç düşüşü üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.

Zonouzi vd. (2018), dikey olarak konumlandırılmış dairesel kesitli bir kanalda akmakta olan su bazlı %2 Fe_3O_4 nanoparçacık içeren ferroakışkanın, etrafına eş merkezli ve eşit aralıklarla yerleştirilen mıknatıslar tarafından oluşturulan manyetik alan altındaki ısı transferi ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, mıknatısların oluşturduğu manyetik alan etkisiyle Reynolds sayısının artması durumunda ısı transfer katsayısının azaldığını göstermektedir. $Re = 580$ ve %2 hacim oranında gerçekleştirilen deneylerde, yerel olarak maksimum %48,9 oranında ısı transferi artışı sağlandığı belirlenmiştir.

Shafi & Keshavarz (2018), sabit ısı akısı altında laminar akış koşullarında hareket eden ferroakışkanın termal ve hidrodinamik performansını sabit ve alternatif manyetik alan altında incelemiştir. Çalışmada, bir bakır boru içerisindeki akış incelenirken, borunun belirli bir kısmının paramanyetik özelliklere sahip ve %0,46 gözenekliliğe sahip bir ortam içerdiği belirtilmiştir. Reynolds sayısı, manyetik alan frekansı ve nanoparçacık hacim oranı çalışma parametreleri olarak ele alınmış olup, manyetik alanın taşınım ile ısı transferi üzerindeki etkisinin gözenekli ortamda belirgin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir.

Wang vd. (2019), kalıcı mıknatıslardan oluşan sabit manyetik alan altında, farklı mıknatıs konumlarında gerçekleştirilen deneyler ile ferroakışkanın akış ve ısı transferi özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, farklı Reynolds sayılarında taşınım ile ısı transferi ve Nusselt sayıları elde edilmiştir. Deney sonuçlarının güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla teorik tahminler ile deneysel veriler karşılaştırılmış ve %10'dan daha az sapma ile iyi bir uyum sağlandığı belirlenmiştir.

Abadeh vd. (2020), sabit ve alternatif manyetik alanın etkisi altında, dairesel kesitli bir kanalda laminar akış rejiminde akan ferroakışkanın taşınım ile ısı transferi ve basınç düşümü üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. DLS, VSM, Zeta potansiyeli ve TEM yöntemleriyle karakterizasyonu yapılan ferroakışkan, farklı hacim oranları ve manyetik alan şiddetleri altında belirli Reynolds sayılarında test edilmiştir. Çalışmada, alternatif manyetik alan uygulandığında, 10 Hz ve 100 Hz frekans değerlerinde Nusselt sayısında sırasıyla %11,85 ve %14,8 oranında artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, manyetik alan frekansının daha fazla artırılmasının ısı transferinde ek bir iyileşme sağlamayacağı belirlenmiştir.

Gao vd. (2020), su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıkları içeren ferroakışkanın termofiziksel özelliklerinin, farklı mıknatıs sayısı ve konumlarına bağlı olarak değişimini farklı nanoparçacık hacim oranlarında incelemiştir. Çalışmada, ferroakışkanın özgül ısı kapasitesi, viskozitesi ve termal iletkenlik değerlerinin, mıknatıs konumları ve sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiği araştırılmıştır. Manyetik alan şiddeti 600 G, nanoparçacık hacim oranı %2 ve Reynolds sayısı 2000 olduğunda, ısı transferinde %11,7 oranında bir artış gözlemlenmiştir.

Valitabar vd. (2020), paralel iki plaka arasında akış halinde bulunan ferroakışkanların, sabit manyetik alan altındaki zorlanmış taşınım ile ısı transferine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, farklı yüzde hacim oranlarına sahip ferroakışkanların ($\phi_p = 0,25-2$), mıknatısın yan duvarlara olan mesafesinin değiştirilmesiyle elde edilen manyetik akı

yoğunluğu altındaki davranışı değerlendirilmiştir. Farklı debilerde gerçekleştirilen deneyler sonucunda Nusselt sayısının dağılımı analiz edilmiştir. Sonuçlar, sabit manyetik alanın etkisiyle nanoparçacıkların cidar yüzeyinde birikmesi sonucu termal sınır tabakasının incelmesini ve %1 hacim oranındaki ferroakışkan ile gerçekleştirilen deneylerde ısı transferinde yaklaşık %9 oranında bir artış sağlandığını göstermiştir.

Sun vd. (2020), Fe_3O_4 nanoparçacıklarından oluşan su bazlı ferroakışkanın manyetik alan etkisi altındaki akış ve ısı transferi özelliklerini farklı mıknatıs konumlarında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, 700 Gauss manyetik alan şiddeti altında, $\text{Re} = 1080$ ve %0,5 nanoparçacık hacim oranında gerçekleştirilen deneyde, yerel Nusselt sayısında %7,19 oranında artış sağlanmıştır. Ayrıca, 28,6 Gauss/mm manyetik alan gradyanı altında yapılan ölçümlerde, yerel Nusselt sayısında %32 oranında artış elde edilmiştir.

Zhai vd. (2021), su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacıkları içeren ferroakışkanın taşınımıyla ısı transferini, spiral geometrili dairesel kesitli bir kanalda manyetik alan altında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada Reynolds sayısı (800–10.000), nanoparçacık hacim oranı (0,1, 0,3 ve 0,5), manyetik alan şiddeti (0 mT, 20 mT, 30 mT ve 40 mT), mıknatıs konumları ve dış eğrilik çapı gibi parametreler dikkate alınmıştır. Sonuçlar, daha büyük bir dış eğrilik oranına sahip spiral kanal kullanıldığında, ısı transferinde %57,8 oranında iyileşme sağlandığını göstermiştir.

Sun vd. (2023), türbülantörli bir kanalda akmakta olan ferroakışkanın, manyetik alan etkisi altındaki zorlanmış taşınımıyla ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, mıknatısların kanal üzerine farklı konumlandırılması durumunda ısı transferi ve basınç düşüşü hesaplanmıştır. İkinci bir mıknatısın yerleştirildiği deneylerde, Reynolds sayısının artırılmasıyla taşınımıyla ısı transferinin %49,82 oranında iyileştiği belirlenmiştir.

Gürsoy vd. (2023), alternatif manyetik alan altında %1 hacim oranına sahip çukur yüzeyli bir kanalda akmakta olan ferroakışkanın elektromıknatıs konumunun ($x/D = 20, 40, 60$) ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada, çukur yüzeyli kanala ait performans değerlendirme kriterlerinde en yüksek artış, $B = 0,16$ T manyetik alan şiddetinde ve $\text{Re} = 2102$ 'de $x/D = 20$ konumunda %33,54 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, elektromıknatıs konumlarının değiştirilmesi durumunda sürtünme faktöründe önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Literatürdeki bazı çalışmalar Tablo 6' da özet halinde verilmiştir.

Tablo 6. Ferroakışkanın manyetik alan etkisi altındaki iç akışında ısı transferinin incelenmesine dair literatür özeti

Yazarlar/ Kanal Geometrisi	Temel Akışkan- Nanoparçacık ve Hacim Oranı ϕ_p (%)	Reynolds Sayısı	Manyetik Alan Türü ve Şiddeti	Sonuçlar
Ghofrani vd. (2013) Dairesel	Saf su - Fe_3O_4 0, 2	80 - 1350	Alternatif 0,02 Tesla 5Hz, 50 Hz	$\phi_p = 2$ ve $\text{Re}=80$, $f=50\text{Hz}$ değerinde ısı transferinde %27 oranında iyileşme sağlanmıştır.
Azizian vd. (2014) Dairesel	Saf su - Fe_3O_4 0,86	500 - 1400	Sabit 1,32 T	Reynolds sayısı 745'te ısı transferinde %300'ün üzerinde iyileşme sağlanmıştır.
Goharkhah vd. (2015) Dairesel	Saf su - Fe_3O_4 1, 1,5 ve 2	400 - 1200	Sabit ve Alternatif 500 G, 5Hz	Isı transferindeki maksimum iyileşme %31,4 olup alternatif manyetik alan ile sağlanmıştır.
Bonab vd. (2015)/ Dairesel	Saf su - Fe_3O_4 1, 2,5 ve 5	1176 - 1634	Alternatif/ $f=10\text{Hz}$, 0,07T	%2,5 hacim oranlı ferroakışkan ile yapılan deneylerde ısı transferinde %30'lara varan iyileşme görülmüştür.
Yarahmadi vd. (2015) Dairesel	Saf su - Fe_3O_4 1,25, 2,5, 5	465 - 1660	Sabit ve Alternatif/ 700G, 10Hz, 20Hz, 50 Hz	$\text{Re} = 465$, $\phi_p = \%5$ ve $f=50\text{ Hz}$, olduğunda ısı transferinde maksimum %19,8'lik artış sağlanmıştır.
Ashjaee vd. (2015) Dairesel	Saf su - Fe_3O_4 0,5, 1, 2, 3	200 - 900	200-1200G	%3 hacim oranı ve Reynolds sayısı 300 de yapılan deneylerde 1200 G manyetik alan uygulanması ile ısı transferindeki artış %38 olmaktadır.
Shahsavar vd. (2016) Dairesel	Saf su / Fe_3O_4 / CNT/ Fe_3O_4 (0,5–0,9) CNT($0,25 < \phi_p < 1,35$)	548 - 2190	Sabit ve Alternatif	Sabit manyetik alan altında hibrit nanoakışkan ile Nusselt sayısında maksimum %62,7'lik bir artış sağlanmıştır.
Sadeghinezhad vd. (2017) Dairesel	Saf su - Fe_3O_4 - graphene oxide 0,5	294 - 1765	Sabit 1320 mT	Yerel taşınım ile ısı transferi %82'ye kadar artırılmıştır.
Khairul vd. (2017) Dairesel	Saf su - Fe_3O_4 0,25, 0,5	700 - 4700	Sabit 5180T	Test bölgesine daha fazla mıknatıs yerleştirilmesiyle ısı transferi %21 oranında iyileştirilmiştir.
Zonouzi vd. (2018) Dairesel	Saf su - Fe_3O_4 2	580, 710 ve 820	Sabit 350mT	$\text{Re}=580$ ve %2 hacim oranında yapılan deneylerde ısı transferinde yerel olarak maksimum %48,9 oranında artış sağlanmıştır.

Tablo 6'nın devamı

Alsarraf vd. (2019) Dairesel	vd. Saf su - Fe ₃ O ₄ ve CNT 0,5, 0,7, 0,9	500,1000, 1500 ve 2000	Sabit ve Alternatif 500, 700, 1000G	Yapılan sayısal analizde en yüksek ortalama Nusselt sayısı, Re=500 değerinde %0,9 Fe ₃ O ₄ ve %1,35 CNT içeren hibrit manyetik nanoakışkanlarda %109,31 olarak elde edilmiştir.
Tekir vd. (2020) Dairesel	vd. Saf su - Fe ₃ O ₄ $0 \leq \phi_p \leq 0,05$	1122 - 2124	Sabit ve Alternatif f=2, 5 ve 15 Hz, 0,3 T	Alternatif manyetik alanın %35 oranında ısı transferini arttırdığını ve bu değer düşük frekanslarda daha belirgin olduğu belirtilmiştir.
Abadeh vd. (2020) Dairesel	vd. Saf su - Fe ₃ O ₄ 0,5 ve 1	535, 1070, 1605 ve 2140	Sabit ve Alternatif 770G ve 1300G, 10Hz ve 100Hz	Alternatif manyetik alan uygulanması sırasıyla 10 ve 100 Hz frekansında %11,85 ve %14,8 oranında Nusselt sayısı artmıştır.
Gao vd. (2020) Dairesel	vd. Saf su - Fe ₃ O ₄ 0,05, 0,5 ve 2	200 - 1400	Sabit 600G	Manyetik alan şiddeti 600 G, nanoparçacık hacim oranı %2 ve Reynolds sayısı 2000 olduğunda ısı transferinde %11,7 artış sağlanmıştır.
Valitabar vd. (2020) Paralel plaka	vd. Saf su - Fe ₃ O ₄ 0,25, 0, 5, 0,75, 1 ve 2	(12-18)ml/s (Debi aralığında)	Sabit 1000 mT	%1 hacim oranındaki ferroakışkan deneylerinde ısı transferi %9 oranında artmıştır.
Sun vd. (2020) Dairesel	vd. Saf su - Fe ₃ O ₄ 0,1 0,5, 0,9	400 - 2000	Sabit 1,28T	28,6 Gauss/mm'lik bir manyetik alan gradyanı altında yerel Nusselt sayısında %32,0 oranında artış sağlanmıştır.
Zhai vd. (2021) Dairesel kesitli spiral kanal	vd. Saf su - Fe ₃ O ₄ 0,1, 0,3 ve 0,5	800- 10,000	Sabit 10 mT, 20 mT, 30 mT ve 40 mT	Daha büyük bir dış eğrilik oranına sahip spiral kanal kullanılması halinde ısı transferinde % 57,8 oranında iyileşme sağlanmıştır.
Ghadiri vd. (2021) Dairesel	vd. Saf su - Fe ₃ O ₄ 1ve 3	200 - 1600	Sabit ve Alternatif 300G, 10-50Hz	50 Hz frekansında alternatif manyetik alan uygulaması ile B=0 duruma kıyasla taşınım ısı transfer katsayısında maksimum %5'lik bir artış elde edilmiştir.
Zhang & Zhang (2021) Dairesel	vd. Saf su - Fe ₃ O ₄ 1, 3 ve 5	944 - 8413	Sabit ve alternatif 0,01-0,09T, 0 – 100 Hz	Çalışmada ısı transfer performansındaki iyileşmenin, alternatif manyetik alan frekansı ve Reynolds sayıları ile önce arttığına ve daha sonrasında ise fazla bir artışın gözlemlenmediğine vurgu yapılmıştır.

Tablo 6'nın devamı

Ebaid (2022) Dairesel	vd.	Saf su - Fe_3O_4 1,2, 0,6, 0,3	2180 - 9160	Sabit 45,5 mT 15,1, 30,3	30mT manyetik alan etkisi altında Nusselt sayısında % 26,1 değerinde artış sağlanmıştır.
Zhang (2022) Dairesel	vd.	Saf su - Fe_3O_4 0,5, 1, 1,5, 2	800 - 2000	Sabit 200-1000 G	Laminer akış koşulları altında, ferroakışkanın taşınımıyla ısı transfer katsayısı Reynolds sayısı 2000, manyetik alan gücü 600G, sıcaklık 30 °C ve nanoparçacık hacim oranı %2 olduğunda saf suya kıyasla %11,31 oranında artış göstermiştir.
Gürdal (2023) Dairesel ve çukur yüzeyli	vd.	Saf su - Fe_3O_4 1	1131 - 2102	Alternatif (kare, üçgen ve sinüs) 0,16 T f = 5 Hz	Re = 1131'de üçgen dalga tipi uygulanarak alternatif manyetik alana maruz kalan çukur yüzeye sahip kanalda en yüksek PEC yaklaşık 1,45 olarak hesaplanmıştır.
Gürsoy (2023) Dairesel ve çukur yüzeyli	vd.	Saf su - Fe_3O_4 1	1131 - 2102	Alternatif 0,1T, 0,3T	Çukur yüzeyli kanalda 0,16 T manyetik alan altında, Re = 2102'de $x/D = 20$ olması durumunda PEC değeri %33,54 olarak hesaplanmıştır.

Literatürde, ferroakışkanların iç akışlarda manyetik alan altında zorlanmış taşınımıyla ısı transferi süreçleri incelendiğinde, bu süreci önemli ölçüde etkileyerek yüksek ısı taşınım katsayılarının elde edilmesini sağlayan çeşitli karmaşık fiziksel mekanizmalar dikkat çekmektedir. Bu mekanizmalar şu şekilde özetlenebilir:

- Termal iletkenliğin artışı: Manyetik nanoparçacıklar, taşıyıcı akışkana kıyasla daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir ve taşıyıcı akışkana eklendiklerinde akışkanın genel termal iletkenliğini artırır.
- Nanoparçacıkların manyetik kuvvet etkisiyle hareketi: Manyetik alanın etkisiyle, nanoparçacıklar üzerine etkiyen manyetik kuvvet, onları kuvvet yönünde hareket ettirerek yüzeye yakın bölgelerde birikmelerine ve kanal içerisinde yüksek yerel nanoparçacık yoğunluklarının oluşmasına neden olur. Bu yoğun bölgeler, yerel termal iletkenliğin belirgin şekilde artmasını sağlar ve bunun bir sonucu olarak bölgesel ısı transferi yükselir. Ayrıca, bu birikim akış düzenini bozarak akışkan içinde karışım oluşturan birer engel gibi davranarak ısı transferini daha da artırır.
- Zincir benzeri yapıların oluşumu: Manyetik alana maruz kalan nanoparçacıklar, kanal içinde manyetik alan çizgileri boyunca birbirlerine tutunarak zincir benzeri

yapılar oluşturabilir. Bu yapılar, birer termal köprü görevi görerek ısı transfer sürecine katkı sağlar.

Manyetik alan altında gerçekleşen bu fiziksel mekanizmalar, ferroakışkanın akış dinamiklerini ve termofiziksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilmekte, hatta kontrollü bir şekilde yönlendirilmesine olanak tanımaktadır. Ferroakışkanların manyetik alana karşı gösterdiği bu özgün tepkiler, onların geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlamış ve özellikle ısı transferi alanında gelecek vadeden bir ısı transfer akışkanı olarak öne çıkmasına neden olmuştur. Bu durum, ısı transferini iyileştirme yöntemlerine yeni bir perspektif kazandırmış ve bu alana yönelik bilimsel ilginin son yıllarda artmasına neden olmuştur (Kalsi vd. 2023).

1.5. Tezin Amacı ve Kapsamı

Ferroakışkanlar manyetik alan etkisi altında gösterdikleri benzersiz davranışlar nedeniyle başta ısı transferi uygulamaları olmak üzere, endüstri, tıp, biyomühendislik, uzay araştırmaları gibi birçok uygulama alanında yer bulmaktadırlar. Manyetik alanlar etkisinde yönlendirilen ferroakışkanlar, özellikle ısı geçişini iyileştirmek suretiyle, daha küçük ve verimli ısı değiştiricilerin tasarlanmasına olanak sağlamaktadırlar. Bu durum özellikle yüksek ısıl performans gerektiren endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda ısı transferinin yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle çalışma kapsamında, ferroakışkanların, manyetik alan etkisi altında, akış ve ısı transfer mekanizmalarının deneysel incelenmesi ve ısı transfer performanslarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, ferroakışkanların en yüksek ısıl performansı manyetik alan gradyanının en yüksek olduğu bölgelerde gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum dikkate alınarak, çalışma kapsamında manyetik alan uygulaması için, “faz açılı manyetik alan” ve “değişken yönlü manyetik alan” olmak üzere iki özgün sistem tasarlanmıştır.

Çalışmadaki ilk özgün tasarım, karşılıklı yerleştirilen elektromıknatıs kutuplarının aralarında faz açısı bulunan iki farklı sinyal ile beslenmesidir. Literatürde elektromıknatıs kutuplarının genellikle karşılıklı yerleştirilip tüm kutupların aynı sinyal ile sürekli beslendiği görülmektedir. Bu çalışmada iki farklı sinyal arasında faz açısı uygulanmasıyla elektromıknatısların aynı zaman adımı yerine faz açısına bağlı olarak kesintili devreye girmeleri sağlanmıştır. Yapılan bu düzenleme ile elektromıknatıs kutupları arasındaki

manyetik alan gradyanının, manyetik kuvvetin ve nanoparçacık hareketlerinin artırılması ve bu mekanizmaların ısı geçişi üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Çalışmadaki bir diğer özgün tasarım, değişken yönlü manyetik alan uygulamasıdır. Literatürde genellikle aynı yönlü mıknatıs yerleşimleri tercih edilmektedir. Tez kapsamında manyetik alan etkisi, hem aynı yönlü hem de değişken yönlü mıknatıs yerleşimleri ile sağlanmış ve tüm yerleşimler için geniş parametre aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yüksek manyetik gradyanın oluşturduğu manyetik kuvvet etkisiyle, nanoparçacıklar düzenli olarak zıt yönde ve yüzeye doğru yönlendirilerek akışta çalkantı hareketinin ortaya çıkması ve bu nanoparçacık hareketlerinin ısı transfer performansına etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Deneyler 700G sabit manyetik alan şiddeti altında, farklı Reynolds sayıları (400 -1000) ve nanoparçacık hacim oranları (%0,5 ve %1) için gerçekleştirilmiştir. Faz açılı manyetik alan uygulamasında, manyetik alan frekansı (0 Hz, 1 Hz ve 5 Hz) ve faz açıları (0°, 90° ve 180°) için ferroakışkanın ısı transfer performansı incelenmiştir. Değişken yönlü manyetik alan uygulamasında ise manyetik alan, akış hattı boyunca farklı eksen ve yönlerde, sürekli olarak uygulanmış ve 6 farklı mıknatıs düzeninin ısı transferi performansına etkisi değerlendirilmiştir. Nanoparçacık hacim oranı, Reynolds sayısı, manyetik alan frekansı ve faz açısı, mıknatıs konumları çalışma parametreleri olarak ele alınmış ve bu parametrelerin ısı transfer performansı üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Deneylerdeki geniş parametre aralığı, yapılan deney sayısını ve bu deneylerde kullanılan ferroakışkanın termofiziksel özelliklerini titizlikle belirlemeyi gerektirmedi. Bu nedenle çalışmada ilk olarak Fe_3O_4 tozları temin edilmiş, iki adım yöntemi ile iki farklı nanoparçacık hacim oranında su bazlı ferroakışkan üretimi, karakterizasyonunun yapılması ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Yapılan özgün uygulamalar sayesinde; akış içerisindeki çalkantı şiddetinin artırılması, ısıl iletkenliğin iyileştirilmesi ve nanoparçacık yönelme, kümelenme, çarpışma hareketlerinin ferroakışkan akışı, ısı geçişi ve basınç düşümüne etkilerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Akış gözleme deneyleri, manyetik alan etkisi altında ferroakışkanın davranışının belirlenmesi ve incelenen parametrelerin akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerinin ortaya konulması açısından önem taşımaktadır. Bu amaçla ferroakışkana ait akış görüntüleri elde edilerek nanoparçacık davranışlarının akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, ferroakışkanın hazırlanması, manyetik alan sistemlerinin tasarımı ve üretimi, deney düzeneği kurulum aşamaları, çalışma koşulları ve hesaplama yöntemleri hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmaktadır. İlk olarak ferroakışkanın hazırlanması, karakterizasyonu ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi süreci detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Manyetik alan oluşturma süreci iki farklı sistemin tasarım ve üretim aşamalarını içermektedir. İlk süreç faz açılı manyetik alan uygulaması altında, ikinci süreç ise sabit manyetik alan etkisi altındaki farklı mıknatıs düzenlemeleri için ısı transferinin incelenmesini amaçlayan deneysel kurulum, yöntem ve yönetim aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamada, mıknatısların yerleştirilme konumları, manyetik alan uygulama yöntemleri ve sistemin genel yapısı tanıtılarak; deney öncesinde yapılan şartlandırma ve deneyin uygulanma süreci ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı olarak, “faz açılı manyetik alan” uygulaması ve “değişken yönlü manyetik alan” uygulaması önerilmiş ve bu doğrultuda deneyler yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar aşağıdaki ana başlıklar altında toplanmıştır:

- Ferroakışkanın Hazırlanması
- Faz Açılı Manyetik Alan Uygulaması
- Değişken Yönlü Sabit Manyetik Alan Uygulaması
- Deneysel Yöntem
- Deney Düzeneğinin Doğrulanması
- Mıknatıs Yerleşim Pozisyonlarının Belirlenmesi

2.1. Ferroakışkanın Hazırlanması

Isı transfer deneyleri için taşıyıcı akışkanı saf su olan, %0,5 ve %1 Fe_3O_4 nanoparçacık hacim oranlarında iki ayrı ferroakışkan hazırlanmıştır. Ferroakışkanın; nanoparçacık, konsantrasyonu, termofiziksel özellikleri ve kararlılığı gibi özelliklerinin doğru bir şekilde elde edilmesi, deneysel çalışmaların sağlıklı bir biçimde yürütülmesi açısından kritik öneme sahip olup tüm süreçler literatüre uygun olarak titizlikle gerçekleştirilmiştir.

Üretim sürecinin daha pratik olması ve kimyasal işlemleri minimize etmesi nedeniyle, nanoakışkan üretiminde iki adım yöntemi tercih edilmiştir (Dey vd. 2016). Bu yöntemde, önceden sentezlenmiş nanoparçacıklar toz formunda temin edilip, belirlenen hacim oranında taşıyıcı akışkan ile karıştırılmaktadır (Sun vd. 2020). Bu amaçla, 20 nm boyutundaki Fe_3O_4 nanoparçacıkları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) bünyesindeki Nanografi firmasından toz formunda satın alınmıştır. Fe_3O_4 nanoparçacıklara ait görsel ve teknik özellikler Şekil 11’de ve Tablo 7’de sunulmuştur.



Şekil 11. Fe_3O_4 nanoparçacık tozu

Tablo 7. Fe_3O_4 nanoparçacık tozuna ait teknik özellikler

Ortalama Nanoparçacık Boyutu	13-18 nm
Safılık	%99,5
Renk	Koyu kahverengi
Morfoloji	Küresel
Yüzey Alanı	>80 m ² /g
Özkütle (Bulk):	0,9 g/cm ³
Özkütle (True)	5,1 g/cm ³

Ferroakışkanların kararlılığını etkileyen çeşitli parametreler detaylı bir şekilde incelenmiş ve hazırlama süreçleri literatüre uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Manay vd. 2016; Özbaldan, 2017; Şahin & Namlı, 2018; Cheng & Kai, 2021; Zabek vd. 2021). Yapılan çalışmalar, nanoakışkanların homojen bir dağılım sergilemesi ve uzun süre kararlılığını koruması için bir takım önlemlerin alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu önlemler şu şekilde sıralanabilir:

- Karışımın uygun pH değerinde hazırlanması,
- Yüzey aktif madde (surfactant) eklenmesi,
- Ultrasonik karıştırıcı (homojenizatör) ve ultrasonik banyo kullanılması.

Bu doğrultuda, ferroakışkanın hazırlanması için aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

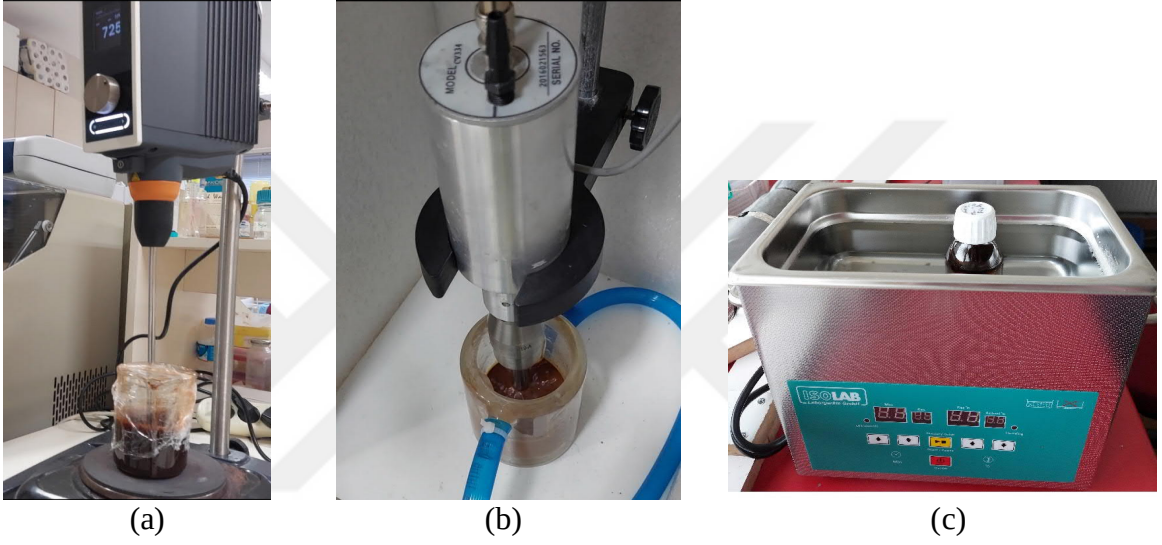
1. Malzeme Miktarı Ölçümü: Kullanılan Fe_3O_4 nanoparçacıkları ve saf su, hedeflenen nanoparçacık hacim oranını sağlamak amacıyla hassas teraziyle dikkatlice tartılmıştır. Ferroakışkanın belirli bir nanoparçacık hacim oranında hazırlanabilmesi için, nanoparçacık ve taşıyıcı akışkanın gerekli miktarları aşağıdaki hacim oranı formülüyle hesaplanmıştır:

$$\phi_p = \frac{\left(\frac{m_p}{\rho_p}\right)}{\left(\frac{m_p}{\rho_p}\right) + \left(\frac{m_w}{\rho_w}\right)} \quad (1)$$

Burada yer alan m_p , m_w ve ρ_p , ρ_w sırasıyla Fe_3O_4 nanoparçacığının ve suyun (baz akışkan) kütleleri ve yoğunluklarıdır.

2. Ön Karıştırma: Tartılan saf su ve Fe_3O_4 nanoparçacıkları, homojen bir dağılım sağlamak amacıyla mekanik karıştırıcı kullanılarak belirli bir süre boyunca karıştırılmıştır. Mekanik karıştırıcıya ait fotoğraf Şekil 12a'da sunulmuştur.
3. Ultrasonik Homojenizasyon ve Ultrasonik Banyo: Elde edilen karışım, topaklanmış nanoparçacıkları ayrıştırmak ve yüksek homojenlik sağlamak amacıyla ultrasonik karıştırıcı (Sonics, VCX750) kullanılarak 500 Watt güç ve 40 kHz frekans değerlerinde 2 saat boyunca ultrasonik titreşime maruz bırakılmıştır. Ultrasonik homojenizatöre ait fotoğraf Şekil 12b'de verilmiştir. Deney sürecinde, ferroakışkanın her deney sonrası kararlı bir formda hazırlanması için ayrıca, Şekil 12c'de görülen 40 kHz frekansına ve 120W ultrasonik güce sahip ultrasonik banyo (ISOLAB 3lt) kullanılmıştır (Şekil 12c).
4. Yüzey Aktif Madde Eklenmesi ve Son Karıştırma: Ultrasonik işlemde geçirilen karışıma, stabilitenin artırılması amacıyla karışımın yaklaşık %10'u kadar yüzey aktif madde karışıma ilave edilmiştir. Ferroakışkan hazırlamada ilk etapta kararlılık kriteri açısından 4 farklı farklı yüzey aktif madde ile %1 nanoparçacık hacim oranında ayrı ayrı ferroakışkan üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu yüzey aktif maddeler aşağıda listelenmiştir.

- Sitrik asit ($C_6H_8O_7$, TEKKİM),
 - Tween 20 ($C_{58}H_{114}O_{26}$, APPLICHEM),
 - Triton X 100 (SIGMA ALDRICH)
 - Tetrametilamonyumhidroksit (TMAOH, SIGMA ALDRICH)
5. Son aşamada, nihai karışım mekanik karıştırıcıda 70°C sıcaklıkta ve 725 rpm karıştırma hızında 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Böylece ferroakışkan hazırlama işlemi tamamlanmıştır.

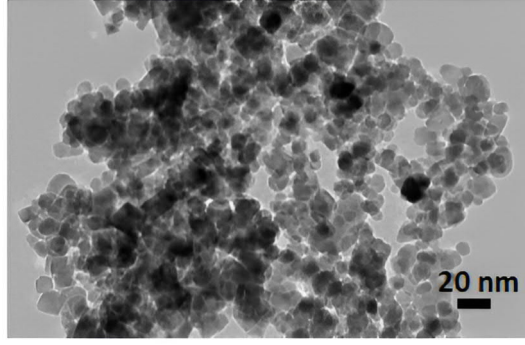


Şekil 12. Ferroakışkan üretiminde kullanılan (a) Mekanik karıştırıcı, (b) Ultrasonik titreşim (homojenizatör, karıştırıcı), (c) Ultrasonik banyo

2.1.1. Ferroakışkanın Karakterizasyonu

a) TEM Analizi

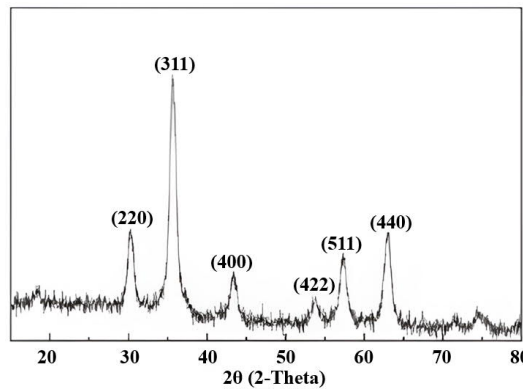
TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu) görüntüsü, nanoparçacıkların yüzey morfolojisi, geometrisi, boyutu ve dağılımlarını incelemek için kullanılmaktadır. Bu teknik, yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlayarak nanomalzemelerin fiziksel ve yapısal özellikleri hakkında önemli bilgileri sunması sebebiyle literatürde dikkate alınan bir analizdir. Bu bağlamda, temin edilen nanoparçacık üzerinden yapılan analiz ile TEM görüntüsü elde edilmiş ve Şekil 13'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere nanoparçacıkların ortalama boyutları 20 nm'nin altında olup bu değer kararlı bir nanoakışkan üretimi için literatürde uygun olarak ifade edilen bir değerdir (Dey vd. 2016). Ayrıca görüntüden, nanoparçacıklar için baskın geometrinin küresel olduğu görülmektedir.



Şekil 13. Fe_3O_4 nanoparçacık tozuna ait TEM görüntüsü

b) XRD Analizi

XRD (X-ray Diffraction, X-ışını Kırınımı) analizi, nanoparçacıkların kristal yapısını, faz bileşimini ve kristal boyutlarını belirlemek amacıyla sıklıkla kullanılan bir karakterizasyon yöntemidir. Nanoparçacıkların kristal yapısı, üretim yöntemine ve koşullarına bağlı olarak değişebileceğinden, XRD analizi ile Fe_3O_4 'ün istenen fazda olup olmadığı ve farklı kristal fazlar içerip içermediği değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Fe_3O_4 nanoparçacıkları XRD cihazı ile incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 14'te sunulmuştur. Analiz bulgularına göre, Fe_3O_4 kübik yapıya ait (220), (311), (400), (422), (511) ve (440) yansıma düzlemlerine ait pik değerleri verilmiş olup, (311) değeri diğer değerlere kıyasla daha baskındır. Bu sonuçlar, elde edilen Fe_3O_4 nanoparçacıklarının manyetit fazında olduğunu ve beklenen kristal yapıyı taşıdığını doğrulamaktadır (Dhumal vd. 2015).



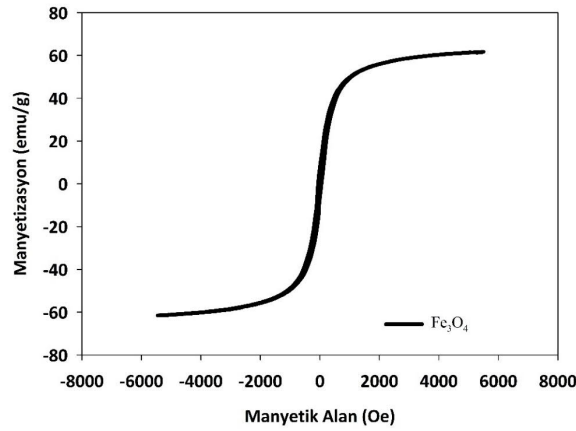
Şekil 14. Fe_3O_4 nanoparçacık tozuna ait XRD analiz sonucu

c) VSM Analizi

Ferroakışkanın manyetikleşme kabiliyetleri, titreşimli numune manyetometresi (VSM) analizi ile ortaya konmaktadır. Ferroakışkanının bünyesinde bulunan Fe_3O_4 nanoparçacık tozundan alınan numune ile Şekil 15'te Dokuz Eylül Üniversitesi Elektronik Malzemeler Üretim ve Uygulama Merkezinde yer alan “Dexing Magnet VSM 550” cihazı ile oda sıcaklığında (25°C) analiz edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucu elde edilen histerezis eğrisinden, nanoparçacıkların süperparamanyetik özelliği ve manyetik doyma noktası hakkında bilgi edinilmesi sağlanmıştır. Titreşimli numune manyetometresi ile elde edilen histerezis eğrisi, Şekil 16'da verilmiş olup şekilden numunenin süperparamanyetik özellik gösterdiği belirlenmiştir. Manyetik nanoparçacıkların bu özellikleri manyetizasyonda tersinirlik sağlamaktadır. Nanoparçacık manyetik alan altında mıknatıslanmakta ve manyetik alan kaldırıldığında tamamen demanyetize olmaktadır. Bu özelliğin ferroakışkanların en önemli özelliklerinden biri olduğu ifade edilmektedir.



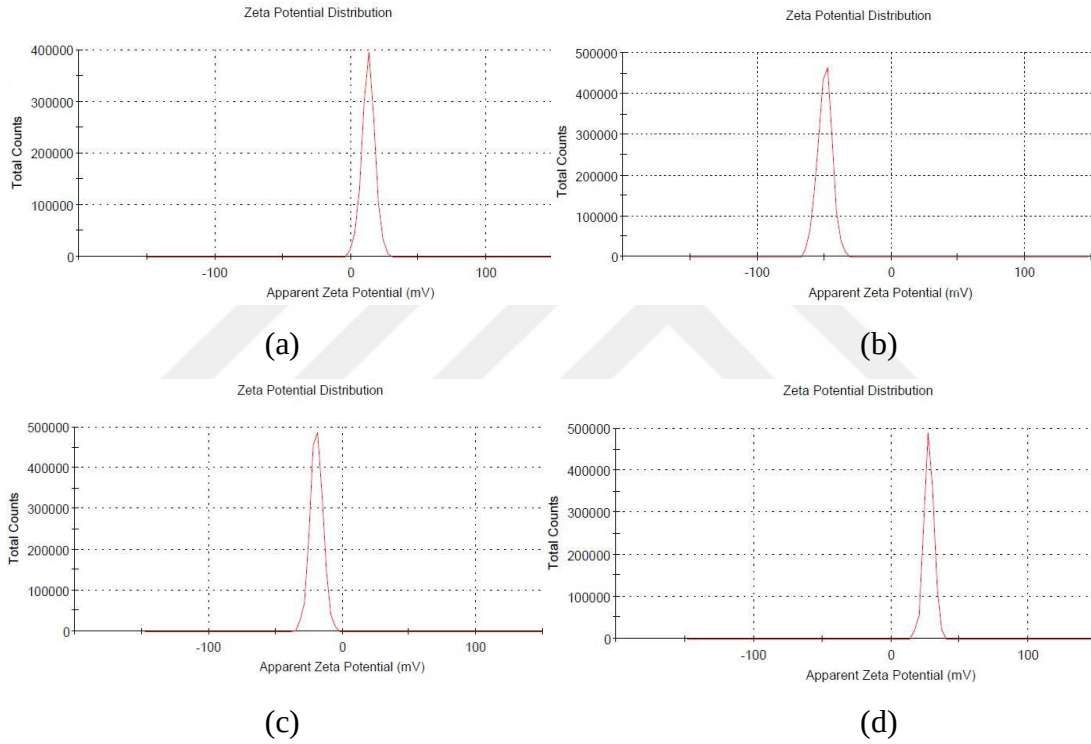
Şekil 15. VSM (titreşimli numune manyetometresi) analiz cihazı



Şekil 16. Fe_3O_4 nanoparçacık tozuna ait VSM ölçümü

d) Zeta Potansiyel Ölçümü

Uygun yüzey aktif maddenin belirlenmesi adına, yukarıda listelenen farklı yüzey aktif maddelerle ferroakışkanlar hazırlanmış ve bu akışkanların kararlılık seviyeleri zeta potansiyeli ölçümleri ile belirlenmiştir. Tez kapsamında hazırlanan nanoakışkanlar üzerinden zeta potansiyel ölçümü Karadeniz Teknik Üniversitesi İlaç ve Farmasötik Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezindeki Malvern/Zetasizer ZEN3600 model cihaz ile hizmet alımı aracılığıyla yapılmıştır. Hazırlanan ferroakışkanlar üzerinden yapılan zeta potansiyel analiz sonuçları Şekil 17’de ilgili değerler ise Tablo 8’de verilmiştir.



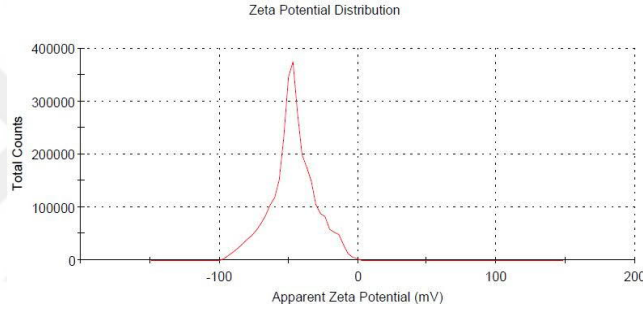
Şekil 17. Hazırlanan ferroakışkanların zeta potansiyel analiz sonuçları (a) ferroakışkan@Tween 20 (b) ferroakışkan@TMAOH (c) ferroakışkan@Sitrik Asit (d) ferroakışkan@Triton X 100

Tablo 8. Farklı yüzey aktif maddeler için zeta potansiyel analiz değerleri

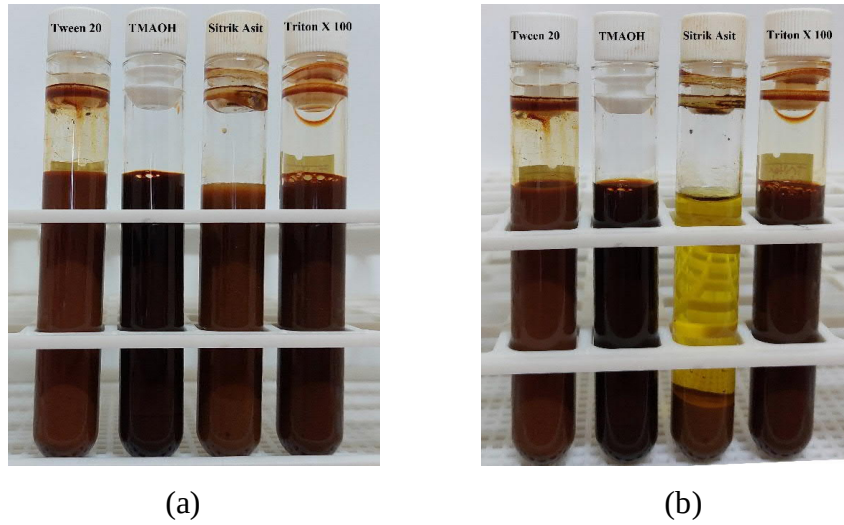
Yüzey aktif madde	Zeta potansiyel (mV)
Tween 20	12,9 mV
TMAOH	-49,3mV
Sitrik asit	-19,4mV
Triton X 100	27,4mV

Tablo 4’te de verildiği üzere literatürde 45 mV ve üzeri zeta potansiyel değerlerinin kararlılık düzeylerinin iyi olduğu görülmektedir (Şahin & Namlı, 2018). Tablo 8 ’de yer alan bu değerler dikkate alınarak değerlendirildiğinde, TMAOH ile hazırlanan ferroakışkanın -49,3mV zeta değeri ile yeterli düzeyde kararlılık sunduğu ifade edilmelidir.

Ayrıca hazırlanan ferroakışkanın kararlılığında zamanla meydana gelebilecek değişimler de dikkate alınmış olup ilk gün yapılan zeta potansiyel analiz sonucu yüksek çıkan TMAOH ile hazırlanan ferroakışkanın 30 gün sonra tekrar zeta potansiyel analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. İlgili ölçüm sonucu Şekil 18’de verilmekte olup zeta değeri -46,9 mV olarak belirlenmiştir. Ayrıca ilk gün ve 30 gün sonrası için akışkanlara ait fotoğraflar Şekil 19’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere TMAOH ile hazırlanan ferroakışkan 30 günün ardından kararlılığını korumuştur.

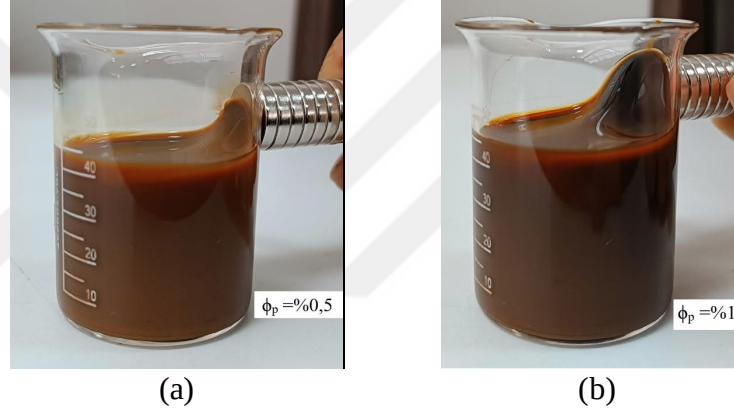


Şekil 18. TMAOH yüzey aktif madde ile hazırlanan ferroakışkanların 30 gün sonraki zeta potansiyel analizi

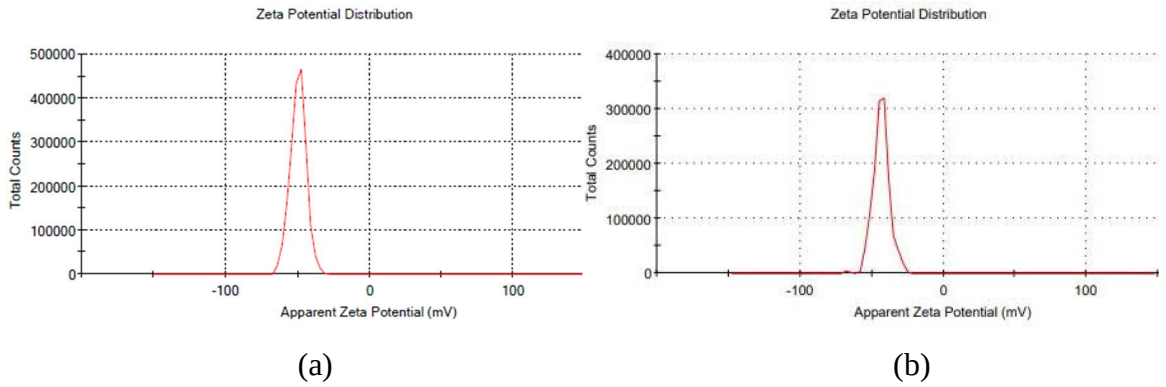


Şekil 19. Hazırlanan ferroakışkanların görüntüleri (a) ilk gün (b) 30 gün sonra

Uygun yüzey aktif maddenin (TMAOH) belirlenmesinin ardından %1 ve %0,5 hacim oranlarında ferroakışkanlar, deneyler için yeterli miktarda hazırlanmıştır. Ayrıca nihai durumda ferroakışkanın pH değeri 13 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan ferroakışkanların mıknatıslara verdiği tepkiler gözlemlenmiş ve elde edilen fotoğraflar Şekil 20’de sunulmuştur. Mıknatıslar tarafından uygulanan manyetik kuvvet etkisiyle nanoparçacıklar, taşıyıcı akışkan ile birlikte hareket ederek kuvvet yönünde toplanma eğilimindedir. Hazırlanan her iki ferroakışkanda da görülen bu davranış kararlı bir ferroakışkan yapısı elde edildiğine dair önemli bir göstergedir. Ayrıca %1 ve %0,5 hacim oranlarındaki ferroakışkanlara ait elde edilen zeta değerleri sırasıyla -49,3 mV ve -43,3 mV olarak belirlenmiş ve bu analiz sonuçları Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 20. Fe_3O_4 nanoparçacık tozu ile belli hacim oranlarında hazırlanan ferroakışkanlar (a) $\phi_p = 0.5\%$ ve (b) $\phi_p = 1\%$



Şekil 21. Ferroakışkanlara ait zeta potansiyel analiz sonuçları (a) $\phi_p = 1\%$ (b) $\phi_p = 0.5\%$

2.1.2. Ferroakışkanın Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Ferroakışkana ait termofiziksel özellikler, nanoakışkanlar için literatürde verilen modeller aracılığı ile belirlenmiştir.

a) Viskozite

Ferroakışkanların viskozite değerleri Brinkman modeline göre belirlenmiştir (Brinkman, 1952). Bu modele göre nanoakışkanın viskozitesi temel akışkanın viskozitesine ve nanoparçacık hacim oranına bağlı olmaktadır. Brinkman Modeli'ne göre nanoakışkanın viskozitesi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\mu_{ff} = \mu_w \frac{1}{(1 - \phi_p)^{2,5}} \quad (2)$$

b) Isı İletim Katsayısı

Ferroakışkanlara ait ısı iletim katsayı değerleri literatürde küresel nanoparçacıklı ve düşük hacim oranı için uygun olarak ifade edilen Maxwell modeli ile belirlenmiştir (Maxwell, 1881). Bu modelde nanoakışkanın termal iletkenliği küresel nanoparçacıkların termal iletkenliğine, temel akışkanın termal iletkenliğine ve nanoparçacık hacim oranına bağlı olmaktadır. Maxwell Modeli'ne göre nanoakışkanın ısı iletim katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$k_{ff} = \frac{(k_p + 2k_w - 2\phi_p(k_w - k_p))}{(k_p + 2k_w + \phi_p(k_w - k_p))} \quad (3)$$

c) Özgül Isı ve Yoğunluk

Ferroakışkanın yoğunluğu temel akışkanın ve nanoparçacığının yoğunluklarına ve nanoparçacık hacim oranına bağlı olmaktadır. Ferroakışkanın özgül ısı değeri ise temel akışkanın ve nanoparçacığın özgül ısı değerlerine, temel akışkanın ve nanoparçacığın yoğunluklarına ve nanoparçacık hacim oranına bağlı olmaktadır. Ferroakışkanlara ait özgül ısı ve yoğunluk değerleri aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır (Ghofrani vd. 2013).

$$\rho_{ff} = (1 - \phi_p)\rho_w + \phi_p\rho_p \quad (4)$$

$$c_{p,ff} = \frac{(\phi_p(\rho_p c_{p,p}) + (1 - \phi_p)(\rho_w c_{p,w}))}{(\phi_p \rho_p + (1 - \phi_p) \rho_w)} \quad (5)$$

25°C 'deki ϕ_p =%0,5 ve ϕ_p =%1 hacim oranlı ferroakışkanlara ait termofiziksel özellikler Tablo 9'da verilmektedir.

Tablo 9. Saf su ve ferroakışkanlara ait termofiziksel özellikler (25°C)

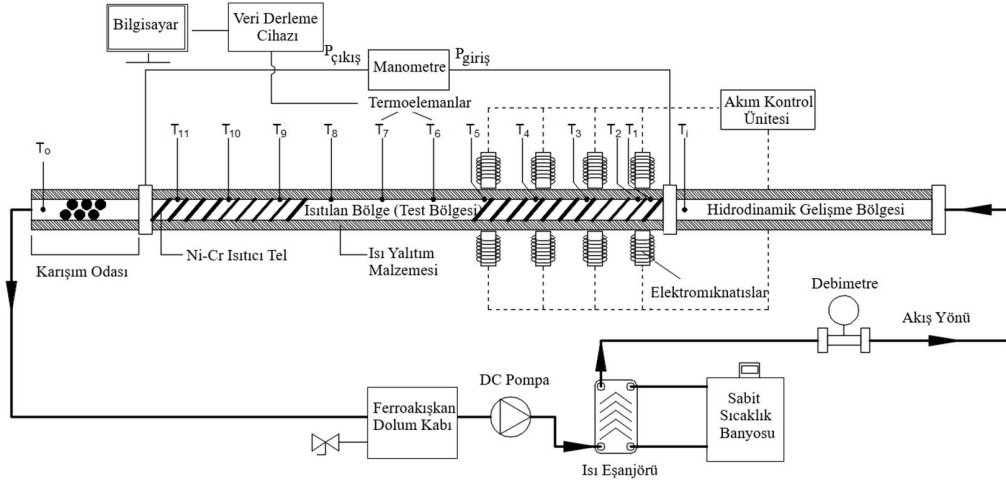
Akışkan	k, (W/mK)	ρ , (kg/m ³)	c_p , (J/kgK)	μ , (Ns/m ²)
Saf su	0,612269	996,58	4072,7	0,000868
Ferroakışkan (% 0,5)	0,619962	1017,49	4055,6	0,000879
Ferroakışkan (% 1)	0,627698	1038,4142	4038,6	0,000890

2.2. Faz Açılı Manyetik Alan Uygulaması

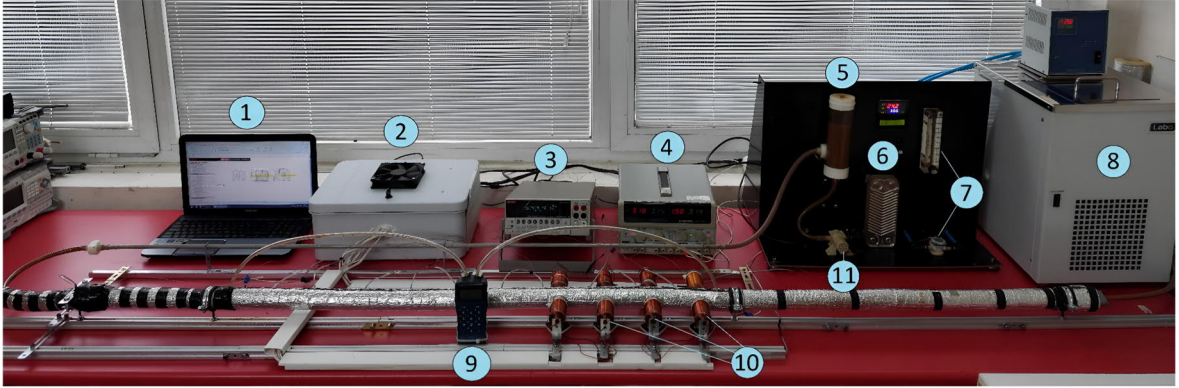
Bu bölümde, manyetik alan altında ferroakışkanın zorlanmış taşınımıyla ısı transferinin incelenebilmesi amacıyla faz açılı manyetik alan uygulamasının kurulum, yöntem ve yönetim aşamaları tanıtılmaktadır. Karşılıklı yerleştirilen elektromıknatıslar arasında faz açılı sinyal uygulamasıyla kesintili etkiyen manyetik alanlar oluşturulmuştur. Deneyler farklı Reynolds sayıları (400 -1000), manyetik alan frekansları (0 Hz, 1 Hz ve 5 Hz), faz açıları (0°, 90° ve 180°) ve nanoparçacık hacim oranları (%0,5 ve %1) için gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi

Faz açılı manyetik alan uygulaması için tasarlanan deney düzeneği Şekil 22'de gösterilmektedir. Deney düzeneği, ısı transfer bölgesi, akışkan şartlandırma hattı, elektromıknatıslar ve ölçüm cihazları olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. Akış hattı, Şekil 22'de görüldüğü gibi kapalı döngü şeklinde tasarlanmıştır.



(a)



- | | | |
|---|--------------------------------|---------------------------|
| 1: Bilgisayar | 4: DC güç kaynağı (pompa için) | 8: Sabit sıcaklık banyosu |
| 2: Elektromıknatıslar için DC Güç kaynağı | 5: Ferroakışkan dolum kabı | 9: Manometre |
| 3: Veri Derleme Cihazı | 6: Isı eşanjörü | 10: Elektromıknatıslar |
| | 7: Debitmetre | 11: DC pompa |

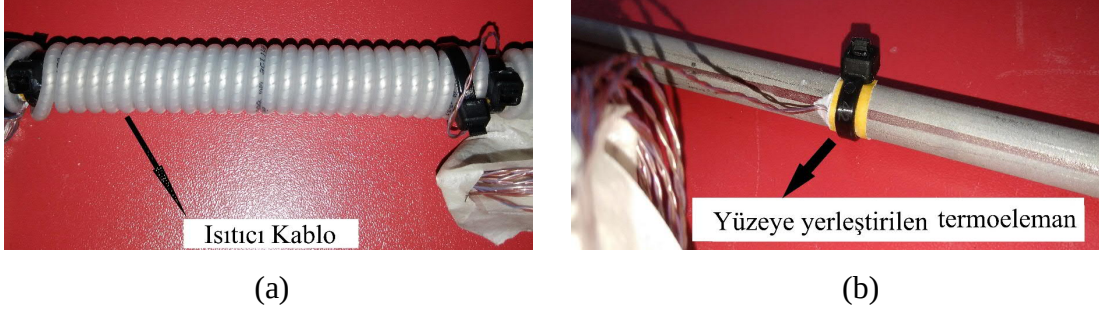
(b)

Şekil 22. Faz açılı manyetik alan uygulamasına ait (a) deney düzeneği ve (b) fotoğrafı

2.2.2. Isı Transfer Bölgesinin Tasarımı, Ferroakışkan Şartlandırılması ve Sirkülasyonu

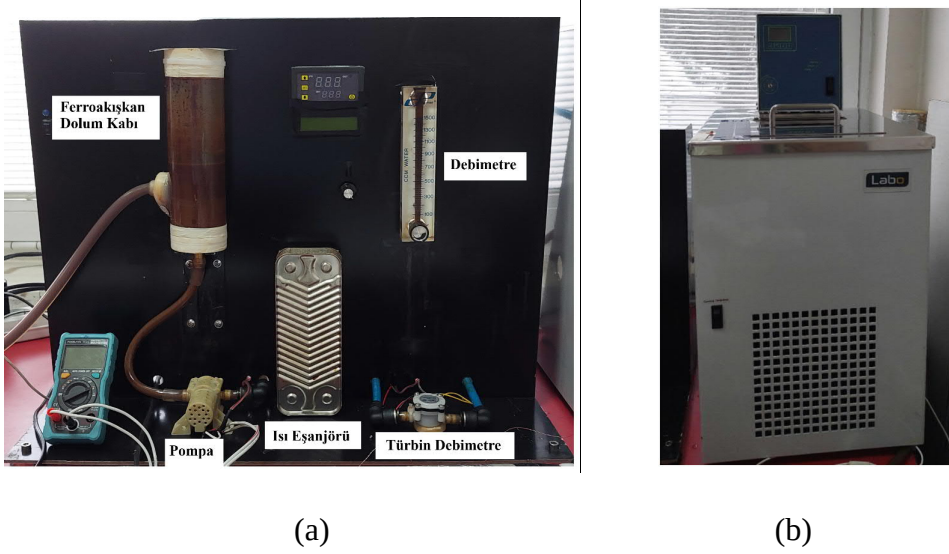
Çalışmada, ısı transfer bölgesi için iç çapı 8 mm, dış çapı 10 mm ve uzunluğu 1000 mm olan paslanmaz çelik bir boru kullanılmıştır. Paslanmaz çelik boru kullanılmasının nedeni eksenel ısı iletiminin azaltılması içindir. Boru dış yüzeyine sabit ısı akısı sağlamak amacıyla, elektriksel olarak izole edilmiş manyetik olmayan bir alaşımdan üretilmiş ısıtıcı kablo, Şekil 23'te gösterildiği gibi, üniform şekilde sarılmış ve ısı akısını kontrol etmek için ayrı bir değişken güç kaynağıyla beslenmiştir. Isıtıcı kabloya 150 W güç uygulanmış ve bu elektriksel güç, ayarlanabilir bir DC güç kaynağı aracılığıyla düzenlenmiştir. Uygulanan

güç, ısı transfer bölgesinden ayrılan ferroakışkanı soğutmakla görevli banyonun soğutma kapasitesini (350 W) aşmayacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 23. Boru yüzeyine (a) ısıtıcı kablonun sarılması ve (b) termoelemanın yerleşimi

Ferroakışkan, akış hattı boyunca test bölgesine ulaşmadan şartlandırılmış ve tüm deneyler, hidrodinamik olarak tam gelişmiş laminar akış ve akışkan giriş sıcaklığının $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Ferroakışkan hareketi, Şekil 24’de gösterilen mini bir DC pompa (12 VDC, 0-100 lt/h) ile sağlanmaktadır. Pompa, hassas ayarlı bir güç kaynağına bağlı olup, istenilen hacimsel debi değerleri ($Re = 400$ ’den 1000 ’e kadar, 100 adım ile) güç kaynağı üzerinden ayarlanmaktadır. Ferroakışkan pompadan çıktıktan sonra giriş sıcaklığının 25°C ’ye ayarlanması için bir plakalı ısı eşanjörünün birincil kısmından geçmektedir. Plakalı ısı eşanjörünün ikincil kısmı, ferroakışkandan ısıyı uzaklaştırmak ve deney süresince giriş sıcaklığını sabit tutmak amacıyla sabit sıcaklıklı bir banyoya (Labo-DX300) bağlanmaktadır. Bu sirkülatörlü kalibrasyon banyosu, 2000 W ısıtma, 350 W soğutma gücüne sahip olup, $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle çalışmaktadır (Şekil 24b). Akış debisi plakalı ısı eşanjörünün birincil kısmının çıkışına yerleştirilen kalibre edilmiş bir türbin debimetre (Sea YF-S401) ile ölçülmektedir. Akış hızı, bir türbin debimetre (Sea YF-S401) ile izlenmekte ve istenilen akış hızı, pompaya bağlı DC güç kaynağı aracılığıyla ayarlanmaktadır.



Şekil 24. Deney düzeneğine ait (a) pompa, plakalı ısı eşanjörü, türbin ve şamandıralı debimetreler, (b) sirkülatörlü kalibrasyon banyosu

Deneylerde, sabit ve faz açılı manyetik alanlar altında sıcaklık ve basınç olmak üzere iki farklı büyüklük ölçülmüştür. Test bölgesi boyunca sıcaklık ölçümleri için 0,2 mm çapında 11 adet T-tipi termoeleman çifti, boru yüzeyine yerleştirilmiş; akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarının ölçülmesi için ise 2 adet T-tipi termoeleman, boru giriş ve çıkışına yerleştirilmiştir. Çıkış sıcaklığını doğru bir şekilde ölçmek amacıyla, ısıtılan bölümün sonuna bir karışım odası eklenmiştir. Ferroakışkanın çıkış sıcaklığı, karışım odası çıkışında yer alan bir termoeleman ile ölçülmüştür. Termoeleman çiftlerinden gelen veriler, Şekil 25'te gösterilen yüksek hızlı bir veri toplama cihazı (Keithley 2701 DAQ) aracılığıyla bilgisayar ortamına anlık olarak kaydedilmiştir. Manyetik alanın sıcaklık ölçümleri üzerindeki etkisini en aza indirmek amacıyla manyetik korumalı bükülmüş termoeleman çiftleri kullanılmıştır. Saf su için manyetik alan uygulaması altında yapılan testler, manyetik alanın sıcaklık ölçümleri üzerinde bir etkisi olmadığını doğrulamıştır. Bu sonuç, manyetik alanın varlığı ve yokluğunda yapılan karşılaştırmalarla teyit edilmiştir. Laminer akışlar için hidrodinamik gelişme uzunluğu, $(x_{fd,h}/D)_{lam} \approx 0,05Re_D$ olarak literatürden bilinmektedir (Incropera, 1996). İncelenen maksimum Reynolds sayısı (1000) için akışın hidrodinamik gelişme uzunluğu 400 mm olmaktadır. Bu uzunluk göz önünde bulundurularak, Şekil 22'de gösterildiği gibi, ısı transfer bölgesinin ön kısmına 1000 mm uzunluğunda paslanmaz çelik bir boru yerleştirilmiştir. Isı transfer bölgesi için de aynı çap ve uzunluktaki paslanmaz çelik boru kullanılmış ve iki boru, aynı iç çapa sahip plastik bir flanş ile birleştirilmiştir. Isı transfer bölgesi boyunca oluşan basınç düşümü ise, boru giriş ve çıkışına yerleştirilen 0-25

mbar ölçüm aralığına sahip bir dijital diferansiyel basınç manometresi (Omega, HHP-2021) ile ölçülmüştür (Şekil 25b).



(a)



(b)

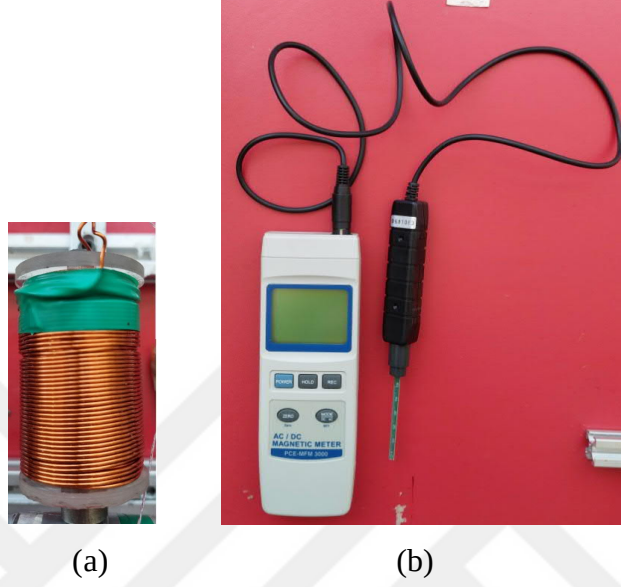
Şekil 25. (a) Veri kayıt cihazı, (b) basınç manometresi

2.2.3. Manyetik Alan Üreticinin Tasarım ve Akış Hattına Uygulanması

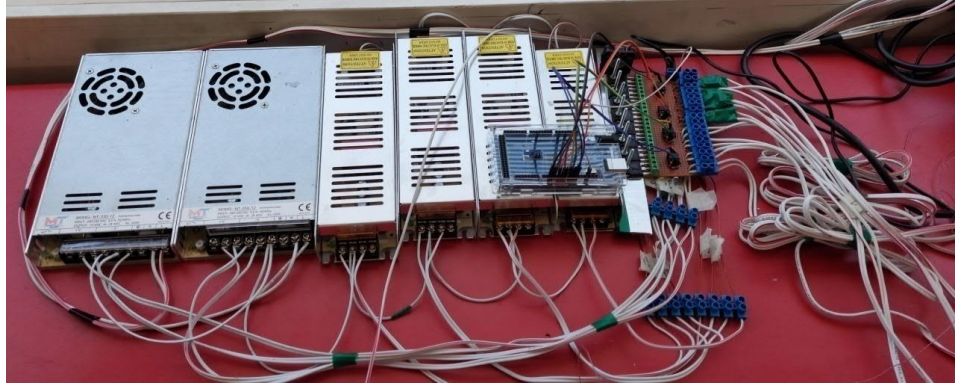
Ferroakışkan akışı ve ısı transferi üzerinde faz açısı ve frekans etkisinin incelenebilmesi için faz açılı manyetik alan oluşturulmasını sağlayan bir manyetik alan üretici tasarlanmış ve manyetik alan akış hattına yerleştirilmiştir. Bu sayede, ısı transfer bölgesinde zamanla kesintili olarak uygulanan manyetik alan bölgeleri oluşturulmuştur. Sabit manyetik alanlar doğal mıknatıslar kullanılarak elde edilebilirken, faz açılı (kesintili) manyetik alanların üretilmesi için elektromıknatıslar, kontrol sinyalleri, anahtarlama devreleri ve güç kaynaklarının birlikte kullanılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, öncelikle elektromıknatısların üretim süreci tamamlanmıştır. Yüksek manyetik alan şiddetinin oluşturulabilmesi için elektromıknatısların çekirdekleri, düşük karbon içeriğine sahip 20 mm çapında saf demir silindirik malzemeden üretilmiştir. 60 mm uzunluğundaki çekirdek etrafına, 1 mm çapında emaye kaplı bakır tel ile üniform şekilde 600 sarım yapılarak elektromıknatıslar tamamlanmıştır (Şekil 26).

Elektromıknatıslarla üretilen manyetik alanın şiddeti, frekansı ve faz açısının kontrolü amacıyla mikrokontrolcü ve MOSFET tabanlı bir kontrol devresi tasarlanmıştır. Bu devrede mikrokontrolcü olarak Arduino Mega, anahtarlama elemanı olarak ise N-kanal 8 adet MOSFET (IRFP064N) kullanılmıştır. Arduino'dan alınan lojik seviye (0-5V) dijital kontrol sinyalleri, önce bir yükseltici devresi (op-amp LM-358) aracılığıyla, MOSFET'lerin anahtarlama işlevini yerine getirebilmesi için gerekli olan 15V giriş sinyali seviyelerine yükseltilmiştir. Bu düzenek sayesinde, elektromıknatısların güç kaynağı ile bağlantısı ve

beslenen akımın şiddeti hassas bir şekilde kontrol edilerek, kesintili manyetik alanın frekansı, fonksiyonu ve faz açısı değerleri istenilen doğrulukla ayarlanabilmektedir. Üretilen devrenin fotoğrafı Şekil 27'de sunulmuştur.



Şekil 26. Üretimi yapılan (a) elektromıknatıs ve (b) Gaussmetre

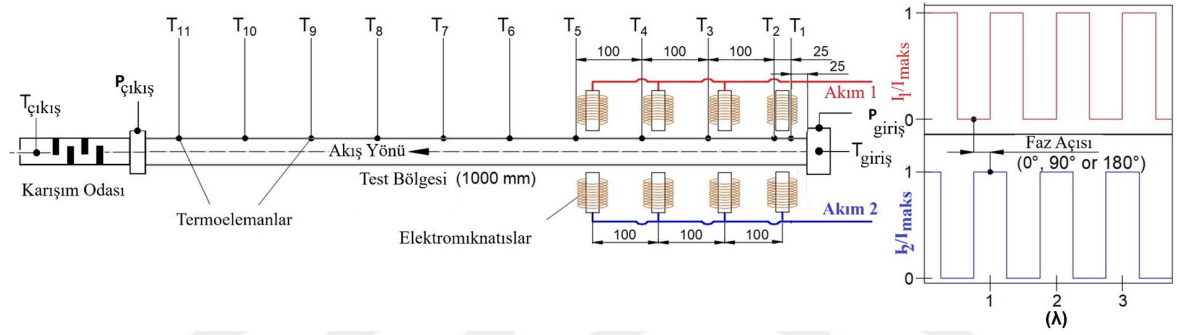


Şekil 27. Manyetik alan devresi

Elektromıknatısın, akış hattı merkez çizgisi üzerinde en fazla 700 Gauss büyüklüğünde bir manyetik alan ürettiği, Şekil 26b'de gösterilen Gaussmetre ile doğrulanmıştır. Elektromıknatıslar, akış hattına manyetik alan uygulamak üzere, Şekil 28'de gösterildiği gibi, karşılıklı olarak ve 100 mm aralıklarla ısı transfer bölgesi üzerinde konumlandırılmıştır. Akış hattına manyetik alanın farklı zaman dilimlerinde kesintili olarak uygulanabilmesi için; elektromıknatıslar, Şekil 28'de gösterildiği gibi N-kırmızı ve S-mavi olmak üzere, dörtlü iki gruba ayrılarak kontrol devresi ile bağlantıları yapılmış ve her grup aralarında faz açısı

bulunan iki farklı sinyalle beslenmiştir. Bu yöntemle, yüksek gradyanlı faz açılı manyetik alanlar, akış alanına karşılıklı yönlerden, farklı zaman adımlarında uygulanmıştır. Bu sayede, çalışmanın özgün araştırma parametrelerinden biri olan ve karşılıklı yerleştirilen iki grup elektromıknatıs arasında uygulanan faz açısı etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenebilmiştir.

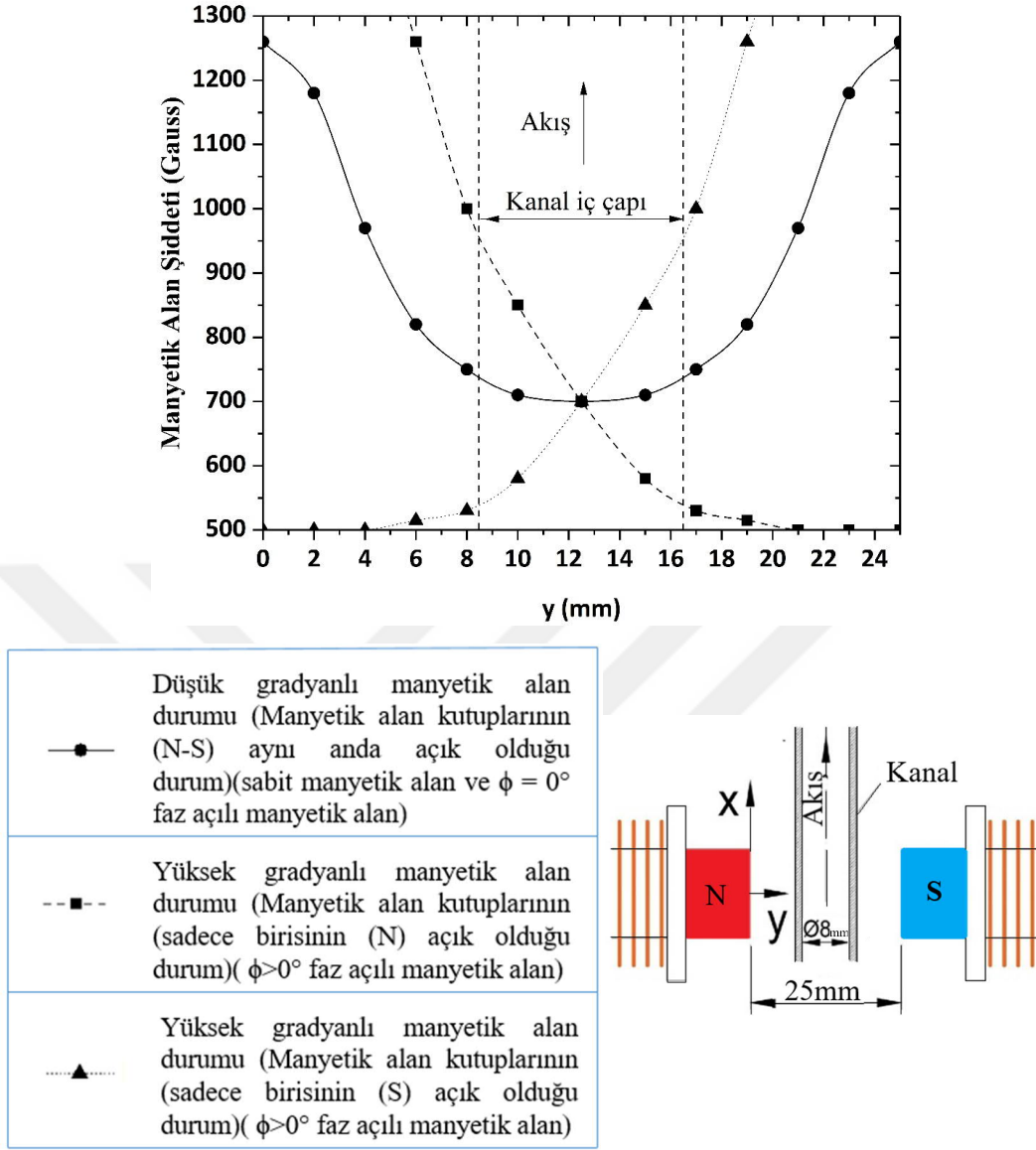
Isı transfer bölgesine uygulanan manyetik alanın şiddeti, akış hattının merkez çizgisi boyunca bir Gaussmetre ile ölçülerek belirlenmiş ve istenilen değer, güç kaynağı üzerinde yapılan ayarlamalarla elde edilmiştir. Çalışmada manyetik alan şiddeti olarak 700 Gauss değeri seçilmiştir.



Şekil 28. Elektromıknatıslara gönderilen sinyallere ait bağlantı şeması ve faz açılı sinyal örneğine ait şematik gösterimi

Çalışma kapsamında, taşınım ile ısı transferi deneyleri faz açılı-kesintili ($\phi = 0^\circ, 90^\circ$ ve 180°) ve sabit manyetik alan altında gerçekleştirilmiştir. Sabit manyetik alan, sürekli aktif, karşıt N-S kutupları tarafından üretilen kesintisiz bir manyetik alanı ifade etmektedir.

Şekil 28’de görülen faz açılı uygulamalar içindeki 0° faz açısı, literatürde sıklıkla uygulanan ve tüm elektromıknatısların aynı zamanda açılıp kapandığı referans sistemi temsil etmektedir. Referans sistemden farklı olarak, sinyaller arasında 90° veya 180° faz açısı uygulanması şeklinde yapılan özgün düzenlemeler ile karşılıklı pozisyonundaki elektromıknatısların farklı zaman adımlarında devreye girmeleri sağlanmıştır. Şekil 29 ise bahsedilen tüm faz açılı uygulamalar için manyetik alan şiddetinin akışa dik yöndeki değişimini göstermektedir.



Şekil 29. Farklı manyetik alan uygulamaları için manyetik alan şiddetinin akışa dik yöndeki değişimi

Manyetik cisim kuvveti (6) numaralı eşitlikle tanımlanmaktadır (Goharkhah vd. 2016).

$$\vec{F}_M = V_p \frac{\chi_i}{\mu_0} \vec{B} \nabla \vec{B} \quad (6)$$

Burada $\vec{F}_M$ manyetik kuvveti, V_p ve χ_i sırasıyla nanoparçacık hacmini ve manyetik duyarlılığını, μ_0 boş uzayın manyetik geçirgenliğini ve $\vec{B}$ manyetik akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu eşitlik, bir nanoparçacık üzerine etki eden manyetik kuvvetin manyetik alan gradyanı ile orantılı olduğunu göstermektedir.

2.2.4. Manyetik Alan Frekansı

Faz açılı manyetik alan etkisi altında yapılan çalışmalarda, akış ve ısı transferi üzerinde etkili olan bir diğer önemli parametre, elektromıknatısların açılıp kapanma sıklığını belirleyen manyetik alan frekansıdır. Elektromıknatıslar, frekans değerine bağlı olarak açılıp kapanmak suretiyle ferroakışkan içerisindeki nanoparçacıklara manyetik kuvvet uygular ve kuvveti ortadan kaldırır. Sinyaller kesintili-sabit aralıklı olarak test bölgesine uygulanır. Bu kapsamda, manyetik çalışma parametreleri olarak 0° , 90° ve 180° faz açıları ile 1 Hz ve 5 Hz frekans değerleri dikkate alınmış ve bu parametrelerin ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2.2.5. Manyetik Alan Şiddeti ve Reynolds Sayısı

Ferroakışkan akışı sırasında nanoparçacıklar üzerinde etkili olan hidrodinamik ve manyetik kuvvetlerin etkileşimi, ısı taşınım katsayılarındaki iyileşme oranlarını etkilemektedir (Li & Xuan 2009; Azizian vd. 2014; Asfer vd. 2016; Goharkhah vd. 2016; Hangi & Bahiraei 2019; Shyam vd. 2019). Hidrodinamik kuvvet nanoparçacıkları akış yönünde sürüklerken, manyetik kuvvet ise mıknatıslara doğru yönlendirmektedir. Bu sebeple, Reynolds sayısı ve uygulanan manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki, termal performans açısından önem taşımaktadır. Düşük Reynolds sayılarında, ısı taşınım katsayıları da genellikle düşük değerlere sahiptir. Çoğu ısı transferi prosesinde düşük Reynolds sayılarında ısı transferinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, sistemlerin ısı transferi performansının düşük Reynolds sayıları ve farklı manyetik alan şiddeti değerleri altında incelenmesi gerekmektedir. Faz açılı manyetik alan uygulamasında deneyler belirli bir manyetik alan şiddetinde (700 G) ve Reynolds sayısının 400 ile 1000 arasındaki (100'er adımla) değerleri aralığında yapılmıştır. Reynolds sayısı değerleri literatürdeki çalışmalarla uyumlu olacak şekilde seçilmiştir (Lajvardi vd. 2010; Ghofrani vd. 2013; Karimi vd. 2014; Goharkhah vd. 2015; Goharkhah vd. 2015; Goharkhah vd. 2016; Amani vd. 2018; Wang vd. 2019; Omiddezyani vd. 2021).

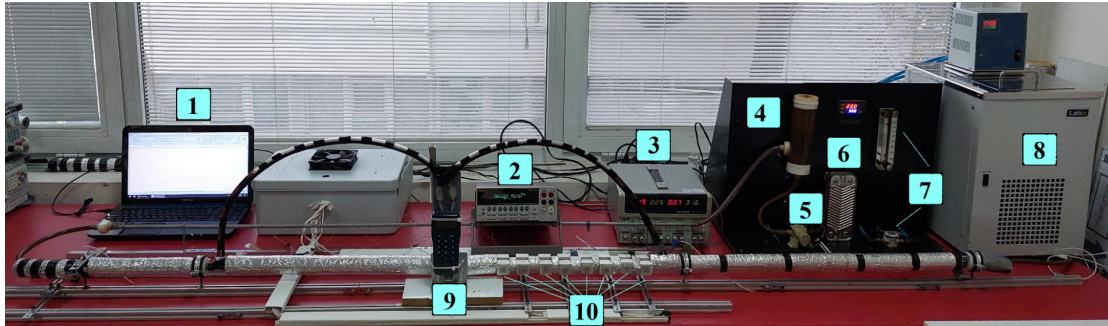
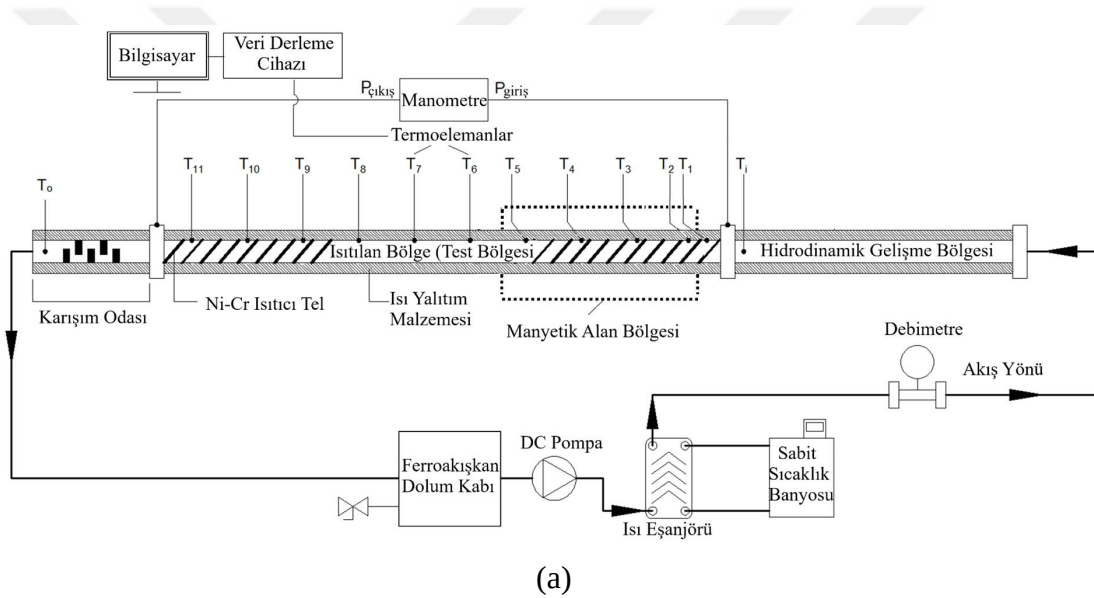
2.3. Değişken Yönlü Manyetik Alan Uygulaması

Bu bölümde, manyetik alan altında ferroakışkanın zorlanmış taşınımıyla ısı transferinin incelenebilmesi amacıyla değişken yönlü manyetik alan uygulamasının kurulum, yöntem ve

yönetim aşamaları tanıtılmaktadır. Isı transfer performansı üzerinde manyetik alan yöneliminin etkileri, literatürdeki manyetik alan uygulamaları dikkate alınarak ve manyetik alanın farklı yönlerde uygulanmasını içeren yeni düzenlemelerle deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler, Reynolds sayısının 400 ile 1000 arasında değişen değerlerinde ve nanoparçacık hacim oranının %0,5 ve %1 değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. Deney Düzeneği ve Çalışma Prensibi

Deney düzeneği üzerinde değişken yönlü manyetik alan uygulaması Şekil 30'da görülmektedir.



- | | | |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------|
| 1: Bilgisayar | 5: DC pompa | 8: Sabit sıcaklık banyosu |
| 2: Veri Derleme Cihazı | 6: Isı eşanjörü | 9: Manometre |
| 3: DC güç kaynağı (pompa için) | 7: Debimetre | 10: Miknatıslar |
| 4: Ferroakışkan dolum kabı | | |

(b)

Şekil 30. Değişken yönlü sabit manyetik alan uygulamasına ait deney düzeneğinin (a) şematik görüntüsü, (b) fotoğrafı

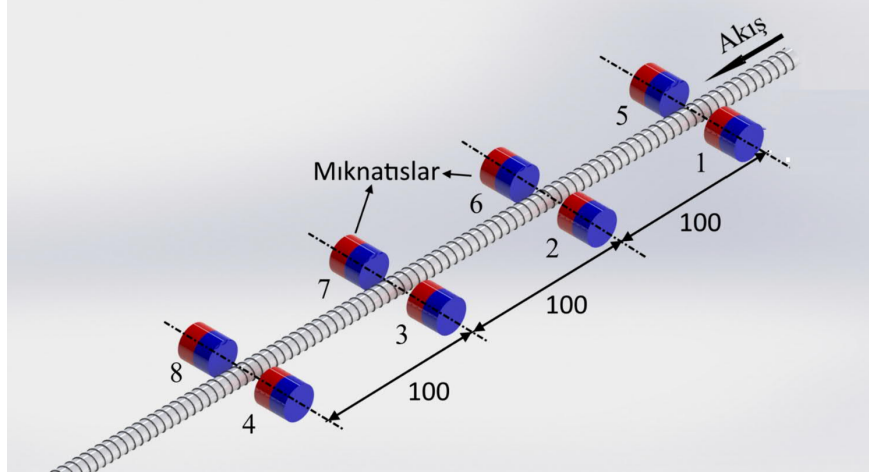
Değişken yönlü manyetik alan oluşturma süreci çalışmadaki bir diğer özgün uygulamadır. Bu uygulamada, faz açılı manyetik alan oluşturmak için kullanılan elektromıknatıslar yerine, kalıcı mıknatıslar kullanılmıştır. Ayrıca manyetik alanın farklı yönlerden uygulanmasını sağlamak için 3D yazıcı ile plastik aparatlar üretilmiştir. Deney düzeneği; ısı transfer bölgesi, akışkan şartlandırma hattı, kalıcı mıknatıslar ve ölçüm cihazları olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır.

2.3.2. Mıknatıs Konumları

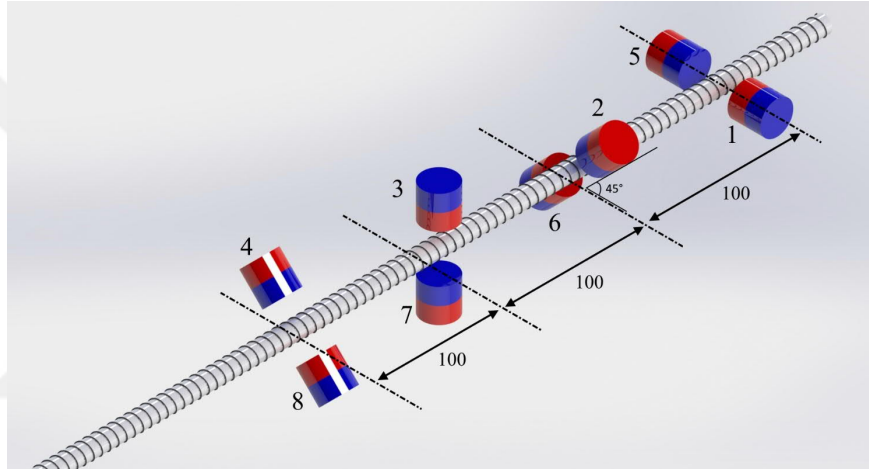
Isı transfer bölgesinde manyetik alanın kalıcı mıknatıslarla uygulanmasına ait düzenlemeler Şekil 31 ve Şekil 32'de gösterilmektedir. Literatürde yaygın olarak kullanılan referans mıknatıs düzenlemeleri, Şekil 31a'da görüldüğü üzere Mıknatıs 1a (M1a) ve Şekil 32a'da görüldüğü üzere Mıknatıs 2a (M2a) sistemleridir. M1a sisteminde mıknatıs kutupları karşılıklı ve aynı yönde hizalanmışken (N-S kutupları birbirine bakacak şekilde), M2a sisteminde ise kutuplar kaydırılmış ve aynı yönlü (N-S kutupları birbirine göre kaydırılmış) olarak düzenlenmiştir.

Bu iki düzenleme, sabit manyetik alan uygulayarak ısı transferini artırmaya yönelik çeşitli çalışmalarda yaygın olarak kullanıldığı için bu çalışmada referans sistemler olarak ele alınmıştır. Söz konusu iki düzenleme arasındaki temel fark, uygulanan manyetik alanın gradyanıdır. Manyetik alan gradyanındaki değişme ısı transferi üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır.

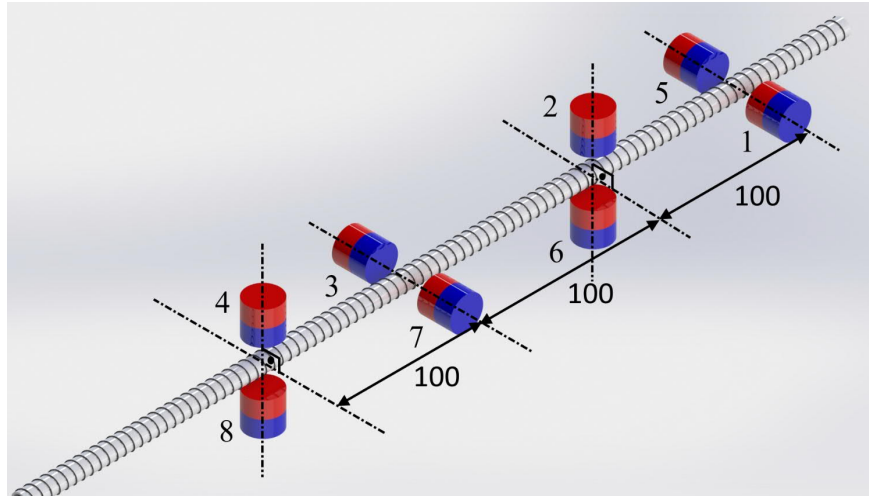
Bu çalışmada, M1a ve M2a referans sistemlerine ek olarak, değişken yönlü mıknatıs düzenlemelerini içeren özgün sistemler oluşturulmuştur. Bu sistemler Şekil 31b ve c'de görülen Mıknatıs 1b (M1b), ve Mıknatıs 1c (M1c) ve Şekil 32b ve c'de görülen Mıknatıs 2b (M2b) ve Mıknatıs 2c (M2c) düzenlemeleridir. M1b ve M1c sistemlerinde mıknatıslar karşılıklı konumlandırılmış ve karşılıklı mıknatıslar birlikte periyodik olarak, sırasıyla 45° ve 90° açı ile döndürülmüştür. M2b ve M2c sistemlerinde ise mıknatıslar kaydırılarak yerleştirilmiş ve her bir mıknatıs periyodik olarak, sırasıyla 45° ve 90° açı ile döndürülmüştür.



(a)

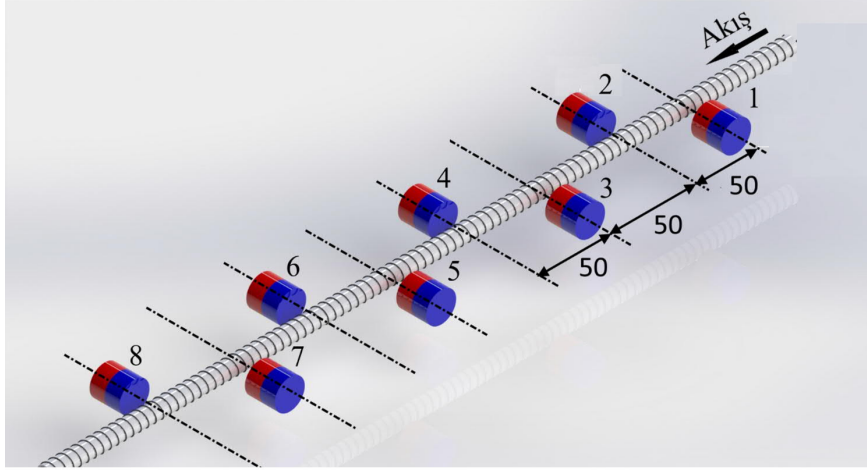


(b)

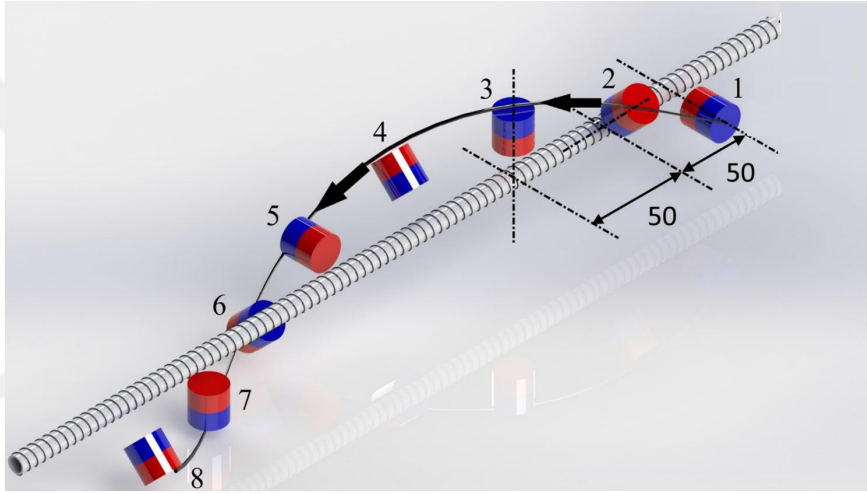


(c)

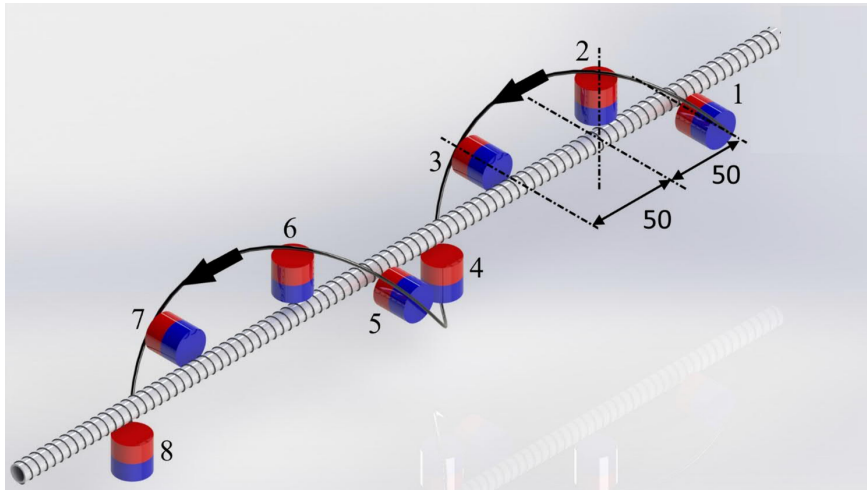
Şekil 31. Karşılıklı konumlandırılan mıknatıs sistemleri (a) M1a (0° -aynı yönlü-referans) (b) M1b (45° -değişken yönlü) (c) M1c (90° -değişken yönlü)



(a)



(b)

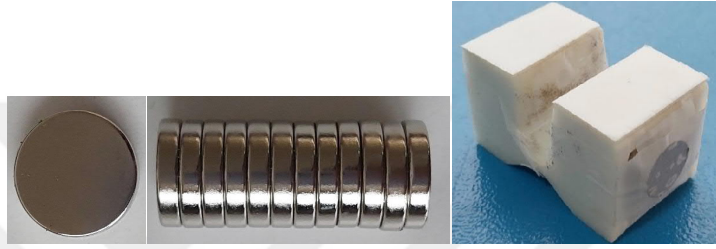


(c)

Şekil 32. Kaydırılmış şekilde konumlandırılan mıknatıs sistemleri (a) M2a (0° -aynı yönlü-referans) (b) M2b (45° -değişken yönlü) ve (c) M2c (90° -değişken yönlü)

2.3.3. Değişken Yönlü Manyetik Alanın Akış Hattına Uygulanması

Çalışmada mıknatıs konum etkisinin incelenebilmesi için farklı mıknatıs yerleşim düzenleri içeren sistemler oluşturulmuştur. Bu sistemlerde ticari olarak temin edilen neodmiyum esaslı kalıcı mıknatıslar kullanılmış ve deneyler sabit ve sürekli manyetik alan etkisi altında yapılmıştır. Şekil 33'te gösterilen bu aparatlar, mıknatısların istenilen konumlara hassas bir şekilde yerleştirilmesine ve değişken yönlü manyetik alan uygulanmasına olanak tanımaktadır.

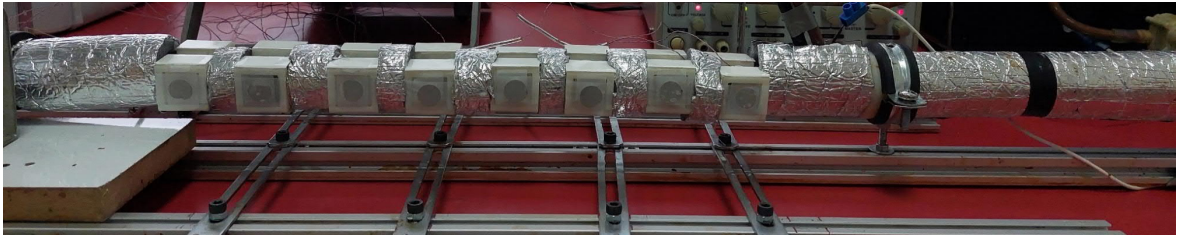


Şekil 33. Mıknatıslar ve mıknatısların yerleşimi için kullanılan aparat

Mıknatısların ısı transfer bölgesi üzerindeki konumları, incelenen sistemlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. M1a ve M2a referans sistemlerine ait yerleşim düzenleri Şekil 34'te sunulmuştur. Şekil 31 ve Şekil 32'de gösterildiği üzere, M1a sisteminde mıknatıslar karşılıklı ve aynı yönlü olarak, M2a sisteminde ise kaydırılmış ve aynı yönlü olarak boru çevresinde konumlandırılmıştır.



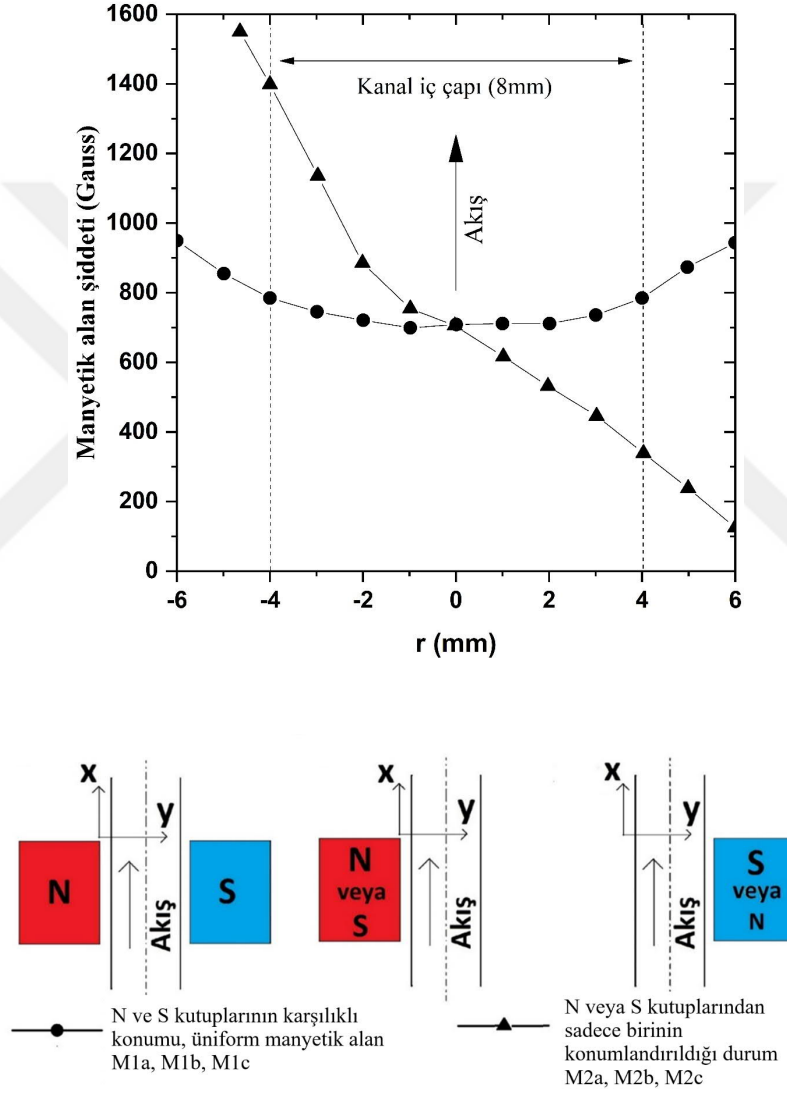
(a)



(b)

Şekil 34. Mıknatısların yerleşim düzeni (a) M1a-(Ref.1), (b) M2a-(Ref.-2)

Çalışmada, manyetik alan şiddeti, mıknatısların gücü ve ısı transfer borusuna olan mesafeleri ayarlanarak, akışa dik yönde ve boru eksenı doğrultusunda 700 Gauss değeriinde uygulanmıştır. Isı transfer bölgesinde akışa dik yönde uygulanan manyetik alan şiddeti boru merkez çizgisi üzerinde 700 Gauss değeriine ayarlanmış ve Gaussmetre (PCE-MFM 3500) ile boru çapı boyunca 1 mm aralıkla ölçölmüştür. Elde edilen manyetik alan dağılımı Şekil 35'te verilmiştir.



Şekil 35. Manyetik alan şiddetinin akışa dik yönde dağılımı

2.4. Deneysel Yöntem

Deney süreci sırasıyla aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- Deney öncesi hazırlık aşaması: Ferroakışkan, akış hattında sirküle edilmek üzere deney düzeneğinde yer alan tanka doldurulmuştur.
- Şartlandırma işlemi: Ferroakışkanın ısı transfer bölgesine giriş sıcaklığı olan 25 °C'ye ulaşması için pompa ve sabit sıcaklık banyosu devreye alınmıştır. Akış debisi, debimetre aracılığıyla takip edilmiş ve belirlenen Reynolds sayısına uygun olacak şekilde pompayı besleyen hassas ayarlı güç kaynağı üzerinden gerekli güç düzenlemeleri yapılmıştır.
- Manyetik alanın uygulanması: Manyetik alan türüne (faz açılı manyetik alan/değişken yönlü sabit manyetik alan) bağlı olarak (elektromıknatıs/mıknatıs) manyetik alan uygulanmıştır.
- Isıtma ve sıcaklık ölçümü: Ön hazırlıkların tamamlanmasının ardından, boru yüzeyine entegre edilen ısıtıcı düzenek çalıştırılmış ve sıcaklık ölçümleri başlatılmıştır.
- Veri toplama aşaması: Deney düzeneğinde bulunan tüm termoeleman çiftleri aracılığıyla sıcaklık değerleri anlık olarak ölçülmüş, tüm ölçüm noktalarından alınan veriler sistem daimi duruma ulaşınca kadar kaydedilmiştir.
- Basınç ölçümü: Isı transfer bölgesi boyunca oluşan basınç düşümü, boru giriş ve çıkışına yerleştirilen dijital diferansiyel basınç manometresi kullanılarak ölçülmüştür.
- Deney sonrası işlem: Deney tamamlandıktan sonra ferroakışkan, bir sonraki deney için yeniden hazırlanmak üzere ultrasonik banyoya aktarılmıştır.

Bu tez kapsamında incelenen tüm araştırma parametreleri için deneyler en az iki kez tekrarlanmıştır.

2.4.1. Veri Analizi ve Performans Çıktıları

Deneylerde akışkan debisi, ısı transfer bölgesindeki farklı noktalarda sıcaklık ve boru boyunca basınç düşümü değerleri ölçülmüştür. Akışkana geçen net ısı akısı Termodinamiğin 1. Kanunu, yerel ısı taşınım katsayısı ise Newton Soğuma Kanunu yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$h(x) = \frac{q''_{net}}{(T_s(x) - T_m(x))} \quad (7)$$

$$q''_{net} = \frac{(\dot{m}c_p(T_{mi} - T_{mo}))}{\pi DL} \quad (8)$$

Burada q''_{net} akışkana geçen net sabit ısı akısı olup borunun dış yüzey alanına bölünmesiyle elde edilmektedir. $\dot{m}$, akışkanın kütsel debisi, T_{mi} ve T_{mo} sırasıyla akışkan giriş ve çıkış sıcaklığıdır. $T_s(x)$ boru yüzeyindeki herhangi bir ölçüm noktasında termoeleman ile ölçülen sıcaklığı, $T_m(x)$ ise x konumundaki yığın ferroakışkan sıcaklığını ifade etmektedir. Yerel ısı taşınım katsayısı $h(x)$ tüm konumlar için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Enerji dengesi aracılığıyla $T_m(x)$ ise şu denklem ile hesaplanmaktadır.

$$T_m(x) = T_{mi} + \left(\frac{q''_{net} \pi D x}{\dot{m} c_p} \right) \quad (9)$$

Burada x , termoeleman konumunun borunun giriş noktasına olan uzaklığı göstermektedir.

$$q'' = \frac{VI}{\pi DL} \quad (10)$$

q'' ısı transfer borusuna uygulanan sabit ısı akısı olup ısıtıcı tellere uygulanan toplam elektrik gücünün borunun dış yüzey alanına bölünmesiyle elde edilmektedir. q'' ve q''_{net} arasındaki fark deney düzeneğinin iyi yalıtılmış olmasına bağlı olup değeri %5'i aşmamıştır. Yerel Nusselt sayısı ve ortalama Nusselt sayısı Nu_{ort} aşağıdaki şekilde elde edilmektedir:

$$Nu(x) = \frac{h(x)D}{k} \quad (11)$$

$$Nu_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^n Nu(x)_i}{n} \quad (12)$$

Çalışma akışkanı olarak ferroakışkan kullanımının ısı transferi üzerindeki etkisi, ortalama Nusselt sayılarındaki yüzde artış ve termal iyileşme oranları hesaplanarak

değerlendirilmiştir. Ortalama Nusselt sayısındaki artış yüzdesi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\eta_{Nu(x)} = \left(\frac{Nu_{(x),ff} - Nu_{(x),w}}{Nu_{(x),w}} \right) * 100 \quad (13)$$

$$\eta_{Nu_{ort}} = \left(\frac{Nu_{ort,ff} - Nu_{ort,w}}{Nu_{ort,w}} \right) * 100 \quad (14)$$

Darcy sürtünme faktörü ise (15) numaralı denklem ile belirlenmiştir.

$$f_d = (\Delta P) \frac{\pi^2 D^5 \rho_{ff}}{8 L \dot{m}^2} \quad (15)$$

Termal iyileşme oranı PEC ise literatürde kullanılan (16) numaralı denklem yardımıyla hesaplanmıştır. (Shahsavar vd. 2023; Sun vd. 2023; Rasaee vd. 2021; Soltanipour 2021; Gürdal vd. 2022; Gürsoy vd. 2023; Dinarvand vd. 2023)

$$PEC = \frac{Nu_{ort,ff} / Nu_{ort,w}}{(f_{d,ff} / f_{d,w})^{1/3}} \quad (1)$$

Deney düzeneğinin doğruluğunu ve güvenilirliğini kanıtlamak için, önce çalışma akışkanı olarak saf su kullanılarak deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlar, sabit ısı akısı sınır koşulu altında dairesel kesitli borudaki laminar akış için Shah bağıntısından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Shahsavar vd. 2016; Sun vd. 2020).

$$Nu(x) = \begin{cases} 1,302x_*^{-\frac{1}{3}} - 1, & x_* \leq 0,00005 \\ 1,302x_*^{-\frac{1}{3}} - 0,5, & 0,00005 \leq x_* \leq 0,0015 \\ 4,364 + 8,68(10^3 x_*)^{-0,506} e^{-41x_*}, & x_* \geq 0,0015 \end{cases} \quad (17)$$

$$x_* = \left(\frac{x}{D Re Pr} \right) \quad (18)$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (19)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (20)$$

2.4.2. Belirsizlik Analizi

Tez kapsamında Kline & McKlincstock, (1953) tarafından önerilen yöntem ile bir belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemde etkisi olan ve ölçülen parametre R nin n adet bağımsız değişkeni olmaktadır ((21) numaralı denklem). R parametresinin bağımsız değişkenlerin hata oranları $W_1, W_2, W_3...W_n$ şeklinde temsil edilerek, R parametresinin belirsizlik analizi (22) numaralı denklem ile hesaplanmaktadır (Dağdevir, 2020). Deneylerin sonuçları hesaplanırken kullanılan parametreler için hata oranları Tablo 10'da verilmiştir. Belirsizlik analizi sonuçları ise Tablo 11'de verilmiş olup, hata değerlerinin %4 ve altında olduğu belirlenmiştir.

$$R = R(x_1, x_2, \dots x_n) \quad (21)$$

$$W_R = R \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Tablo 10. Kullanılan parametrelerin ölçüm cihazları ve hata oranları

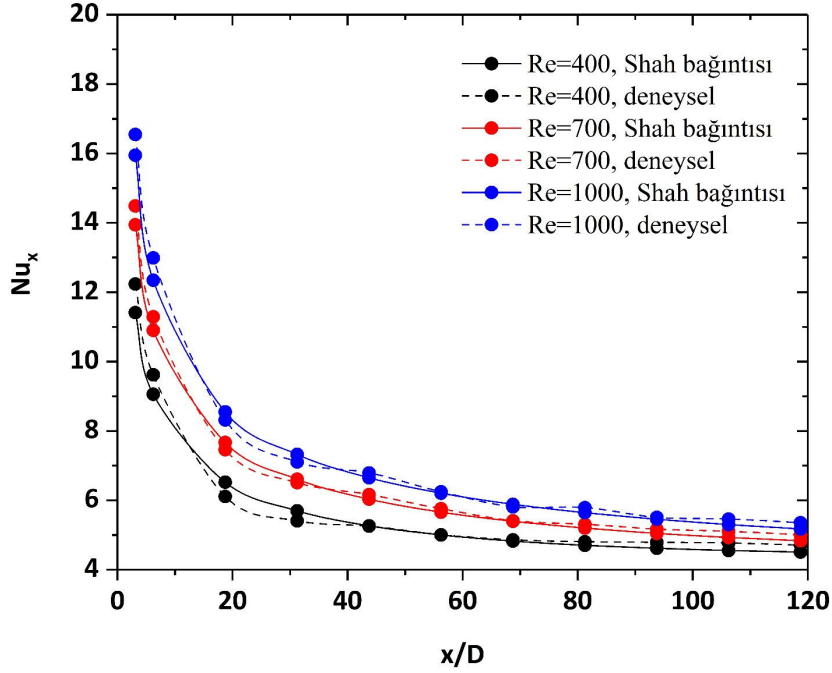
Parametre	Ölçüm Cihazı	Birim	Hata Oranı
Sıcaklık	Keithley 2701 DAQ	°C	±%0,1
Hacimsel Debi	Sea YF-S401	m ³ /h	±%2
Basınç Farkı	Omega HHP-2081	Pa	±%0,1
DC Voltaj	Fluke 87 V	Volts	±%0,05
DC Akım	Fluke 87 V	Amps	±%2
Manyetik Alan Şiddeti	PCE-MFM 3000	Gauss	±%5

Tablo 11. Belirsizlik analiz sonuçları

Hesaplanan Parametre	Belirsizlik Oranı [%]
Reynolds Sayısı (Re)	± 2
Nusselt Sayısı (Nu)	± 2,005
Sürtünme Faktörü (f_d)	± 4,001
PEC	± 2,408

2.5. Deney Düzenekinin Doğrulanması

Deney düzeneğinin doğrulanması için ilk aşamada manyetik alan uygulanmaksızın saf su ile farklı Reynolds sayılarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler yardımıyla yerel Nusselt sayıları hesaplanmış ve sonuçlar literatürde verilen Shah bağıntısı (17 numaralı denklem) ile karşılaştırmalı olarak Şekil 36’da sunulmuştur.



Şekil 36. Boru boyunca yerel Nusselt sayıları

Deneysel ve teorik veriler analiz edilerek, olası uyumsuzluklara neden olabilecek fazla ısı kaybı, bağlantı noktalarındaki akış düzensizlikleri ve ölçüm hataları gibi faktörler değerlendirilmiş ve deney düzeneğinde gerekli iyileştirmeler yapılmıştır.

Şekilde 36’da sunulan eğriler incelendiğinde, deneysel olarak elde edilen yerel Nusselt sayılarının boru boyunca değişiminin teorik değerlerle uyum içinde olduğu görülmektedir.

2.6. Mıknatısların Yerleşim Bölgesinin Belirlenmesi

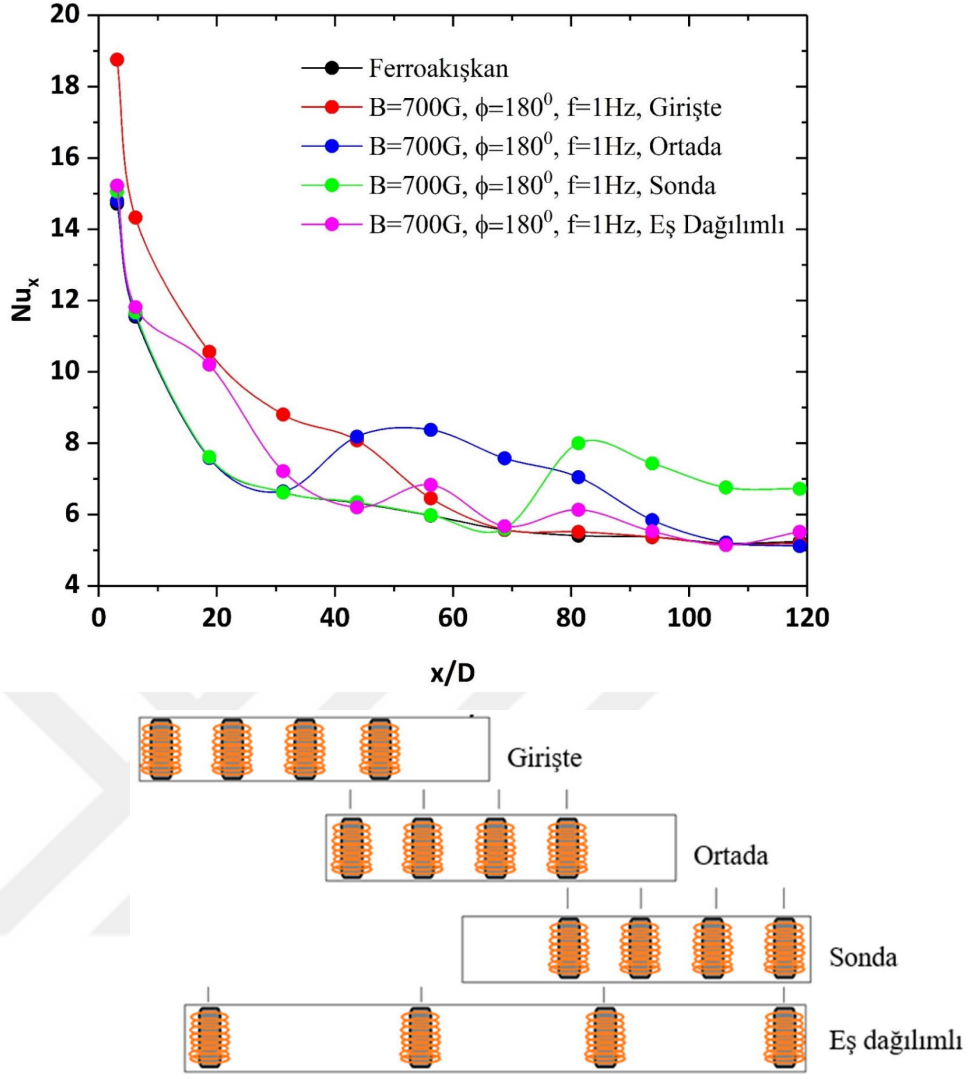
Bir önceki bölümde saf su için yapılan deneylerden yerel Nusselt sayılarının boru boyunca değişimi elde edilmişti. Yerel Nusselt sayıları en yüksek değerini boru girişinde almakta, termal gelişme bölgesinde azalmaya devam etmekte ve daha sonra 4,36 değerinde sabit kalmaktadır. Yine literatürden bilindiği üzere, çeşitli pasif yöntem teknikleriyle boru

içinde yerel Nusselt sayılarının artırıldığı çok sayıda çalışma mevcuttur (Bali & Saraç, 2014; Saraç & Bali, 2007). Bu durumda manyetik alanın etkisi altındaki bölgelerde ferroakışkan akışı ve ısı transferinde görülen değişimler mıknatısların yerleşim düzenine bağlı olacaktır. Çalışma kapsamında manyetik alan etkisinde ortaya çıkan bu yerel değişimlerin en fazla hangi mıknatıs konumlarında elde edilebileceği üzerine bir araştırılma yapılmıştır. Bu nedenle tezin asıl çalışma parametreleri üzerindeki kapsamlı deneylere geçmeden önce ısı transfer borusu üzerinde mıknatıs konumlarını belirleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde sekiz adet elektromıknatıs kullanılmış ve elektromıknatıs grupları sırasıyla girişte, ortada, sonda ve eş dağılımlı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Her elektromıknatıs grubu düzenlemesi için 700 Gauss manyetik alan şiddeti, 180° faz açısı ve 1 Hz frekans değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen yerel Nusselt sayısı dağılımları Şekil 37’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Şekil 37 incelendiğinde, manyetik alanın uygulandığı bölgelerde yerel Nusselt sayılarında meydana gelen değişimler açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Elektromıknatısların giriş bölgesine yerleştirilmesi ile yerel Nusselt sayılarındaki ani düşme eğilimi yavaşlamış ve bu durum termal gelişme bölgesinin uzamasına neden olmuştur. Bu bölgede yerel Nusselt sayılarında, manyetik alanın olmadığı $B=0$ durumuna göre yaklaşık %34-37 oranında bir artış gözlemlenmiş ancak bu artış, akıştaki manyetik alan etkisinin azalmasıyla birlikte giderek azalmıştır. Yerel Nusselt sayılarındaki bu artış, $x/D \approx 70$ değerine kadar sürmüştür.

Elektromıknatısların ortada olduğu durumda; manyetik alanın uygulandığı bölgede yerel Nusselt sayılarında ani bir yükselme, uygulanmadığı bölgede ise kısmi bir artma gözlenmiştir. Manyetik alanın etkisinin sona erdiği bölgelerde ise yerel Nusselt sayıları tekrar azalarak $B=0$ ’daki değerine yaklaşmıştır ($x/D \approx 110$). Bu durum, manyetik alanın konumunun ısı transferi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Elektromıknatısların sonda ve eşit dağılımlı olduğu durumlarda ise; manyetik alanın uygulandığı bölgelerde yerel Nusselt sayılarında belirgin artışlar görülmüştür. Elektromıknatısların test bölgesi üzerindeki en uygun konumunun belirlenmesinde, test bölgesi boyunca hesaplanan ortalama Nusselt sayıları dikkate alınmıştır.



Şekil 37. Farklı elektromıknatıs konumları için yerel Nusselt sayılarının boru boyunca değişimi

En yüksek ortalama Nusselt sayısı, elektromıknatısların giriş bölgesinde konumlandırılmasıyla elde edilmiştir. Bu nedenle tez kapsamındaki tüm parametrik çalışmalar bu düzenleme (giriş konumu) esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Elektromıknatıs konumlarına bağlı olarak elde edilen bu sonuç, aynı zamanda literatürde yer alan çalışmalarla da uyum içindedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tezde, su bazlı Fe_3O_4 nanoparçacık içeren ferroakışkan iki farklı nanoparçacık hacim oranında hazırlanmış ve ferroakışkanın manyetik alan etkisi altında laminar zorlanmış taşınım ile ısı transfer performansı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada ısı transferi performansını artırmaya yönelik iki özgün uygulama geliştirilmiştir. Bunlar “faz açılı manyetik alan uygulaması” ve “değişken yönlü manyetik alan uygulaması” olmak üzere iki ana başlık altında ele alınmış, ısı transfer performansı ve basınç düşümü bulguları ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştır. Ayrıca sunulan akış görselleri yardımıyla manyetik alanın akışa, akış ortamındaki nanoparçacık davranışlarına ve ısı transferine etkileri değerlendirilmiştir. Isı transferi artışı ve basınç düşüşü arasındaki ilişki, Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) kullanılarak analiz edilmiştir.

3.1. Faz açılı Manyetik Alan Uygulamasından Elde Edilen Bulgular

Faz açılı manyetik alan etkisi altında yapılan deneylerde ferroakışkanın laminar akış koşullarında zorlanmış taşınım ile ısı transferi aşağıda verilen parametrelerin kontrolünde incelenmiştir:

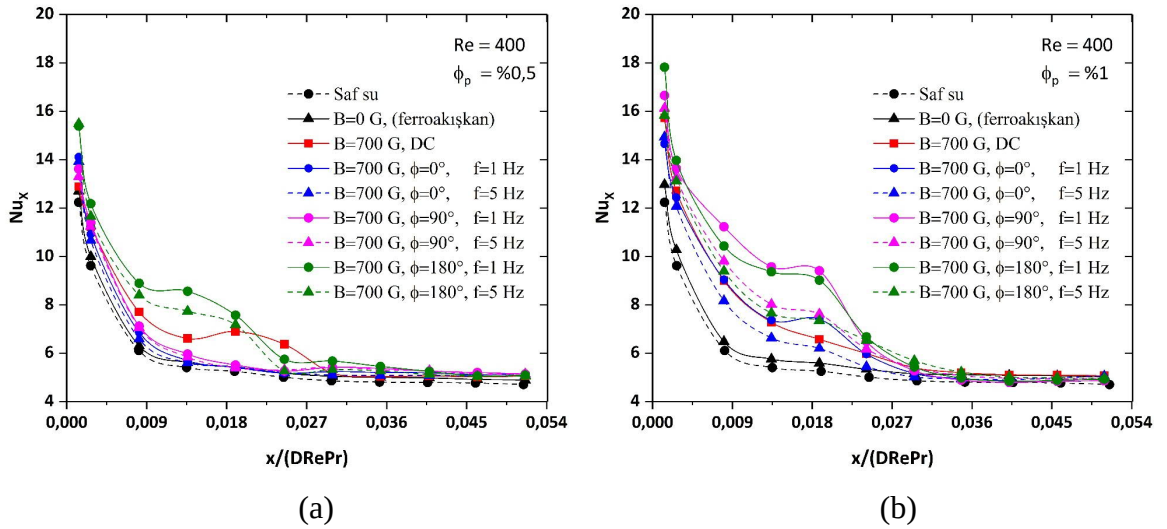
- Manyetik alan şiddeti: 700 G
- Faz açısı : $\phi = 0^\circ, 90^\circ$ ve 180°
- Frekans: $f = 1$ Hz ve 5 Hz
- Reynolds sayısı: 400-1000 ve
- Nanoparçacık hacim oranı: $\phi_p = \%0,5$ ve $\%1$

Deneylerden elde edilen veriler yardımıyla faz açılı manyetik alan uygulamasının yerel ve ortalama Nusselt sayıları, basınç düşüşü değerleri ve termal iyileştirme oranları (PEC) üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Bu bölüm faz açılı manyetik alanın ısı transferine etkisi, manyetik alan frekansının ısı transferine etkisi, Reynolds sayısının ısı transferine etkisi, nanoparçacık hacim oranının ısı transferine etkisi ve basınç düşümü ve termal etkinlik analizleri başlıkları altında detaylandırılmış ve elde edilen bulgular tartışılmıştır.

3.1.1. Faz Açılı Manyetik Alanın Isı Transferine Etkisi

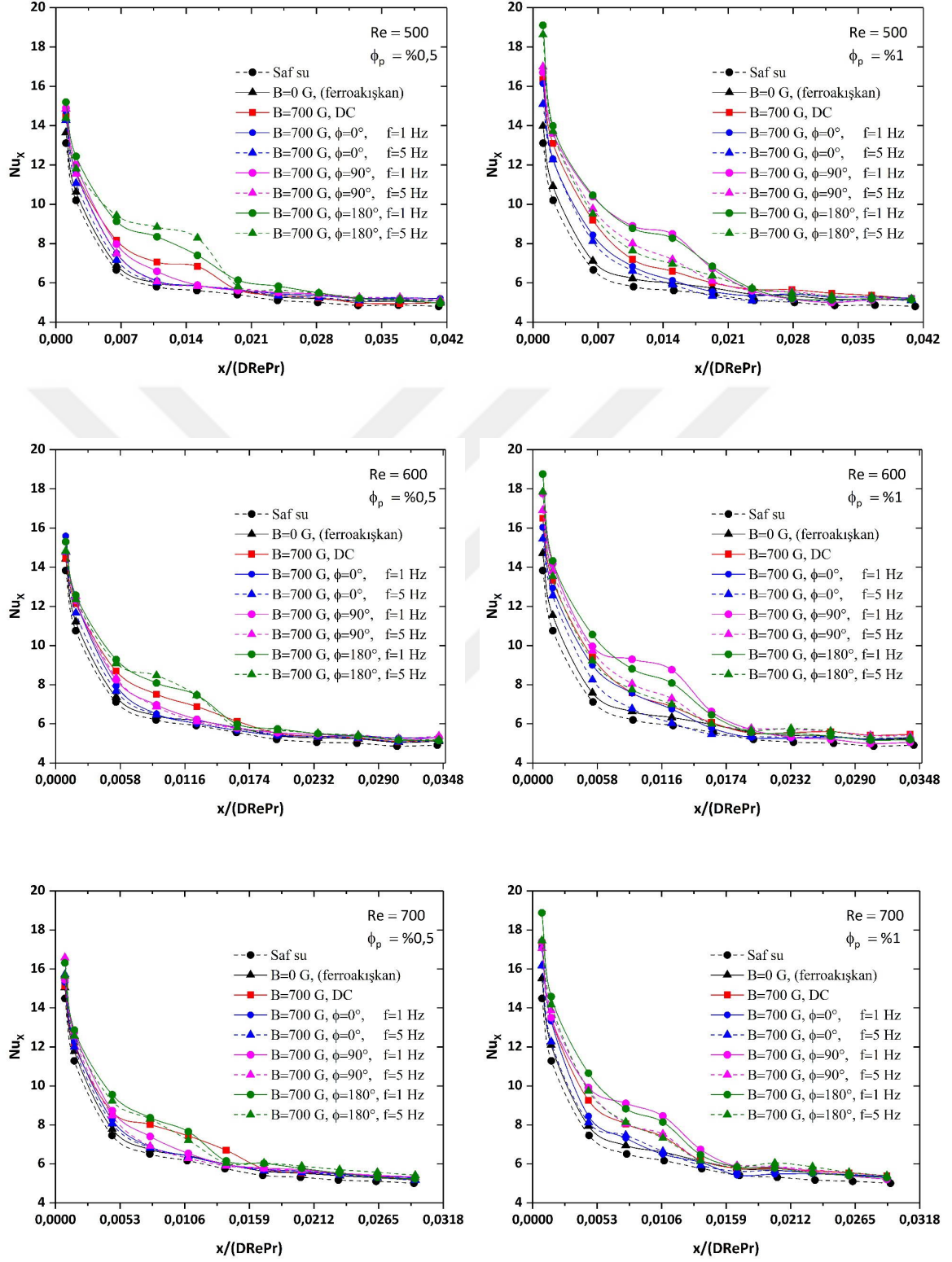
Yukarıda verilen tüm parametreler için yapılan deneyler sonucunda ısı transfer bölgesi boyunca yerel Nusselt sayıları elde edilmiştir. Şekil 38, farklı Reynolds sayılarında, boyutsuz eksenel mesafeye ($x/DRePr$) göre, $\phi_p = \%0,5$ ve $\phi_p = \%1$ nanoparçacık hacim oranlarındaki ferroakışkanın laminar zorlanmış taşınımında, farklı faz açısı ve frekans parametreleri için elde edilen yerel Nusselt sayılarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Ortalama Nusselt sayıları yine karşılaştırmalı olarak Şekil 39’da verilmiştir. Şekillerde karşılaştırma amacıyla saf su, ferroakışkan ($B = 0$) ve sabit manyetik alan (DC) uygulamaları gibi referans durumlara da yer verilmiştir. Ayrıca $\phi_p = \%0,5$ ve $\phi_p = \%1$ nanoparçacık hacim oranlarındaki ferroakışkanlar için farklı manyetik alanlar altında elde edilen ortalama Nusselt sayılarının saf suya göre yüzde artışları, incelenen tüm durumları içerecek şekilde Tablo 12 ve Tablo 13’te özetlenmektedir.

Şekil 38 incelendiğinde, $Re=400$ ve $\%1$ hacim oranlı ferroakışkan için manyetik alan etkisi yokken ($B = 0$), yerel Nusselt sayısının saf suya göre ortalama $\%6$ oranında arttığı, $\%0,5$ hacim oranlı ferroakışkan için ise bu artışın $\%3-4$ civarında olduğu görülmüştür. Bu iyileşme nanoparçacık hacim oranının artmasına bağlı olarak ferroakışkanın ısı iletkenliğinin artmasından kaynaklanmaktadır.

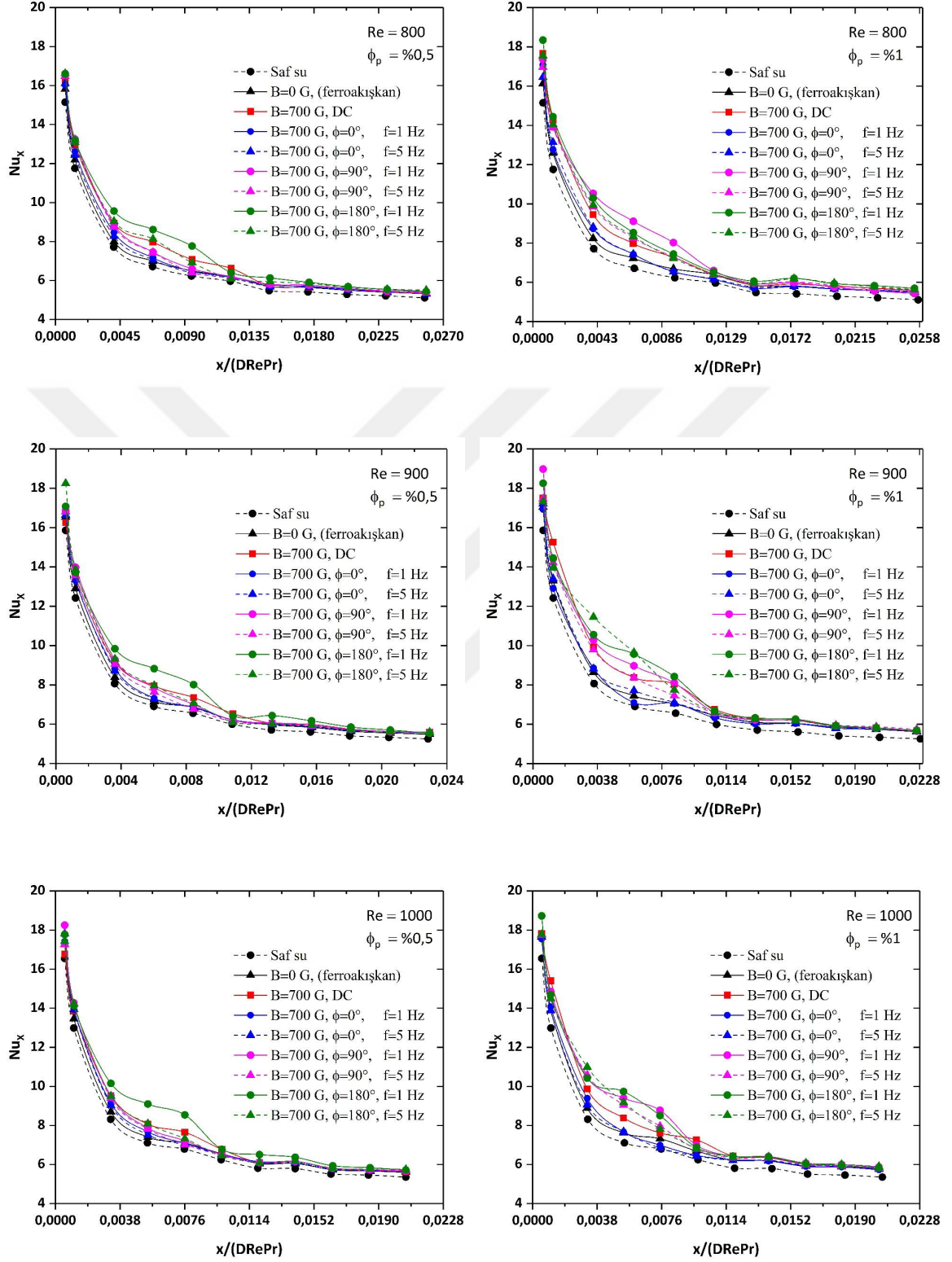


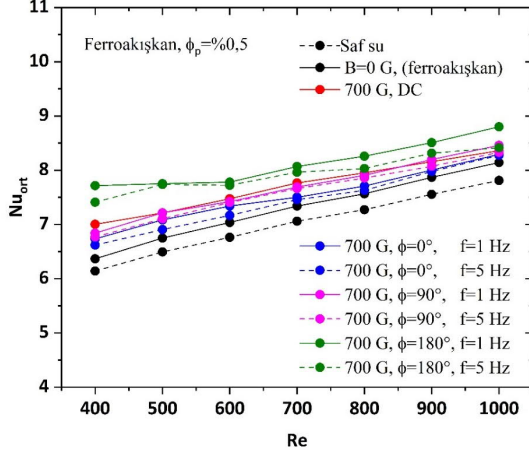
Şekil 38. Farklı faz açısı ve frekans değerleri için yerel Nusselt sayısının boru boyunca değişimi (tüm Reynolds sayıları) (a) $\phi_p = \%0,5$ (b) $\phi_p = \%1$

Şekil 38'in devamı

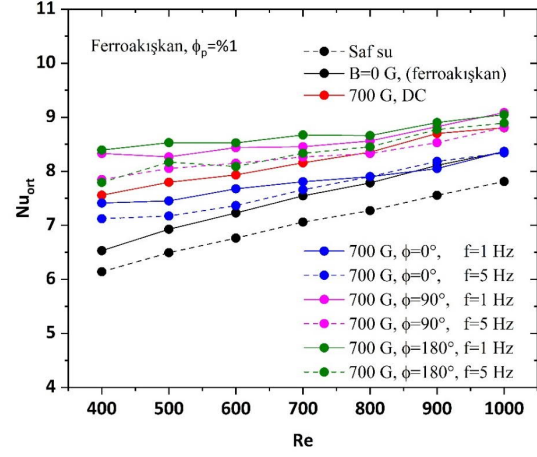


Şekil 38'in devamı





(a)



(b)

Şekil 39. Faz açılı manyetik alan uygulamaları için ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \%0,5$, (b) $\phi_p = \%1$ ($B = 700$ G)

Tablo 12. Faz açılı manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayısındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%0,5$)

Re	Ferroakışkan B=0	Sabit f=0 Hz	$\phi = 0^\circ$ f=1 Hz	$\phi = 0^\circ$ f=5 Hz	$\phi = 90^\circ$ f=1 Hz	$\phi = 90^\circ$ f=5 Hz	$\phi = 180^\circ$ f=1 Hz	$\phi = 180^\circ$ f=5 Hz
400	3,65	14,02	9,62	7,78	11,38	10,20	25,61	20,66
500	3,92	11,04	9,06	6,31	11,09	9,39	19,34	19,13
600	4,03	10,4	8,49	5,95	9,72	9,47	15,03	14,16
700	3,95	9,99	6,24	5,62	8,91	8,51	14,29	12,78
800	4,01	9,32	5,97	4,89	8,72	8,03	13,54	10,41
900	4,14	7,97	5,91	5,59	8,47	6,84	12,60	10,03
1000	4,23	7,06	6,17	5,95	8,30	6,66	12,68	7,74

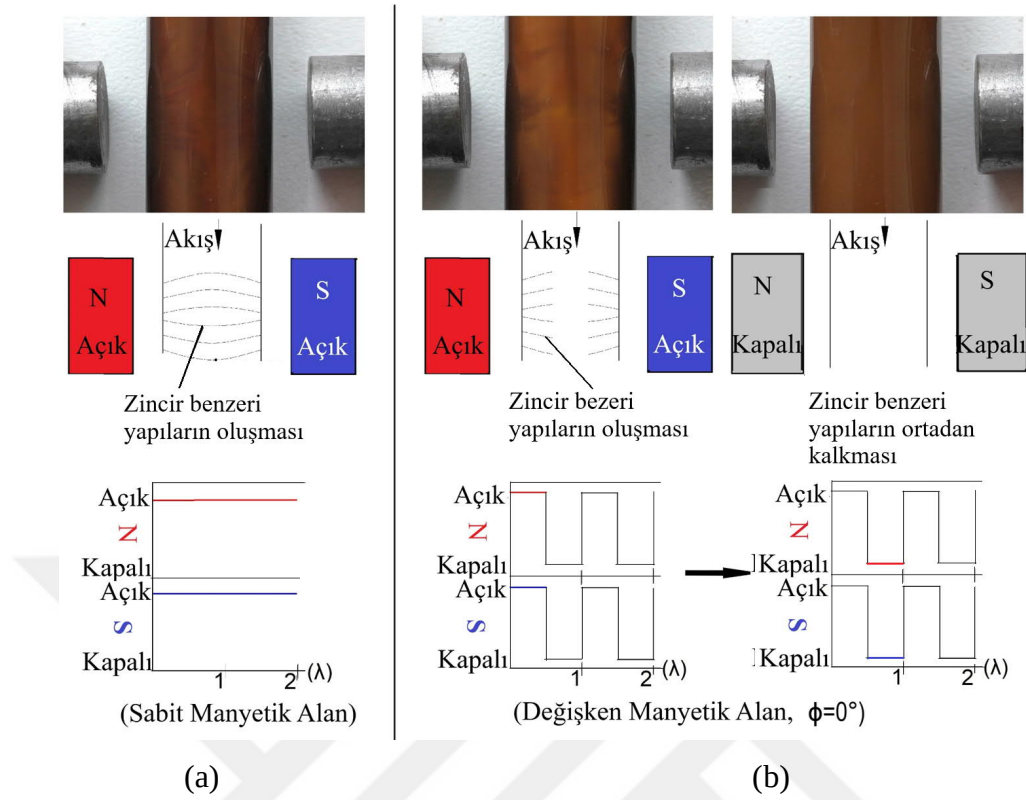
Tablo 13. Faz açılı manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayısındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%1$)

Re	Ferroakışkan B=0	Sabit f=0 Hz	$\phi = 0^\circ$ f=1 Hz	$\phi = 0^\circ$ f=5 Hz	$\phi = 90^\circ$ f=1 Hz	$\phi = 90^\circ$ f=5 Hz	$\phi = 180^\circ$ f=1 Hz	$\phi = 180^\circ$ f=5 Hz
400	6,32	23,05	20,68	15,94	35,63	27,75	36,65	26,90
500	6,66	20,05	14,74	10,45	27,26	23,99	31,34	25,78
600	6,88	17,29	13,50	8,89	24,76	20,44	26,04	19,58
700	6,87	15,53	10,58	8,46	19,74	17,06	22,84	18,05
800	7,04	14,85	8,61	8,66	17,72	14,54	19,08	16,21
900	7,32	15,15	6,53	8,30	16,82	12,90	17,82	16,13
1000	7,09	12,75	7,13	6,81	16,35	12,82	15,87	13,84

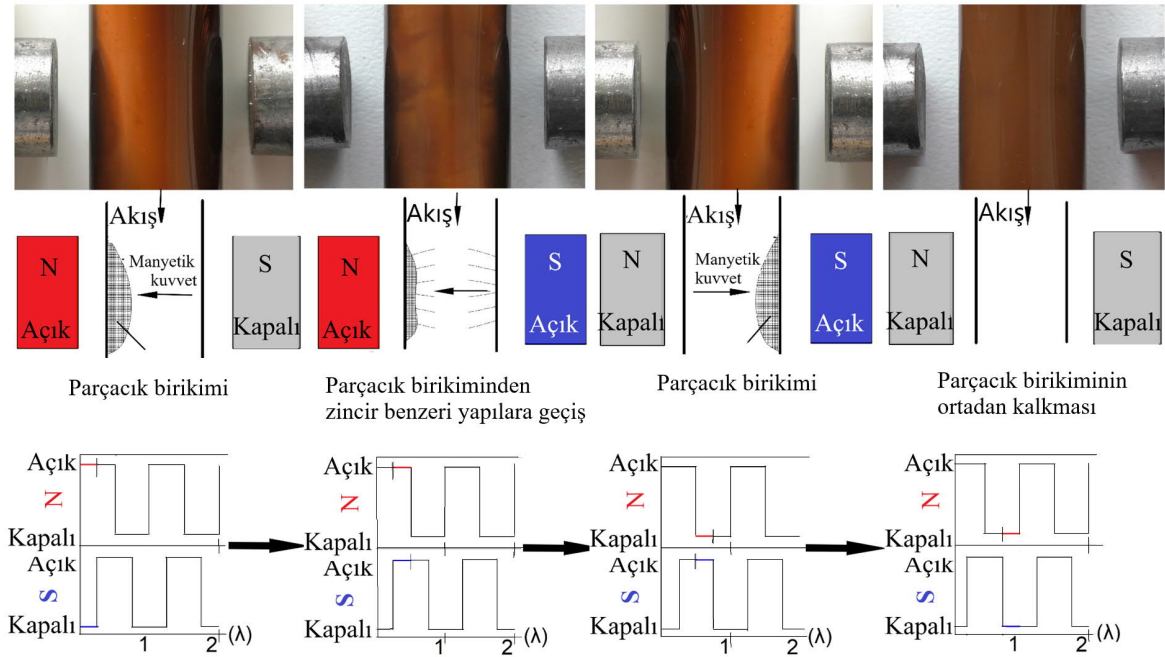
Manyetik alanın etkidiği bölgede ise, $B=0$ durumuna göre yerel Nusselt sayılarında daha fazla artış elde edilmektedir. Şekiller incelendiğinde manyetik alan parametrelerine bağlı olarak da önemli farklar görülmektedir. Manyetik alanın ısı transferi üzerindeki etkisi en belirgin şekilde $Re = 400$ ve $\phi_p = \%1$ için gözlemlenmiş ve bu nedenle aşağıdaki tüm değerlendirmeler bu durum üzerinde yapılmıştır.

Sabit manyetik alan altında ($B = 700$ G, DC) elde edilen veriler incelendiğinde; yerel Nusselt sayısının manyetik alanın etkidiği bölgede maksimum %48, ortalama Nusselt sayısının ise %23,05 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Faz açılı manyetik alan farklı frekans ($f = 1$ ve 5 Hz) ve farklı faz açıları ($\phi = 0^\circ$, 90° ve 180°) ile uygulandığında, Şekil 38’te yer alan tüm grafiklerde yerel Nusselt sayılarında artışlar görülmektedir. İlk olarak, $\phi = 0^\circ$ (referans sistem) ve $f = 1$ Hz uygulaması incelendiğinde yerel Nusselt sayısı dağılımında $x/DRePr = 0,018$ civarında sabit manyetik alandaki gibi bir artış gözlemlenmiştir. Reynolds sayısının artması ile bu artışlar azalmaktadır. Ancak, $\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ için özellikle manyetik alanın etki bölgesinde daha yüksek Nusselt sayısı değerlerine ulaşılmıştır. Bu artışlar yerel ve ortalama Nusselt sayılarında sırasıyla, maksimum %73 ve %36 oranında gerçekleşmiştir. Ayrıca, diğer tüm çalışma parametreleri için, $\phi = 0^\circ$ hariç, $\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ uygulamalarında kararlı bir performans sergilenmiş ve ortalama Nusselt sayılarında en yüksek iyileşmeler elde edilmiştir.

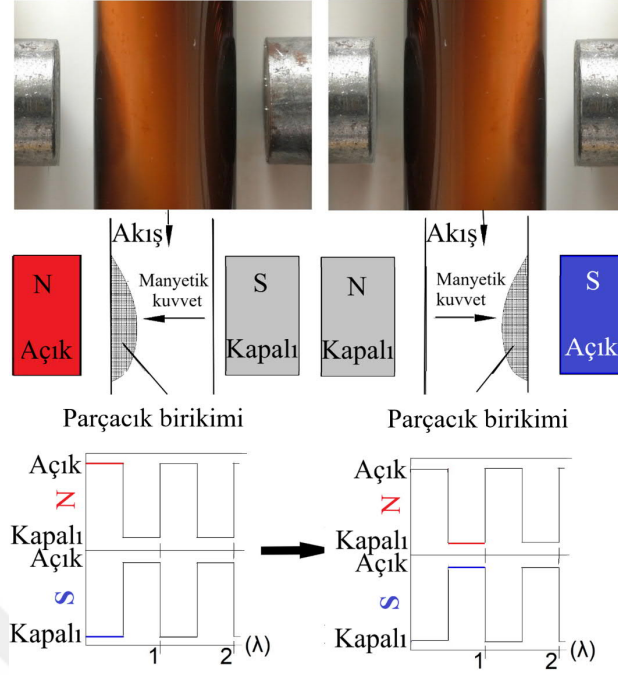
Manyetik alan parametrelerinin ısı transferi üzerindeki etkilerini daha iyi kavrayabilmek için akış alanındaki nanoparçacık hareketlerinin gözlemlenmesi önem taşımaktadır. Bu amaçla, akış hattına ısı transfer borusu ile aynı çapa sahip, ince cidarlı şeffaf bir cam tüp yerleştirilmiş ve ferroakışkanın farklı manyetik alan koşullarındaki akışı sırasında oluşan nanoparçacık davranışları görüntülenmiştir. Ferroakışkanların opak yapısı bu tür iç akış yapılarının görüntülenmesini zorlaştırmasına rağmen, yüksek çözünürlüklü bir kamera yardımıyla, farklı manyetik alan uygulamaları için akış alanındaki nanoparçacık davranışları gözlenmiş ve $\phi_p = \%1$, $Re=400$ ve $f=1$ Hz koşullarında çekilen fotoğraflar Şekil 40, Şekil 41 ve Şekil 42’de sunulmuştur. Akış gözleme deneyleri sırasında farklı ışık kaynakları kullanılmış ancak en net görüntüler gün ışığı altında elde edilmiştir.



Şekil 40. Manyetik alan uygulama yöntemleri ve nanoparçacık hareketinin görselleri (a) sabit manyetik alan, (b) faz açılı manyetik alan ($\phi = 0^\circ$) ($\phi_p = \%1$, $Re=400$, $f=1Hz$)



Şekil 41. $\phi = 90^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulaması ve nanoparçacık hareketinin görselleri ($\phi_p = \%1$, $Re=400$, $f=1Hz$)



Şekil 42. $\phi = 180^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulaması ve nanoparçacık hareketinin görselleri ($\phi_p = \%1$, $Re = 400$, $f = 1\text{Hz}$)

Daha önce belirtildiği üzere, sabit manyetik alan, karşılıklı konumlandırılmış elektromıknatıs kutuplarının sürekli olarak çalıştırılmasıyla üretilmekte ve akış alanına uygulanmaktadır.

Kutuplar arasındaki manyetik alan, Şekil 29’da gösterildiği üzere, 700 Gauss şiddetine ulaşmakta ancak düşük gradyanlı (üniforma yakın) bir yapıya sahip olmaktadır. Bu durumda, karşılıklı elektromıknatıslar arasında etkin bir manyetik çekme kuvveti oluşmamaktadır.

Şekil 40 incelendiğinde, manyetik alan gradyanının düşük olması nedeniyle nanoparçacıkların etkin bir manyetik çekim kuvvetine maruz kalmadığı ve manyetik alan çizgileri boyunca hizalanarak uç uca dizildiği görülmektedir. Bu yapılar literatürde “zincir benzeri yapılar” (chain-like structures) olarak tanımlanmakta ve hem yerel ısıl iletkenliği artırarak hem de akış üzerinde sınırlı düzeyde bozucu etki yaratarak yerel ve ortalama Nusselt sayılarında artışa neden olmaktadır (Shahsavar vd. 2016).

Faz açılı manyetik alan uygulaması karmaşık yapıya sahip olması nedeniyle detaylı bir inceleme gerektirmektedir. Daha önce verilen Şekil 28 incelendiğinde, manyetik alanın akışa hem N hem de S kutbundan, belirli bir faz açısı ile kesintili olarak uygulandığı görülmektedir. Faz açısının 0° olması, karşılıklı elektromıknatısların eş zamanlı olarak açılıp kapandığı referans manyetik alan uygulamasını temsil etmektedir. Buna karşılık, 90° ve 180°

faz açılı uygulamalar, elektromıknatısların karşılıklı olarak farklı zaman adımlarında açılıp kapandığı özgün uygulamalardır.

Uygulanan faz açısı, manyetik alan gradyanını ve dolayısıyla (6) numaralı denklem ile ifade edilen manyetik kuvvetin şiddetini etkilemektedir. Faz açılı manyetik alanların bir diğer önemli parametresi olan frekans ise, birim zamanda kaç kez kesintili manyetik alan uygulandığını yani elektromıknatıs kutuplarının birim zamanda kaç kez açılıp kapandığını belirlemektedir. Şekil 29'da gösterildiği üzere, karşılıklı manyetik kutuplar arasında $\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ faz açısı uygulanmasıyla daha yüksek gradyanlı manyetik alanlar oluşturulmaktadır.

Bu uygulamanın daha iyi anlaşılabilmesi adına, manyetik alanın zamana bağlı değişimi ve bu süreçte nanoparçacıkların davranışları $\phi_p = \%1$, $Re = 400$ ve $f = 1\text{Hz}$ için Şekil 40, Şekil 41 ve Şekil 42'de sunulmaktadır. Sürecin kapsamlı irdelenebilmesi için yapılan analizler maddeler halinde aşağıda detaylandırılmış ve ilgili şekillere referans verilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

- $\phi = 0^\circ$, $f=1\text{ Hz}$ uygulaması: Manyetik alanın $\phi = 0^\circ$ faz açısı ile uygulanması durumunda, karşılıklı elektromıknatısları süren sinyaller arasında herhangi bir faz farkı bulunmamaktadır. Bu çalışma koşullarındaki sinyal dağılımı Şekil 40b'de gösterilmektedir. Frekans döngüsü boyunca elektromıknatıs kutuplarının durumu (açık-kapalı) ve nanoparçacık davranışları aşağıdaki şekilde açıklanmıştır:

1. Frekansın ilk yarısında, karşılıklı manyetik kutuplar birlikte devreye girmektedirler. Akış ortamına 700 Gauss şiddetinde sabit manyetik alan uygulanmakta ancak karşılıklı elektromıknatıslar aynı anda devreye girdiği için manyetik alan gradyanı düşük seviyede kalmaktadır. Dolayısıyla manyetik kuvvetin şiddeti de düşmekte ve nanoparçacıklar manyetik alan çizgileri boyunca hizalanarak zincir benzeri yapılar oluşturmaya başlamaktadır. Şekil 40b'de bu yapıların oluşumu gözlenmiştir. Uç uca dizilen bu nanoparçacıklar ısı köprü görevi görerek yüzeyden iç kısımlara doğru ısı iletimine katkıda bulunmakta, ancak akış bozucu etkileri sınırlı düzeyde kalmaktadır. Elde edilen görüntüler, zincir benzeri yapıların sabit manyetik alan uygulamasında (Şekil 40a) olduğu kadar belirgin olmadığını göstermektedir. Bu durum, manyetik alan uygulama süresinin sabit manyetik alana göre bu yapıların oluşması için yeterli olmadığı değerlendirilmektedir.
2. Frekansın ikinci yarısında, manyetik kutuplar devreden çıkmakta ve oluşan zincir benzeri yapılar serbest kalarak akış içinde dağılmaktadır. Şekil 40b'de sunulan akış

görüntüleri incelendiğinde, frekansın ikinci yarısında bu yapıların kaybolduğu görülmektedir. Bu durum, frekansın ilk yarısında yüzeyden ısı çekerek enerji kazanan nanoparçacıkların enerjilerini akış ortamına yaymalarını sağlamaktadır. $\phi = 0^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulamasında gözlenen bu dinamikler, yerel Nusselt sayılarında (Şekil 38) ve ortalama Nusselt sayılarında (Tablo 12 ve Tablo 13) gözlenen düşük artışları açıklamaktadır.

- $\phi = 90^\circ$, $f=1$ Hz uygulaması: Bu manyetik alan uygulamasında karşılıklı manyetik kutupları süren sinyaller arasında $\phi = 90^\circ$ 'lik faz açısı bulunmaktadır. Bu koşullar altında, Şekil 41'de gösterildiği gibi, frekans döngüsü boyunca karşılıklı kutuplar arasında dört farklı süreç meydana gelmektedir. Bu süreçler aşağıda irdelenmiştir:
 1. Frekansın ilk çeyreğinde, N kutbu devreye girerken S kutbu henüz devrede değildir. Bu durumda, akış alanına N kutbundan 700 G şiddetinde sabit manyetik alan uygulanmakta ve yüksek manyetik alan gradyanı N kutbuna doğru bir manyetik çekme kuvveti oluşturmaktadır. Bu kuvvet nedeniyle nanoparçacıklar yüzeye doğru yönelmekte ve N kutbu yönünde birikme eğilimi göstermektedir. Bu süreçte, parçacıkların ani hareketlerine bağlı olarak akış içerisinde çalkantılar oluşmaktadır. Şekil 41'de sunulan akış görüntülerinden nanoparçacıkların N kutbunda yoğunlaştığı görülmektedir. Bu kümelenme, frekansın ilk çeyreği süresince akış içinde bir engel gibi davranarak girdap oluşumunu teşvik etmektedir.
 2. Frekansın ikinci çeyreğinde, N kutbu devrede kalmaya devam ederken S kutbu da devreye girmektedir. Bu süreç, karşılıklı kutupların eşzamanlı olarak aktif hale gelmesine neden olmakta ve manyetik alan gradyanında ani bir azalmaya yol açmaktadır. Sonuçta, kutuplar arasında üniforma yakın bir manyetik gradyan oluşmakta ve manyetik çekme kuvveti önemli ölçüde azalmaktadır. Bu aşamada, nanoparçacıklar zincir benzeri yapılar oluşturmaya başlamaktadırlar. Şekil 41b' den de görüldüğü üzere, N kutbu yakınında birikmiş olan nanoparçacıklar, zincir benzeri yapılara dönüşerek yüzeyden çektikleri ısı enerjisiyi akış içerisine taşımaktadırlar.
 3. Frekansın üçüncü çeyreğinde, Frekansın üçüncü çeyreğinde, N kutbu devreden çıkarken S kutbu aktif kalmaya devam etmektedir. Bu süreçte yeniden yüksek gradyanlı bir manyetik alan oluşmakta ve S kutbu yönünde bir manyetik çekme kuvveti meydana gelmektedir. Nanoparçacıklar bu çekme kuvveti etkisiyle N kutbundan ayrılarak S kutbuna yönelmekte ve bu hareket, akış içinde çalkantıların

oluşumuna neden olmaktadır. Şekil 41c'deki akış görüntüleri bu durumu açıklamaktadır.

4. Frekansın son çeyreğinde, her iki kutup da devreden çıkmakta ve bu durum manyetik alanın tamamen ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Sonuçta, nanoparçacıklar üzerindeki manyetik kuvvetler kaybolmakta ve nanoparçacıklar hidrodinamik kuvvetlerin etkisiyle yüzeyden ayrılarak akış ortamına yayılmaktadırlar.

- $\phi = 180^\circ$, $f = 1$ Hz uygulaması: Bu uygulamada, karşılıklı manyetik kutupları süren sinyaller arasında $\phi = 180^\circ$ 'lik bir faz açısı bulunmaktadır. Bu koşullar altında, frekans döngüsü boyunca karşılıklı kutuplar arasında iki farklı süreç meydana gelmektedir (Şekil 42). Söz konusu iki durum, $\phi = 90^\circ$ faz açısı ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir:

1. Frekansın ilk yarısında, N kutbu aktif olup S kutbu devre dışı kalmaktadır. Bu süreçte, tek bir manyetik kutbun aktif olması nedeniyle akışa yüksek gradyanlı bir manyetik alan uygulanmaktadır. Oluşan manyetik kuvvetin etkisiyle nanoparçacıklar N kutbuna doğru çekilmektedir. Şekil 42a'da sunulan görüntülerden de görüldüğü üzere, nanoparçacıklar bu süre zarfında yüzeyde yığılma eğilimi göstermektedir. Bu yığılma sırasında nanoparçacıkların yoğun hareketi, akış içerisinde çalkantılar meydana getirmektedir. Ayrıca, bu yığılma, boru yüzeyinde akışa karşı bir engel teşkil etmekte ve girdap oluşumuna neden olmaktadır.
2. Frekansın ikinci yarısında, N kutbu devre dışı kalırken S kutbu devreye girmektedir. Bu süreçte, manyetik kuvvetin yön değiştirmesi sonucunda nanoparçacıklar N kutbunun bulunduğu yüzeyden koparak S kutbunun bulunduğu yüzeye doğru sürüklenmektedirler. Nanoparçacıkların hareketlenmeleri ile akış içerisinde yüksek düzeyde çalkantılar meydana gelmektedir. Aynı zamanda nanoparçacıklar N kutbu tarafında kümелendikleri sırada absorbe ettikleri ısı enerjisi akış içerisine taşıyarak ısı transferini iyileştirmektedirler.

Faz açılı manyetik alan uygulamalarında, referans sistemden ($\phi = 0^\circ$) farklı olarak, $\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ özgün sistemlerinde birim zaman içinde elektromıknatısların karşılıklı olarak ayrı ayrı devreye girmesi manyetik alan gradyanının oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum, nanoparçacıkların zamanla bir yüzeyden diğerine taşınmasına ve akış içerisinde önemli düzeyde çalkantılar oluşmasına neden olmaktadır. Bu yüzden $\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ için

elde edilen yerel ve ortalama Nusselt sayıları, $\phi = 0^\circ$ ve sabit manyetik alan ($B = 0$) durumlarına kıyasla çok daha yüksektir. Burada, $\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ uygulamaları için dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, $\phi = 90^\circ$ uygulamasında birim zamandaki manyetik alan kesintilerinin neden olduğu nanoparçacık hareketleri, $\phi = 180^\circ$ uygulamasına kıyasla yarı zamanda meydana gelmektedir (Şekil 41 ve 42). Ayrıca $\phi = 90^\circ$ uygulamasında, manyetik alanın etkilemediği ve nanoparçacıkların akış içerisinde serbest kaldığı bir süre yer almaktadır. Bu durum, farklı nanoparçacık hacim oranlarında ve frekans değerlerinde ısı taşınım katsayılarında elde edilen iyileşme oranlarını ve basınç düşüşlerini etkilemektedir. Tüm bu değişimler ilgili parametrelerin irdelendiği başlıklar altında açıklanmıştır.

3.1.2. Manyetik Alan Frekansının Isı Transferine Etkisi

Manyetik alan frekansı, manyetik alandaki değişimlerin birim zamanda gerçekleşme sayısı olup elektromıknatıs kutuplarının uygulanan kontrol sinyaline göre ne hızda açılıp kapandığını belirlemektedir.

Yerel Nusselt sayıları incelendiğinde, manyetik alan frekansının 1 Hz'den 5 Hz'e yükseltilmesiyle, yerel Nusselt sayılarının genel olarak azaldığı gözlenmektedir. Örneğin, $\phi = 0^\circ$ için, yerel ve ortalama Nusselt sayılarındaki maksimum artışlar, sırasıyla %40 ve %20,68'den %20 ve %15,94'e düşmüştür ($\phi_p = \%1$, $Re = 400$). Bu düşüş, frekansın artması sonucu, ısı geçişinin iyileşmesine katkı sağlayan nanoparçacık hareketlerinin gerçekleşebilmesi için gerekli sürenin yetersiz olmasıdır. Frekans etkisi, nanoparçacık hareketi ve yüzeydeki birikimlerin belirgin şekilde gözlemlendiği faz açılı durumlarda ($\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$) daha net olarak ortaya çıkmaktadır. Örneğin, $\phi = 180^\circ$ uygulamasında, frekansın 1 Hz'den 5 Hz'e çıkmasıyla yerel ve ortalama Nusselt sayılarındaki artışlar sırasıyla %73 ve %36,6'dan %41 ve %26,9'a düşmüştür ($\phi_p = \%1$, $Re = 400$). Faz açılı durumlarda ($\phi > 0^\circ$), nanoparçacıklar, manyetik kuvvetin yönü ve şiddetine bağlı olarak akış içinde etkili bir dalgalanma hareketi oluşturabilmek adına yeterli bir süreye ihtiyaç duymaktadırlar.

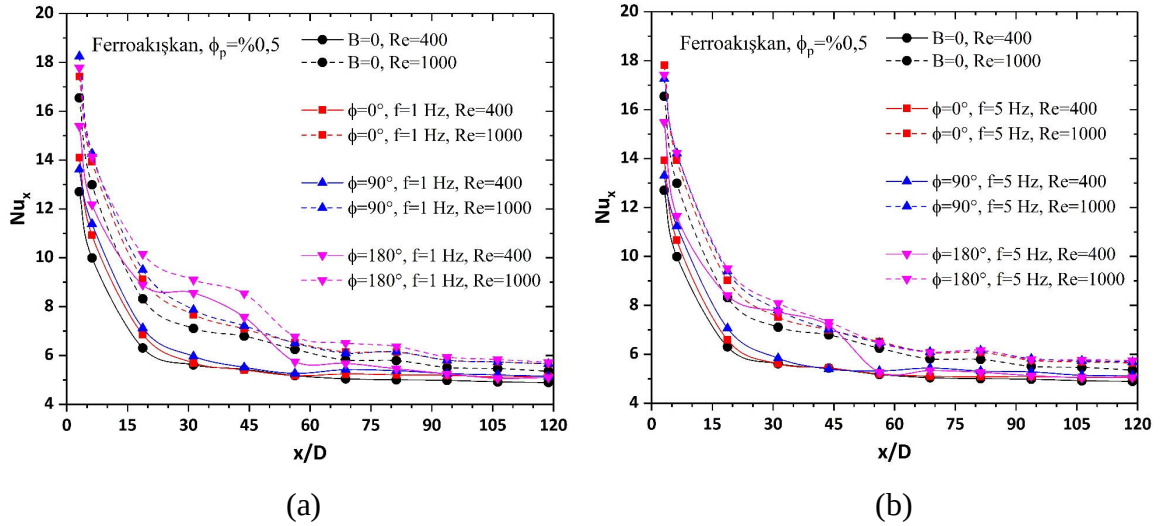
Öte yandan, $\phi = 0^\circ$ uygulamasında, frekansın artması ile birlikte ısı transferinde görülen azalma daha sınırlı düzeyde kalmaktadır. Bunun nedeni, $\phi = 0^\circ$ uygulamasında, nanoparçacıkların yüzeye doğru hareket etmek yerine, bulundukları konumda zincir benzeri yapılar oluşturmalarıdır. Bu yapılar, ısı transferi için gereken sürenin azalması nedeniyle, ısı taşınım katsayılarında bir miktar düşüşe yol açmaktadırlar. Ancak manyetik kuvvetin yok

denecek kadar düşük olması nedeniyle, nanoparçacıklar yüzeye hareket etmek için zorlanmamakta ve artan frekanstan daha az etkilenmektedirler.

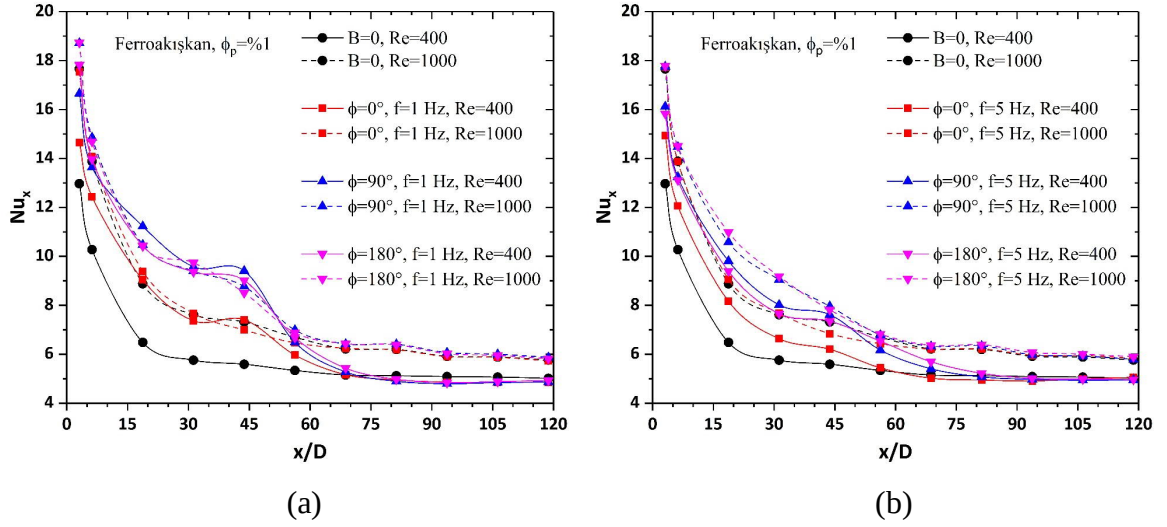
Bu incelemeler ışığında, kritik bir nokta olarak şunun altı çizilmelidir: $\phi = 90^\circ$ ve 180° uygulamaları, artan frekanstan daha fazla etkilenmelerine rağmen, bu uygulamalarda $\phi = 0^\circ$ referans durumuna kıyasla daha yüksek taşınım katsayıları elde edilmektedir. Bu sonuç, faz açılı manyetik alan uygulamasının ısı transferini iyileştirmede başarılı bir yöntem olduğunu göstermektedir.

3.1.3. Reynolds Sayısının Isı Transferine Etkisi

Reynolds sayısı, manyetik alan etkisi altında akışkanın taşınımıyla ısı transferi performansını belirlemede kritik bir parametredir. Reynolds sayısının artmasıyla birlikte, nanoparçacıklar üzerinde etkili olan hidrodinamik kuvvetler de artmakta ve bu kuvvetler manyetik kuvvetlere kıyasla daha baskın hale gelmektedirler. Bu durum manyetik alan altında taşınımıyla ısı transferini önemli ölçüde etkilediğinden, farklı manyetik alan parametrelerinde ve Reynolds sayısının 400 ile 1000 arasında değişen değerlerinde deneyler yapılmış ve elde edilen yerel Nusselt sayıları, sunulmuştur.



Şekil 43. $Re = 400$ ve $Re = 1000$ için yerel Nusselt sayılarının karşılaştırılması (a) $f = 1$ Hz (b) $f = 5$ Hz ($\phi_p = 0.5$)



Şekil 44. $Re = 400$ ve $Re = 1000$ için yerel Nusselt sayılarının karşılaştırılması (a) $f=1$ Hz (b) $f=5$ Hz ($\phi_p = \%1$)

Bu bölümde Reynolds sayısının taşınım ile ısı transferine etkisinin daha iyi anlaşılması amacıyla %0,5 ve %1 nanoakışkan hacim oranları, 1 Hz ve 5 Hz frekans değerleri ve $Re = 400$ ve $Re = 1000$ için elde edilen yerel Nusselt sayıları Şekil 43 ve 44'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Manyetik alan yokken ($B = 0$), hem yerel hem de ortalama Nusselt sayılarının, Reynolds sayısı ile birlikte artış gösterdiği Şekil 38 ve Şekil 39'dan gözlemlenmiştir. Ancak manyetik alan uygulandığında, Reynolds sayısı ile ısı transferi artışı arasındaki ilişki daha karmaşık bir hal almaktadır. Şekil 43 ve Şekil 44, manyetik alanın ısı transferi üzerindeki etkisinin Reynolds sayısı arttıkça önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Bu eğilim, incelenen tüm manyetik alan parametreleri arasında tutarlı olup, Reynolds sayısının artmasıyla birlikte artan hidrodynamic kuvvetlerin, manyetik kuvvetlere karşı daha baskın hale geldiklerini ortaya koymaktadır.

Yerel ve ortalama Nusselt sayılarındaki maksimum artışlar, $\phi = 90^\circ$ uygulamasında, Reynolds sayısı 400 ve 1000 için sırasıyla %73 ve %35,63'ten %32,2 ve %16,35'e ve benzer şekilde $\phi = 180^\circ$ uygulamasında %73 ve %36,65'ten %37 ve %15,87'ye düşmektedir ($f = 1$ Hz ve $\phi_p = \%1$). Bu düşme, özellikle $\phi = 0^\circ$ 'da daha belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. $\phi = 0^\circ$ 'da görülen zincir benzeri yapılar, $\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ 'de manyetik kuvvetler etkisiyle oluşan nanoparçacık birikimlerine kıyasla, artan hidrodynamic kuvvetlerden daha çok etkilenmektedir.

Manyetik alan uygulanması özellikle düşük Reynolds sayılarında ısı transferini belirgin şekilde artırmaktadır. Şekil 44'te, $f = 1$ Hz için yerel Nusselt sayıları, $Re = 400$ ve

$Re = 1000$ koşullarında, manyetik alan bölgeleri içinde benzer değerler göstermektedir. Ancak, yüksek frekans ve düşük nanoparçacık hacim oranında (Şekil 43), en yüksek Nusselt sayıları $Re = 1000$ 'de meydana gelmektedir. Bu durum, hidrodinamik kuvvetlerin manyetik kuvvetlere karşı daha etkin hale gelmesinden kaynaklanmaktadır. Buna karşın, düşük Reynolds sayılarında, faz açılı manyetik alan uygulamaları, manyetik alanın olmadığı duruma ($B = 0$) kıyasla ısı transferi önemli ölçüde artırmaktadır. En yüksek Nusselt sayısı artışları, $\phi = 90^\circ$ ve 180° faz açılı manyetik alanlar uygulandığında elde edilmektedir.

3.1.4. Nanoparçacık Hacim Oranının Isı Transferine Etkisi

Bu noktaya kadar yapılan irdelemelerde, ısı transferi üzerindeki iyileşme oranlarının daha belirgin gözlemlenmesi sebebiyle $\phi_p = \%1$ hacim oranına sahip ferroakışkan üzerine odaklanıldığından, bu başlık altında $\phi_p = \%0,5$ nanoparçacık hacim oranı üzerinde durulmuştur.

Farklı manyetik alan parametreleri altında elde edilen yerel Nusselt sayıları daha önce Şekil 38'te sunulmuştur. Şekil incelendiğine, nanoparçacık hacim oranının $\%1$ 'den $\%0,5$ 'e düşmesiyle yerel Nusselt sayılarının önemli oranda azaldığı görülmektedir. Örneğin, $Re = 400$ için, sabit manyetik alan (DC) durumunda nanoparçacık hacim oranının $\%1$ 'den $\%0,5$ 'e düşmesiyle birlikte, yerel ve ortalama Nusselt sayılarında elde edilen maksimum artışların sırasıyla $\%48$ ve $\%23$ 'ten $\%31$ ve $\%14$ 'e düştüğü görülmektedir. Benzer şekilde, $\phi = 180^\circ$ uygulamasında, $Re = 400$, $f = 1$ Hz için, ortalama Nusselt sayısındaki artış $\%36$ 'dan $\%25,6$ 'ya düşmektedir. Tablo 12 ve 13, incelenen iki hacim oranı için ortalama Nusselt sayılarındaki artışları özetlemektedir. Tablolar incelendiğinde nanoparçacık hacim oranının düşmesine bağlı olarak yerel ve ortalama Nusselt sayısı değerlerinde azalmalar görülmektedir. Bu durum nanoparçacık sayısının düşmesi nedeniyle akış içerisinde çalkantı, dizilme, birikme gibi davranışların azaldığını ve beklendiği üzere Nusselt sayılarında elde edilen iyileşme oranlarının düşme nedenini açıklamaktadır.

Ancak her manyetik alan uygulaması nanoparçacık oranındaki azalmadan aynı oranda etkilenmemektedir. Sonuçlar bu açıdan incelendiğinde, hacim oranındaki düşüş nedeniyle Nusselt sayılarındaki en fazla azalma $\phi = 90^\circ$ 'de görülmektedir. Bu durum, daha önce Şekil 41'de gösterildiği $\phi = 90^\circ$ 'ın diğer faz açılara kıyasla içerdiği farklılıkla açıklanabilir.

$\phi = 90^\circ$ faz açılı uygulamada, birim zaman içerisinde iki yerine dört dizi süreç bulunmaktadır. Bu durumda, her bir süreçte manyetik alan etkiye süresi, $\phi = 0^\circ$ ve $\phi =$

180°'ye kıyasla yarıya düşmektedir. Nanoparçacık hacim oranının azalması nedeniyle nanoparçacıkların manyetik alan etkime süresi içerisinde oluşturdukları kümelenmeler ve zincir benzeri yapılar diğer faz açılarına göre daha zayıftır. Bu durum, ısı transferi artışında önemli azalmaya neden olmaktadır.

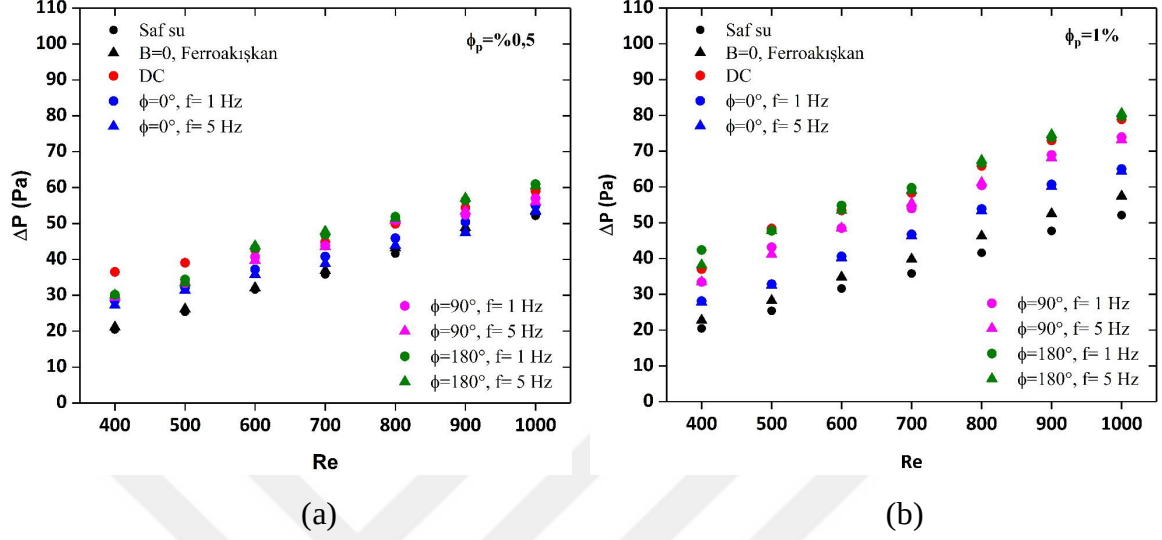
Buna karşın, Şekil 42 ve Tablo 12'de $\phi = 180^\circ$ faz açılı uygulamaya ilişkin Nusselt sayıları incelendiğinde, nanoparçacık hacim oranının azalmasına rağmen, ısı transferi oranlarında yine en yüksek artışlar gözlenmektedir. $\phi = 180^\circ$ için bu tutarlılık, yüksek gradyanlı manyetik alanın, süreç boyunca $\phi = 90^\circ$ 'ye kıyasla daha uzun süreli uygulanmasıdır. Ayrıca bu uygulamada nanoparçacıklar $\phi = 0^\circ$ 'a kıyasla periyodik olarak yüksek manyetik kuvvetle boru cidarına çekilmektedir. Bu farklılıklar, $\phi = 180^\circ$ faz açılı uygulamanın, diğer parametrelerdeki değişimlerden daha az etkilenmesini ve aynı zamanda ısı transferini iyileştirmede diğer faz açılarına göre daha etkili ve kararlı olmasını açıklamaktadır.

Faz açılı manyetik alan uygulamalarından elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, ferroakışkanın, $\phi > 0$ faz açısı, $f = 1$ Hz frekans, %1 nanoparçacık hacim oranı ve düşük Reynolds sayıları koşullarında daha yüksek ısı transferi performansı gösterdiği görülmektedir. Tüm durumlar için yerel ve ortalama Nusselt sayıları dikkate alındığında en yüksek ısı transfer performansının $\phi = 180^\circ$, $f = 1$ Hz manyetik alan parametreleri için elde edildiği sonucuna varılmaktadır.

3.1.5. Basınç Düşümü ve Termal Etkinlik Analizleri

Faz açılı manyetik alan etkisi altında, test bölgesi boyunca ölçülen basınç düşümleri, saf su ve ferroakışkan ($B=0$) için ölçülen basınç düşümleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 45'te sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü üzere, incelenen tüm parametreler için Reynolds sayısının artmasıyla basınç düşümü lineer bir artış eğilimi göstermektedir. Bu durum akış hızındaki artışa bağlı olarak artan sürtünme kayıplarıyla ilişkili olup beklenen bir durumdur. Saf su ile ferroakışkan için ölçülen değerler karşılaştırıldığında, basınç düşümünün ferroakışkan için tüm Reynolds sayılarında daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu artış, yüksek Reynolds sayılarında daha belirgin hale gelmektedir. Su bazlı ferroakışkanın içerdiği nanoparçacıklar, akış içinde sürtünmeyi artırarak basınç düşümünü yükseltmektedir. Özellikle, %0,5 nanoparçacık hacim oranına sahip ferroakışkan için basınç düşümü değerlerinin, düşük nanoparçacık içeriği nedeniyle, saf su değerlerine daha yakın olması,

yukarıdaki ifadeyi desteklemektedir. $\phi_p = \%1$ için elde edilen basınç düşümü değerleri $\phi_p = \%0,5$ 'e göre Reynolds sayısının artmasıyla daha fazla artmaktadır.



Şekil 45. Basınç düşümünün Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \%0,5$, (b) $\phi_p = \%1$ ($B=700G$)

Manyetik alan etkisi ısı transferini iyileştirirken, aynı zamanda basınç düşümünü de artırmaktadır. Şekil 45'te, manyetik alanın etkilediği ($B=0$) durumuna göre tüm faz açılı manyetik alan uygulamalarında, test bölgesi boyunca basınç düşümlerinin arttığı açıkça gözlenmektedir. Farklı manyetik parametreler için elde edilen sonuçlar $f = 1$ Hz için karşılaştırıldığında, Şekil 45'ten görüldüğü üzere, $\phi = 0^\circ$ uygulamasının test bölgesi boyunca ölçülen en düşük basınç düşüm değerlerini verdiği gözlenmektedir. Bu durum, $\phi = 0^\circ$ uygulamasında karşılıklı elektromıknatısların iki süreçli (%50 açık ve %50 kapalı) çalışması ve düşük gradyanlı manyetik alan üretmesiyle ilişkilidir. $\phi = 0^\circ$ 'da, elektromıknatısların aktif oldukları ilk süreçte nanoparçacıklar zincir benzeri yapılar oluşturmakta ve bu yapılar diğer faz açılarında görülen nanoparçacık yığılmalarına kıyasla akışta daha az karışmaya yol açmaktadırlar. Ayrıca sonraki süreçte elektromıknatıs kutuplarının kapalı kalması, manyetik alanın etkisini ortadan kaldırarak zincir benzeri yapıların dağılmasına neden olmakta ve basınç düşümünün daha fazla artmasını engellemektedir.

Sabit manyetik alan uygulaması (DC) dikkate alındığında ise basınç düşümünün $\phi = 0^\circ$ uygulamasına göre yaklaşık iki katına çıktığı görülmektedir. Sabit manyetik alan uygulamasında kutuplar karşılıklı ve sürekli olarak açık konumdadır. Bu nedenle nanoparçacıklar, manyetik alan uygulanan bölgeler içerisinde zincir benzeri yapılar

oluşturmakta ve bu durum zamanla değişmemektedir. $\phi = 0^\circ$ uygulamasında ise, elektromıknatısların karşılıklı açık-kapalı olması akıştaki manyetik alandan etkilenme süresini yarıya düşürmekte ve bu nedenle sabit manyetik alan uygulaması $\phi = 0^\circ$ uygulamasına göre yaklaşık iki kat daha fazla basınç düşümüne neden olmaktadır.

Şekil 45, $\phi > 0^\circ$ için incelendiğinde, $\phi = 180^\circ$ faz açılı uygulamanın en yüksek basınç düşümü değerlerini verdiği görülmektedir. Basınç düşümündeki bu artış, yüksek gradyanlı manyetik alanın karşılıklı kutuplar arasında sıra ile uygulanması ve buna bağlı olarak nanoparçacıklar üzerinde yüksek manyetik kuvvetin etkili olmasına bağlanmaktadır. $\phi = 180^\circ$ nanoparçacıkların manyetik kuvvet ile boru içerisinde bir taraftan diğerine çekilmesi, akış içerisinde yüksek çalkantılara neden olmakta manyetik kaynağın bulunduğu cidarlarda kümelenmeler oluşmaktadır. Bu nanoparçacık kümeleşmesinden dolayı ferroakışkanın viskozitesi artmaktadır. Viskozite artışı, akışın gerçekleştiği kanalda basınç düşümünü ve akış için gerekli pompa gücünü artırmaktadır (Elçioğlu vd. 2014). Bu durum, daha önce belirtildiği üzere ısı transfer katsayılarında yüksek artışlara neden olurken aynı zamanda yüksek basınç düşümlerine de neden olmaktadır. Ayrıca, $\phi = 180^\circ$ 'de, $\phi = 0^\circ$ 'de olduğu gibi manyetik alanın uygulanmadığı (kutupların kapalı kaldığı) bir sürenin olmaması, yüksek basınç düşümüne sebep olan bir diğer faktördür.

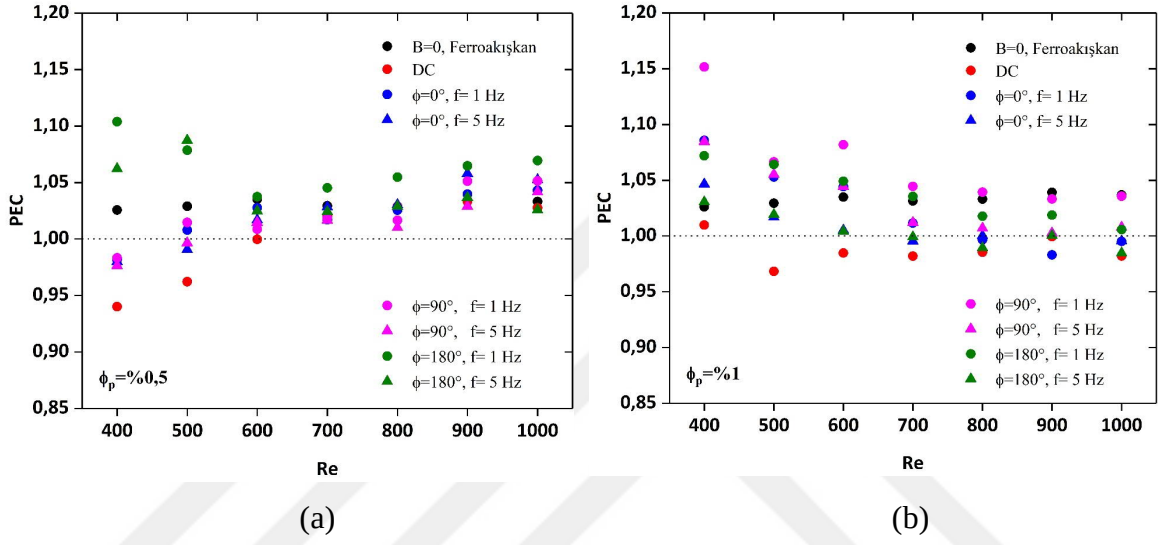
$\phi = 90^\circ$ faz açılı uygulama ise, $\phi = 180^\circ$ 'ye kıyasla daha düşük basınç düşümü değerleri ortaya koymaktadır. Bunun nedeni $\phi = 90^\circ$ 'de birim zamanda dört süreç olması (Şekil 41) ve bu süreçlerden birinde manyetik alanın uygulanmamasından kaynaklanmaktadır.

Manyetik alan frekansının basınç düşümüne etkisi incelendiğinde ise, frekansın 1 Hz'den 5 Hz'e çıkmasıyla birlikte basınç değerlerinin genel olarak bir miktar düştüğü görülmektedir. Bu durum, tüm manyetik alan uygulamalarında manyetik alanın etkilediği sürenin %50 olarak sabit kalmasına rağmen (sabit manyetik alan hariç) artan frekansa bağlı olarak manyetik alandaki değişimlerin daha hızlı meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda nanoparçacıkların, 1Hz durumuna göre, zincir benzeri yapı veya yüzeye yığılma davranışları gösterebilmesi için gerekli süre kısaltmakta ve buna bağlı olarak akış çalkantıları ve basınç düşümü azalmaktadır.

Basınç düşümü değerleri nanoparçacık hacim oranı yönünden değerlendirildiğinde ise, tüm durumlarda $\phi_p = \%0,5$ için, $\phi_p = \%1$ 'e göre basınç düşümlerinin önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. Bu durum, azalan hacim oranıyla birlikte nanoparçacıkların akış içerisinde çalkantı, dizilme, birikme gibi davranışlarının azalmasıdır. Değerlerdeki bu azalma, basınç

düşümünü en fazla etkileyen parametrenin nanoparçacık hacim oranı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan ve Nusselt sayısındaki artış oranının sürtünme faktöründeki artışa oranı olarak ifade edilen Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) yardımıyla incelenen tüm sistemlerinin ısıl performansı değerlendirilmiştir. Bu bağlamda hesaplanan PEC değerleri Şekil 46’da sunulmaktadır.



Şekil 46. Termal iyileşme oranlarının Reynolds sayısı ile değişimi
(a) $\phi_p = 0.5\%$, (b) $\phi_p = 1\%$ ($B = 700\text{G}$)

PEC değeri'nin 1'den büyük olması, ısı transferinde elde edilen iyileşmeye göre basınç düşümünde daha az kayıplar olduğunu göstermektedir. PEC değerlerinin 1'den küçük olması ise bunun tersi bir durumdur. Örneğin, sabit manyetik alan altında, $\phi_p = 1\%$ için PEC değeri 1'in altındadır. Bu durum düşük gradyanlı sabit manyetik alan etkisinde düşük ısı transfer artış oranları elde edilmesi nedeniyle. Düşük Reynolds sayıları ve 1 Hz frekans değeri için ise daha yüksek PEC değerleri elde edilmiş ve faz açılı manyetik alanların bu koşullar altında ısı transferi performansı üzerindeki önemli etkisi ortaya konmuştur. Yine $\phi_p = 0.5\%$ için artan Reynolds sayısı ile termal performans artarken, $\phi_p = 1\%$ için ise azalmaktadır. Bu durumda düşük nanoparçacık hacim oranlarında manyetik alan daha etkili olmaktadır.

Faz açılı manyetik alanlar genellikle daha iyi ısı performans sergilemektedir. En yüksek PEC değerleri genel olarak, $\phi_p = 1\%$ için $\phi = 90^\circ$, $\phi_p = 0.5\%$ için ise $\phi = 180^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulamalarında elde edilmiştir. Bu sonuç, tez çalışması kapsamında

uygulanan özgün yaklaşımın klasik yaklaşıma göre daha yüksek ısı performans sağladığını ortaya koymuştur.

3.2. Değişken Yönlü Sabit Manyetik Alan Uygulamasından Elde Edilen Bulgular

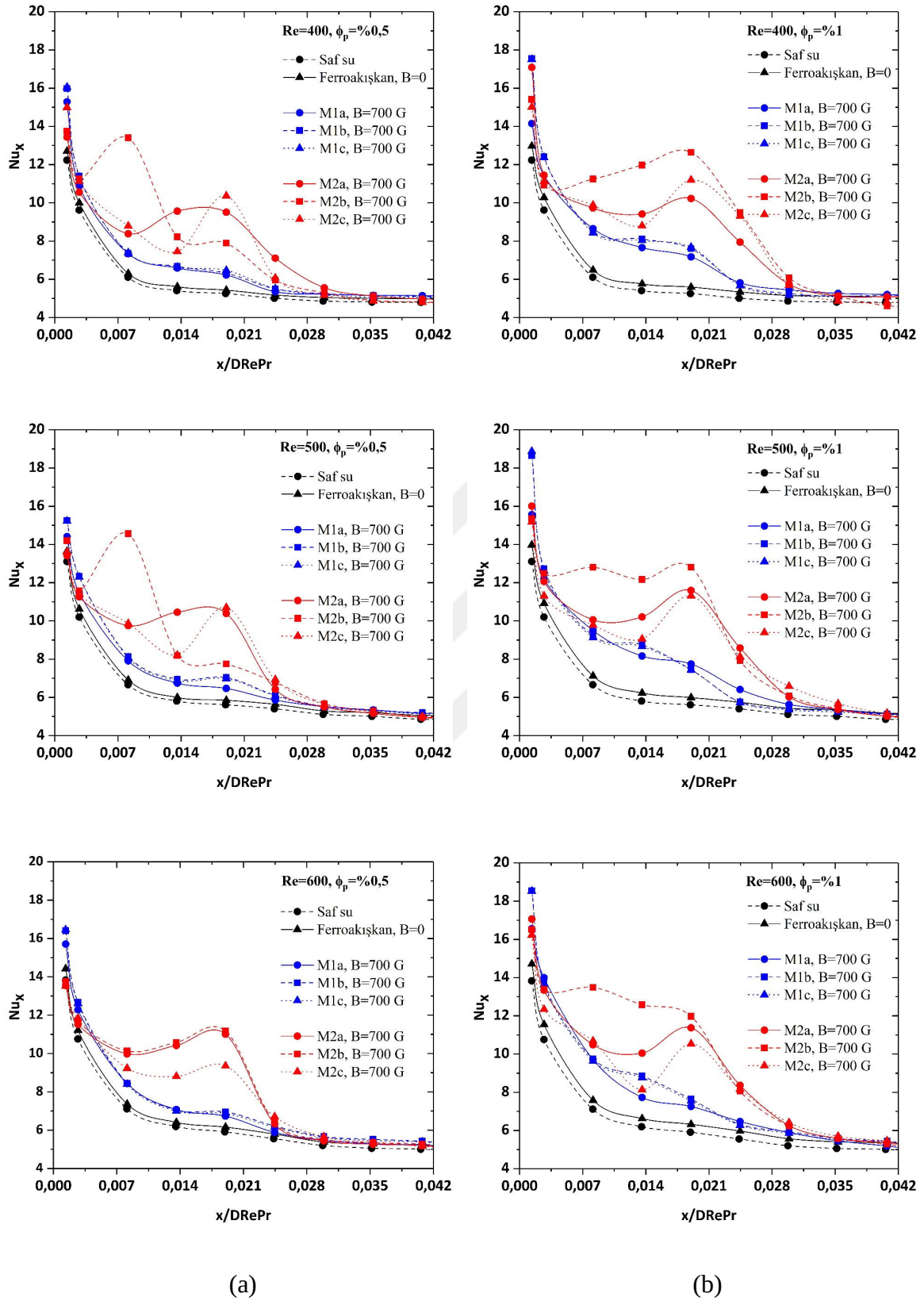
Değişken yönlü sabit manyetik alan etkisi altında yapılan deneylerde ferroakışkanın laminar akış koşullarında zorlanmış taşınımıyla ısı transferi aşağıda verilen parametrelerin kontrolünde incelenmiştir:

- Manyetik alan şiddeti: 700 G
- Mıknatıs konumları: M1a, M1b, M1c, M2a, M2b ve M2c
- Reynolds sayısı: 400-1000
- Nanoparçacık hacim oranı: $\phi_p = \%0,5$ ve $\%1$

Değişken yönlü manyetik alan uygulamasının, yukarıda verilen çalışma parametreleri eşliğinde, yerel ve ortalama Nusselt sayıları, basınç düşüşü değerleri ve termal iyileşme oranları (PEC) üzerindeki etkileri kapsamlı olarak incelenmiştir. Bu bölüm; mıknatıs konumlarının ısı transferine etkisi, Reynolds sayısının ısı transferine etkisi, nanoparçacık hacim oranının ısı transferine etkisi ve basınç düşümü ve termal etkinlik analizleri başlıkları altında detaylandırılmış ve elde edilen bulgular tartışılmıştır.

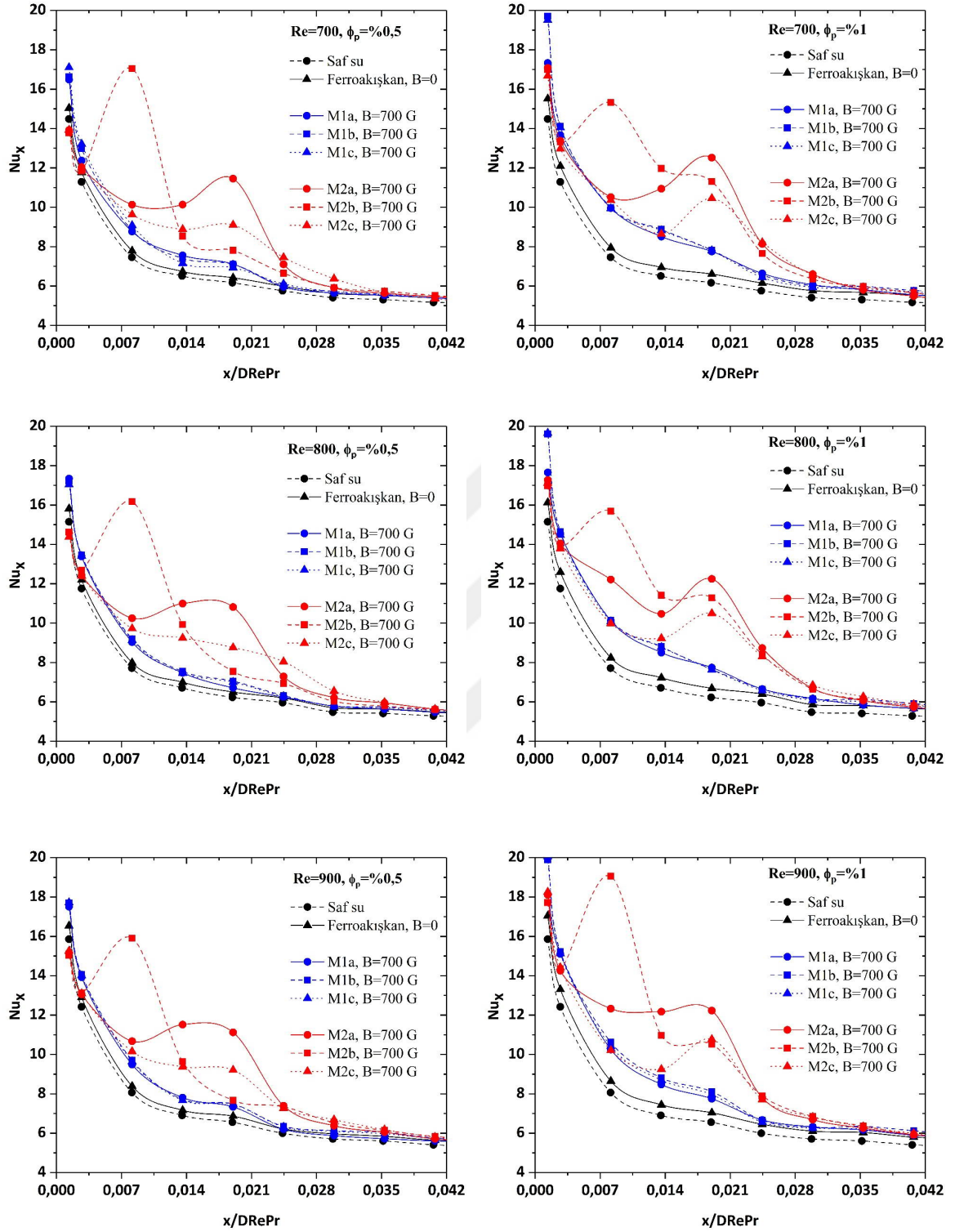
3.2.1. Mıknatıs Konumlarının Isı Transferine Etkisi

Yukarıda verilen tüm parametreler için yapılan deneyler sonucunda ısı transfer bölgesi boyunca yerel Nusselt sayıları elde edilmiştir. Şekil 47, farklı Reynolds sayılarında, boyutsuz eksenel mesafeye ($x/DRePr$) göre, $\phi = \%0,5$ ve $\phi = \%1$ nanoparçacık hacim oranlarındaki ferroakışkanın laminar zorlanmış taşınımında, farklı mıknatıs yerleşimleri için elde edilen yerel Nusselt sayılarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Ortalama Nusselt sayıları yine karşılaştırmalı olarak Şekil 48’de verilmiştir. Farklı mıknatıs yerleşimleri için elde edilen ortalama Nusselt sayılarının saf suya göre yüzde artışları ise $\phi_p = \%0,5$ ve $\phi_p = \%1$ nanoparçacık hacim oranları için sırasıyla Tablo 14 ve 15’te özetlenmiştir.

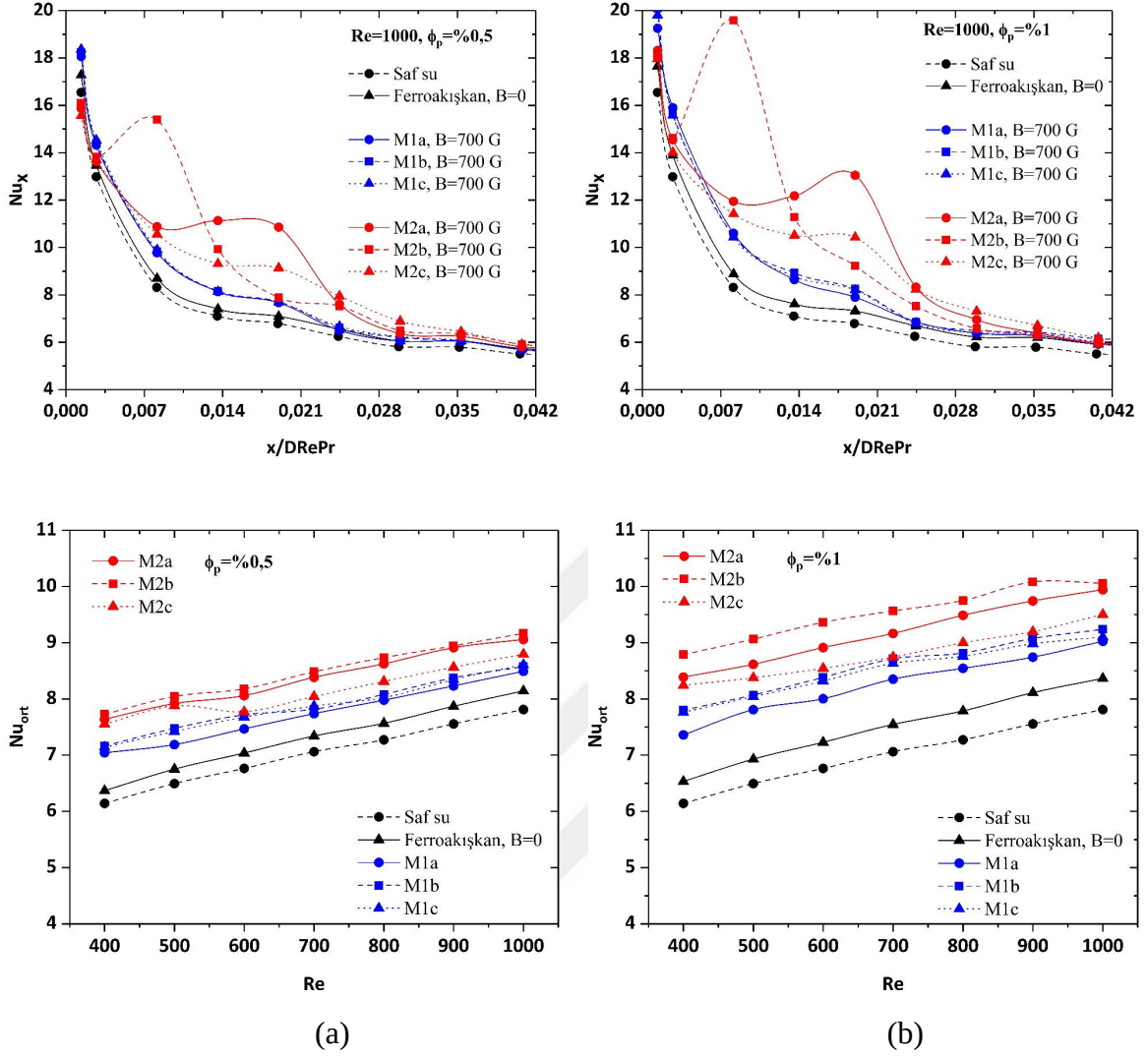


Şekil 47. Değişken yönlü mıknatıs konumları için yerel Nusselt sayısının boru boyunca değişimi (tüm Reynolds sayıları) (a) $\phi_p = \%0,5$ (b) $\phi_p = \%1$

Şekil 47'nin devamı



Şekil 47'nin devamı

Şekil 48. Ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = 0.5$, (b) $\phi_p = 1$ ($B = 700$ G)

Manyetik alan etkisinin daha net bir şekilde ortaya konulabilmesi amacıyla, öncelikle referans mıknatıs düzenlemeleri olan M1a ve M2a'nın (Şekil 31 ve 32) akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri incelenmiş, ardından mıknatıs konumlarındaki özgün düzenlemelerin (M1b, M1c, M2b, M2c) ısı transferi üzerindeki rolü araştırılmıştır. Ferroakışkana manyetik alan uygulandığında, özellikle manyetik alanın doğrudan etkilediği bölgelerde Nusselt sayılarında belirgin artışlar meydana geldiği manyetik alanın uygulanmadığı bölgelerde ise bu iyileşmenin kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir. İncelenen farklı uygulamalar arasında önemli ısı transfer farkları gözlenmiş, bu farkların kaynağını ve altta yatan fiziksel mekanizmaları açıklayabilmek için öncelikli olarak M1a ve M2a referans sistemleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 14. Değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayılarındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%0,5$)

Re	B=0	M1a	M1b	M1c	M2a	M2b	M2c
400	3,65	14,62	16,63	16,26	24,37	25,79	22,96
500	3,92	10,65	15,10	14,27	21,89	23,84	21,27
600	4,03	10,38	14,08	13,46	19,14	20,93	14,89
700	3,95	9,59	10,69	11,51	18,75	20,13	13,90
800	4,02	9,68	11,11	10,31	18,56	20,09	14,26
900	4,14	8,92	10,85	10,44	17,91	18,36	13,34
1000	4,23	8,70	9,76	10,19	15,95	17,35	12,62

Tablo 15. Değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayılarındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%1$)

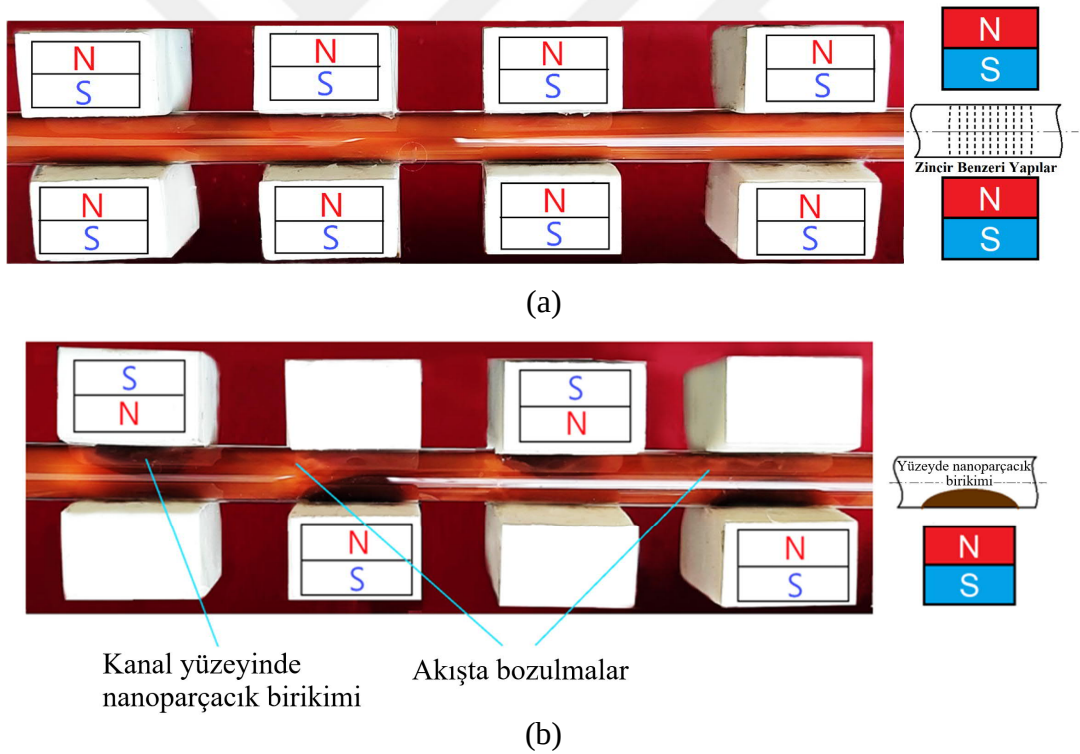
Re	B=0	M1a	M1b	M1c	M2a	M2b	M2c
400	6,33	19,81	26,96	26,37	36,57	43,07	34,17
500	6,66	20,23	24,27	23,77	32,65	39,55	28,95
600	6,88	18,33	23,92	22,96	31,78	38,40	26,32
700	6,87	18,29	23,42	22,27	29,80	35,47	21,40
800	7,05	17,47	21,20	20,40	30,43	34,06	23,75
900	7,33	15,70	20,10	18,86	28,94	33,41	21,70
1000	7,09	15,56	18,26	16,53	27,29	28,75	21,66

M1a ve M2a referans sistemleri daha önce de belirtildiği üzere mıknatısların sırasıyla karşılıklı ve kaydırılmış olarak konumlandırıldığı uygulamalardır. Mıknatıs konumlarının ısı transferi üzerindeki etkilerini daha sistematik bir şekilde değerlendirebilmek adına, manyetik alan altındaki tüm uygulamalar öncelikle belirli bir Reynolds sayısı ve nanoparçacık hacim oranı (ϕ_p) çerçevesinde ele alınmış; bu parametrelerin değişiminin ısı transferine etkileri kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır. Bu bağlamda, manyetik alanın etkisini en belirgin şekilde gözlemleyebilmek amacıyla $Re = 400$ ve $\phi_p = \%1$ koşulları dikkate alınmıştır.

Referans sistemler (M1a ve M2a) için ortalama 700 Gauss manyetik alan uygulanmış olmasına rağmen, Şekil 47 ve Şekil 48’te de görüldüğü üzere, M2a sisteminde manyetik alan bölgesinde daha yüksek Nusselt sayıları elde edilmiştir. M1a sisteminde yerel ve ortalama Nusselt sayılarında sırasıyla %41,6 ve %19,81 oranında iyileşme sağlanırken, aynı koşullar altında M2a sisteminde bu oranlar sırasıyla %94,59 ve %36,57 olarak belirlenmiştir. Referans sistemler arasındaki bu farklar, temel olarak manyetik alan gradyanının

nanoparçacıklar üzerindeki etkisi ile ısı transfer bölgesindeki manyetik alan dağılımı arasındaki ilişki üzerinden açıklanmaktadır.

Manyetik alan etkisiyle ısı taşınım katsayılarında gözlemlenen belirgin artışlar, ferroakışkan içerisindeki nanoparçacıkların manyetik alana karşı gösterdiği özgün tepkiler ve bu tepkilere bağlı olarak akış yapısında meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır. Bu tepkilerin detaylı bir şekilde incelenebilmesi amacıyla, akış hattına ısı transfer borusu ile aynı çapa sahip, ince cidarlı şeffaf bir cam tüp yerleştirilmiş ve M1a ve M2a'ya benzer iki manyetik düzenleme kurulmuş ve nanoparçacık hareketleri $Re = 1000$ için gözlemlenmiştir. Şekil 49'da farklı manyetik alan uygulamaları için yüksek çözünürlüğe sahip kamera ile çekilen fotoğraflar sunulmuştur. Ferroakışkanların opak yapısı, bu tür iç akış yapılarının doğrudan görselleştirilmesini zorlaştırır da, görüntüler incelendiğinde, M1a ve M2a'da farklı nanoparçacık davranışlarının ve akış yapılarının oluştuğu açıkça görülmektedir.



Şekil 49. Nanoparçacık hareketinin görselleri, (a) M1a (düşük gradyanlı manyetik alan uygulaması), (b) M2a (yüksek gradyanlı manyetik alan uygulaması)

Mıknatısların karşılıklı (M1a) veya kaydırılmış (M2a) olarak konumlandırılması, manyetik alan gradyanı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Şekil 35). M1a sisteminde, Şekil 49'dan da görüldüğü üzere, mıknatıs kutuplarının karşılıklı konumlandırılması sonucu

üniform bir manyetik alan üretilmekte ve bu durumda nanoparçacıklar manyetik alan çizgileri boyunca hizalanarak zincir benzeri yapılar oluşturmaktadır. Ayrıca, bu yapılar düşük Reynolds sayılarında akışta hafif bozulmalar meydana getirerek taşınım ısı transferini iyileştirmektedir. Reynolds sayısının artması sonucu hidrodinamik kuvvetlerin etkisiyle zincir benzeri yapılar bozulmaya başlamaktadır. Şekil 49'dan da görüldüğü üzere $Re=1000$ için zincir benzeri yapılar net olarak izlenememekte ancak daha önceki bölümde $Re=400$ için çekilmiş fotoğraflar (Şekil 40a) incelendiğinde bu yapılar daha net görülebilmektedirler.

M2a sisteminde ise, kaydırılmış mıknatıs yerleşimleri nedeniyle akışta yüksek bir manyetik alan gradyanı oluşmakta ve bu gradyan akışa dik yönde bir manyetik kuvvet doğurmaktadır (Şekil 35). Manyetik kuvvet nanoparçacıklar üzerinde etkili olmakta ve nanoparçacıkların kanal cidarına doğru çekilmesini sağlamaktadır. Şekil 49'da görülen koyu bölgeler nanoparçacıkların mıknatısa yakın olan yüzeyde biriktiğini ortaya koymaktadır. Bu birikim nedeniyle akışkan içerisindeki çalkantılar artmakta ve ısı transfer süreci üniform manyetik alana göre daha çok iyileşmektedir.

Bu çalışmada referans sistemlerden (M1a, M2a) farklı olarak düzenlenen özgün değişken yönlü mıknatıs sistemleri (M1b, M1c, M2b ve M2c) üzerinde akış ve ısı transferi için detaylı incelemeler aşağıda sunulmuştur:

M1b, M1c, M2b ve M2c değişken yönlü mıknatıs düzenlemelerinde, mıknatısların 45° veya 90° döndürülmesiyle nanoparçacıkların sebep olduğu davranışlar daha belirgin hale gelmektedir. Bu düzenlemelerde manyetik nanoparçacıklar yalnızca tek bir doğrusal yönde değil, değişen manyetik kuvvet yönü ile periyodik olarak farklı yönlere yönlendirilmektedir. Nanoparçacıkların yüzeyde birikme, kopma, sürüklenme gibi davranışlarının akış içerisinde geniş bir alana yayılmasıyla ısı iletim ve taşınım mekanizmaları daha karmaşık hale gelmektedir.

Mıknatısların akış yönünde periyodik olarak 45° döndürüldüğü M2b düzenlemesinde, tüm Reynolds sayıları ve nanoparçacık hacim oranlarında en yüksek ısı transfer değerlerine ulaşılmıştır. Özellikle $Re = 400$ ve $\phi_p = \%1$ için, yerel ve ortalama Nusselt sayılarında sırasıyla $\%140,55$ ve $\%43,07$ oranında bir artış sağlanmış ve böylece ısı transfer performansında dikkate değer bir iyileşme elde edilmiştir. M2b sistemindeki bu iyileşme, boru yüzeyindeki periyodik nanoparçacık birikimleri ile açıklanmaktadır. Nanoparçacıkların bu periyodik birikimleri ve sonrasında görülen kopma ve sürüklenme gibi davranışları akışta yeni karışmalara yol açarak ısı transferini daha çok iyileştirmektedir. Ancak, mıknatısların

periyodik olarak 90° döndürüldüğü M2c konumunda, beklenmedik bir şekilde M2a (0°) ve M2b (45°) düzenlemelerine göre daha düşük bir ısı transfer performansı elde edilmiştir. Bu performans düşüşünün manyetik kuvvetin yön ve doğrultusundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Nanoparçacık davranışlarının ortaya çıkma ve bozulma süreçleri dikkate alındığında manyetik kuvvetin yönündeki değişimin etkisi önemlidir. Manyetik kuvvet M2a'da aynı doğrultuda-zıt yönde etkili olurken, M2b ve M2c'de doğrultu ve yönler sürekli değişmektedir. Bu değişim M2c'de daha fazladır. Bu durumda mıknatıs konumlarındaki küçük açısal değişimlerin nanoparçacık davranışlarının birbiri ardınca oluşmasında etkili olduğu, ancak açısal değişimin artmasıyla M2c'de M2b'ye göre bu davranışların daha geç gerçekleştiği söylenebilir. M2b ve M2c konumları arasındaki gözlemlenen performans farkı, mıknatıs konumlarındaki küçük açısal değişimlerin (M2b'de olduğu gibi) ısı transferini iyileştirmede önemli bir rol oynadığını göstermektedir ve bu sonuç, çalışmanın temel bulgularından birisidir.

M1b ve M1c sistemlerinde ise karşılıklı mıknatısların periyodik olarak döndürülmesinin ısı transferini önemli ölçüde artırmadığı görülmektedir. Bu durum M1 sistemlerinde mıknatıs konumlarının karşılıklı olması ve üniform manyetik alan gradyanı üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Böylece nanoparçacıklar zincir benzeri yapılar oluşturmakta ve mıknatıslar karşılıklı olarak açısal yönde döndürüldüğünde zincir benzeri yapılar da boru yüzeyine dik kalacak şekilde dönmektedir. Bu durum M1a, M1b ve M1c sistemlerinde benzer performanslar elde edilmesine yol açmıştır. M1 sistemlerinde gözlemlenen bu sonuç çalışmanın bir diğer önemli bulgusudur ve özellikle düşük nanoparçacık hacim oranında ($\phi_p = 0,5$) mıknatısları döndürmenin ısı transfer performansını artırmadığını ortaya koymaktadır.

3.2.2. Reynolds Sayısının Isı Transferine Etkisi

Farklı mıknatıs sistemleri için 400 ile 1000 değerleri arasında değişen Reynolds sayılarında deneyler yapılmış ve elde edilen yerel ve ortalama Nusselt sayıları Şekil 47 ve Şekil 48' te verilmişti. Bu şekiller birlikte incelendiğinde, ferroakışkan üzerine herhangi bir manyetik alan uygulanmadığı ($B = 0$) durum için yerel ve ortalama Nusselt sayılarının saf suya göre daha yüksek olduğu ve artan Reynolds sayısı ile da sürekli artış gösterdiği görülmektedir.

Manyetik alan uygulandığında ise Reynolds sayısı ile ısı transferi artışı arasındaki ilişki daha karmaşık hale gelmektedir. Örneğin, M1a, M1b ve M1c sistemlerinde, Nusselt sayıları genel olarak Reynolds sayısı ile artmasına rağmen, manyetik etkinin neden olduğu ısı transferi artışı Reynolds sayısı yükseldikçe azalmaktadır. M1 sistemlerinde ısı transferi artışının ana mekanizması zayıf zincir benzeri yapıların oluşumu olduğundan, yüksek Reynolds sayılarında hidrodinamik kuvvetler manyetik alan etkisini baskılamakta ve dolayısıyla ısı transferindeki artış eğilimi azalmaktadır. Tablo 14 ve Tablo 15'te farklı mıknatıs konumlarında elde edilen ortalama Nusselt sayısının saf suya göre yüzde artış değerleri, sırasıyla $\phi_p = 0,5$ ve $\phi_p = 1$ hacim oranlarındaki ferroakışkanlar için sunulmuştur. Yüksek Reynolds sayılarında ısı transferindeki artışta ortaya çıkan azalma eğilimi bu tablolardan net bir şekilde görülmektedir. Örneğin Reynolds sayısının artmasıyla, M1c sisteminde $\phi_p = 1$ nanoparçacık hacim oranı için, ortalama Nusselt sayısındaki ısı transferi artışı %26,37'den %16,53'e düşmektedir. M1a ve M1b sistemlerinde de benzer azalmalar gözlemlenmektedir. Buna karşın, M2a ve M2b sistemlerinde Reynolds sayısının artışına daha dinamik ve değişken bir durum gözlemlenmektedir. Tablo 14 ve 15, Reynolds sayısı arttıkça manyetik alana bağlı ortalama Nusselt sayısındaki artış oranlarının düştüğünü ortaya koymaktadır. Ancak, yerel Nusselt sayıları incelendiğinde, Şekil 47'de görüldüğü üzere, manyetik alan bölgesi içerisinde ani ve yüksek artışlar da göze çarpmaktadır. Örneğin, M2b durumu için manyetik alan bölgesinde %135'e varan oranlarda artışlar görülmektedir. Bu artışlar, M2b durumundaki yüksek manyetik alan gradyanına bağlı nanoparçacık birikimi ve çalkantı hareketlerinin etkisiyle akış içerisinde ısı iletimi ve taşınımının artması nedeniyledir.

3.2.3. Nanoparçacık Hacim Oranının Isı Transferine Etkisi

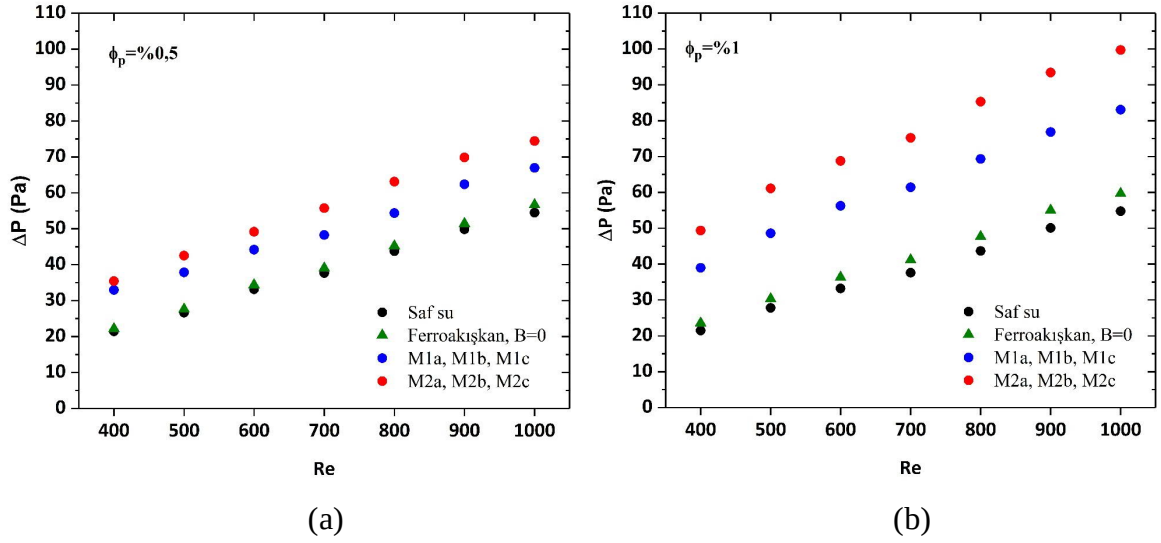
Daha önce ifade edildiği üzere, ferroakışkanların nanoparçacık hacim oranı, manyetikleşme potansiyelini belirleyen kritik bir parametredir. Bu çalışmada, hacim oranının etkisini inceleyebilmek için değişken yönlü sabit manyetik alan altında yapılan tüm deneyler $\phi_p = 0,5$ ve $\phi_p = 1$ nanoparçacık hacim oranlarına sahip ferroakışkanlar ile gerçekleştirilmiştir. Nanoparçacık hacim oranının değişmesi ferroakışkanların manyetik alan etkisi altındaki davranışlarını değiştirmekte ve bu durum, akış ve ısı transferini önemli ölçüde etkilemektedir.

Daha önce yapılan yorumlarda, M2b miknatıs konumu altında en belirgin ısı transferi artışlarının gözlemlendiği %1 hacim oranına ait sonuçlara odaklanılmıştır. Bu bağlamda Şekil 47 incelendiğinde, $\phi_p = \%0,5$ nanoparçacık hacim oranı için, tüm manyetik alan uygulamalarında önemli ısı transferi iyileşmelerinin sağlandığı ve bu hacim oranında manyetik alanın etkinliğinin devam ettiği görülmektedir. Bununla birlikte, $\phi_p = \%1$ ve $\phi_p = \%0,5$ arasındaki ısı transferi oranları karşılaştırıldığında, %0,5 hacim oranı ile elde edilen iyileşmelerin daha düşük olduğu açıkça gözlemlenmektedir. Nanoparçacık hacim oranı azalmasıyla ferroakışkan manyetik alandan daha az etkilenmekte ve ısı transfer performansında düşüş gözlemlenmektedir. Örneğin, $Re = 400$ ve M1a sisteminde, nanoparçacık hacim oranı %1'den %0,5'e düştüğünde yerel ve ortalama Nusselt sayılarındaki maksimum artışlar sırasıyla %41,6 ve %19,81'den %24,94 ve %14,62'ye düşmektedir.

Nanoparçacık hacim oranının azalmasına karşın, M2a, M2b ve M2c sistemleri (özellikle M2b sistemi) üstün ısı transfer performanslarını sürdürmektedirler. Bu durum yüksek manyetik alan gradyanından dolayı oluşan manyetik çekim kuvvetinin düşük nanoparçacık hacim oranında da ısı transferini önemli ölçüde artırdığının bir göstergesidir.

3.2.4. Basınç Düşümü ve Termal Etkinlik Analizleri

Isı transferinde elde edilen iyileşme, ısı transfer bölgesi boyunca basınç düşümünde ortaya çıkan artış ile ilişkilidir. Bu bağlamda, değişken yönlü manyetik alan etkisi altında test bölgesinin giriş ve çıkışı arasındaki basınç düşüşü her deney için ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 50a ve 50b' de sırasıyla, $\phi_p = \%1$ ve %0,5 nanoparçacık hacim oranları için sunulmuştur. Ayrıca şekillerde değişken yönlü manyetik alan uygulamaları ile birlikte saf su ve ferroakışkan ($B=0$) için ölçülen basınç düşümleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. İncelenen tüm uygulamalarda Reynolds sayısının artmasıyla basınç düşümü lineer bir artış eğilimi göstermektedir.



Şekil 50. Basınç düşümünün Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \%0,5$, (b) $\phi_p = \%1$ ($B=700G$)

Şekil 50 incelendiğinde, tüm uygulamalarda akış hızının artmasıyla birlikte sürtünme kayıplarındaki artış nedeniyle basınç düşümünde de tutarlı bir artış gözlemlenmektedir. Saf su ve ferroakışkan ($B = 0$) arasındaki farkları belirgin bir şekilde ortaya koymaktadır. Manyetik alanın yokluğunda, saf su ve ferroakışkan arasında benzer viskozite değerlerine karşın bu fark, nanoparçacık-cidar etkileşimleri, nanoparçacık birikimi, dağılımı ve çarpışmaları gibi bir dizi faktörden kaynaklanmaktadır. Bu durum, enerji kayıplarına ve basınç farkında artışa yol açmaktadır. Özellikle yüksek Reynolds sayılarında, nanoparçacık etkileşimlerinin yoğunlaşması nedeniyle bu fark belirgin hale gelmekte, düşük nanoparçacık hacim oranlarında ($\phi_p = \%0,5$) ise önemsiz olmaktadır.

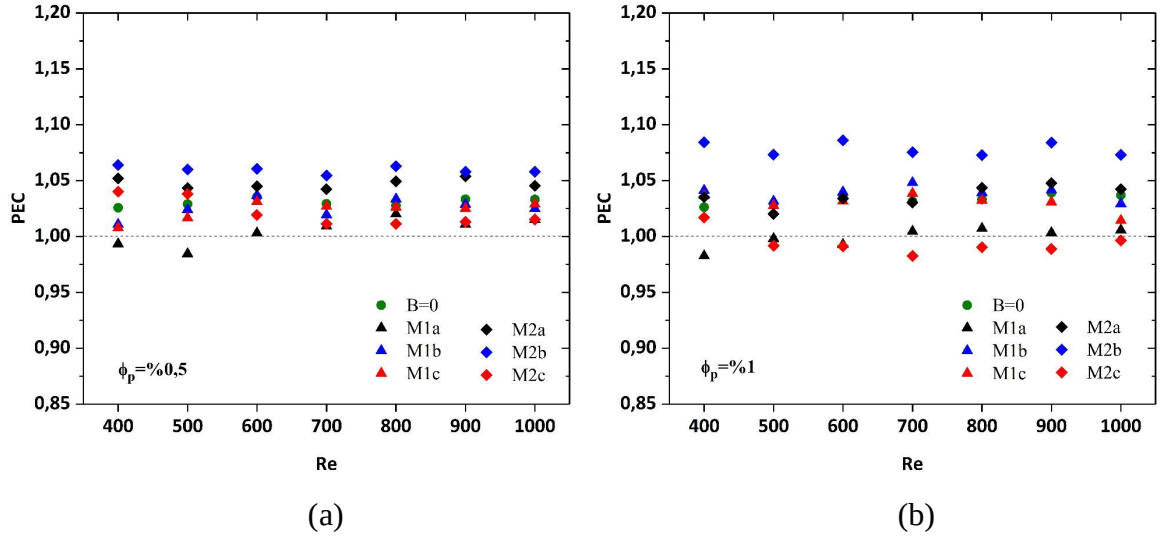
Şekiller ayrıca, manyetik alanın basınç farkı üzerindeki önemli etkisini de göstermektedir. Manyetik nanoparçacıklar üzerinde oluşan manyetik kuvvetler, akış düzenini önemli ölçüde değiştirerek, manyetik kaynağın yakınındaki cidarda girdap oluşumlarına neden olmaktadır. Bu bölgelerde akışkanın viskozitesi önemli ölçüde artmaktadır. Bu birleşik etkiler test bölgesindeki basınç düşümünde artış olarak kendini göstermektedir. Örneğin, $Re = 400$ ve $\phi_p = \%1$ için, M1a sisteminde basınç düşümü 24 Pa'dan 39 Pa'a, M2a sisteminde ise 50 Pa'a yükselmektedir. M1a ve M2a arasındaki bu fark, M2a sisteminde yüksek manyetik kuvvet ve dolayısıyla yüksek manyetik alan gradyanı nedeniyledir. M2a sisteminde akış içerisinde yüksek çalkantılar oluşmakta ve manyetik kaynağın bulunduğu cidarlarda nanoparçacık kümeleşmesinden dolayı ferroakışkanın viskozitesi artmaktadır. Viskozite artışı, akışın gerçekleştiği kanalda basınç düşümünü ve

akış için gerekli pompa gücünü artırmaktadır (Elçioğlu vd. 2014). Bu durum, daha önce belirtildiği üzere ısı transfer katsayılarında yüksek artışlara neden olurken aynı zamanda yüksek basınç düşümlerine de neden olmaktadır.

Ayrıca, ısı transferi oranları üzerindeki önemli etkilerine rağmen, M1b-M1c ve M2b-M2c sistemlerindeki mıknatısların (periyodik döndürülmesi), basınç düşümünde ölçülebilir bir değişiklik yaratmamış ve referans sistemlerle (M1a ve M2a) benzer basınç farkları gözlemlenmiştir. M1b ve M1c sistemlerinde mıknatısların döndürülmesiyle zincir benzeri yapıların da dönmesi söz konusu olmakta ancak basınç düşümünde gözlemlenebilir bir etki oluşmamaktadır. M2b ve M2c sistemlerinde de yüksek manyetik alan gradyanının oluşturduğu nanoparçacık birikimi ve girdaplar basınç düşümünde benzer sonuçlara yol açmış, ancak basınç düşümleri M1 sistemlerine göre artmıştır. Aynı zamanda M2 sistemlerinde mıknatısların yerleşim bölgesinin M1 sistemlerine göre daha uzun olması da bu durum üzerinde etkilidir.

Her bir mıknatıs sistemi için gözlemlenen ısı transferi artışı ve basınç düşüşü arasındaki karmaşık etkileşim göz önünde bulundurulduğunda, Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) daha kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır. Bu kriter, ısı transferindeki iyileşmenin sürtünme faktöründeki artışa oranı olarak hesaplanmakta olup ((16) numaralı denklem), her bir sistemin ısıl performansını değerlendirme imkanı sağlamaktadır. Tüm mıknatıs konumları için PEC değerleri Şekil 51'de sunulmuş olup, 1'in altındaki değerler, ısı transferindeki iyileşmenin yüksek basınç kayıplarıyla elde edildiği durumları göstermektedir. Aksine, 1'den büyük PEC değerleri, düşük basınç kayıpları ile birlikte artan ısı transfer oranlarını yansıtmaktadır.

PEC değerleri incelendiğinde, en yüksek değerlerin M2b-45° mıknatıs sisteminde elde edildiği ve bu değerlerin M2a referans sistemi için elde edilen PEC değerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. M2b konumunun üstün termal performansı, araştırılan tüm Reynolds sayıları ve nanoparçacık hacim oranları için tutarlılık göstermektedir. Ancak, ferroakışkanın %1 nanoparçacık hacim oranında yapılan deneylerde, M2c-90° mıknatıs sisteminin PEC değerleri, genellikle 1'in altında kalmaktadır.



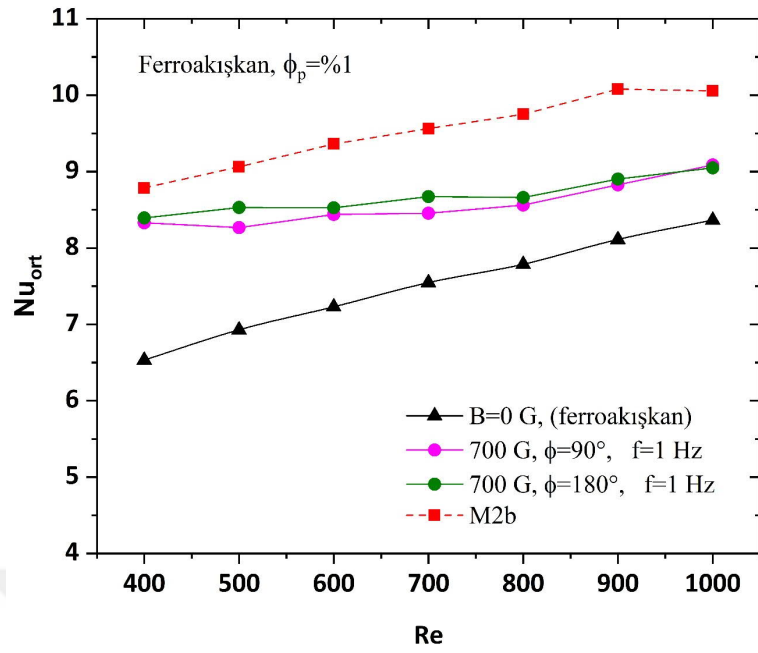
Şekil 51. Termal iyileşme oranlarının Reynolds sayısı ile değişimi (a) $\phi_p = \%0,5$, (b) $\phi_p = \%1$ ($B = 700G$)

3.3. Faz Açılı ve Değişken Yönlü Manyetik Alan Uygulamalarının Karşılaştırılması

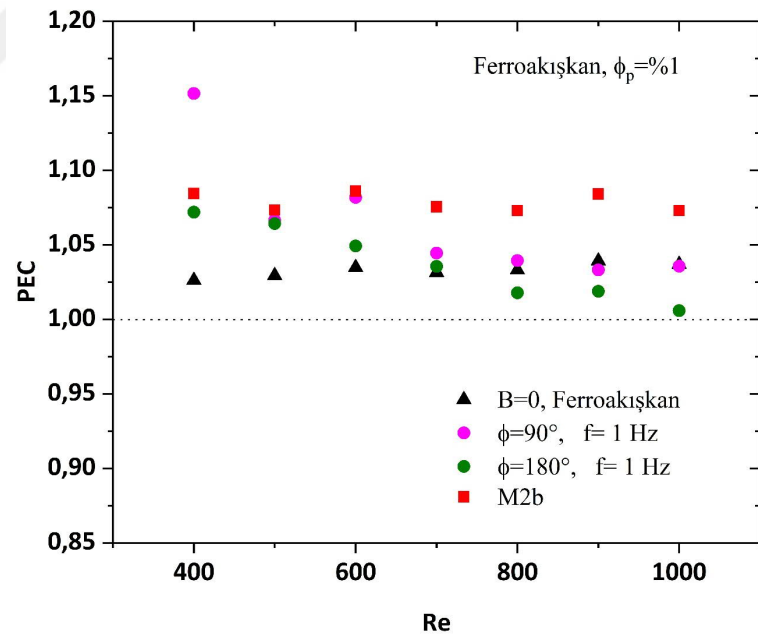
Tez kapsamında, ferroakışkanların zorlanmış taşınım ile ısı transfer performanslarının farklı manyetik parametreler altında iyileştirilmesine yönelik olarak faz açılı ve değişken yönlü manyetik alan uygulamaları önerilmiş ve bu uygulamalardan elde edilen sonuçlar önceki bölümlerde iki ayrı başlık altında sunulmuştu. Bu bölümde ise bu özgün uygulamalardan elde edilen sonuçlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, tüm parametreler için en yüksek ısı transfer performansının $\phi_p = \%1$ 'lik hacim oranlı ferroakışkan kullanılarak elde edildiği tespit edilmiş, bu nedenle ilgili karşılaştırma $\phi_p = \%1$ üzerinden yapılmıştır. Manyetik parametreler değerlendirildiğinde ise, faz açılı manyetik alan altında en yüksek performansın $\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ uygulamalarıyla ($f=1$ Hz), değişken yönlü manyetik alan altında ise kaydırılmış mıknatıs düzeninde M2b-45° sistemiyle elde edildiği tespit edilmiş ve karşılaştırmalar için bu parametreler seçilmiştir. Bu doğrultuda, ısı transfer performansı açısından en iyi sonuçları veren bu uygulamalar için karşılaştırmalı olarak ortalama Nusselt sayıları ve Performans Değerlendirme Kriterleri (PEC) sırasıyla, Şekil 52 ve Şekil 53'te sunulmuştur.

Ayrıca, ortalama Nusselt sayılarının saf suya göre yüzdesel artışları ise Tablo 16'da verilmiştir.



Şekil 52. Faz açılı ve değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırılması



Şekil 53. Faz açılı ve değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için PEC değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 16. Faz açılı ve değişken yönlü manyetik alan uygulamaları için saf suya göre ortalama Nusselt sayısındaki % artış oranları ($\eta_{Nu_{ort}}$) (Ferroakışkan, $\phi_p = \%1$, $f = 1$ Hz)

Re	B=0	M2b	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 180^\circ$
400	6,33	43,07	35,63	36,65
500	6,66	39,55	27,26	31,34
600	6,88	38,40	24,76	26,04
700	6,87	35,47	19,74	22,84
800	7,05	34,06	17,72	19,08
900	7,33	33,41	16,82	17,82
1000	7,09	28,75	16,35	15,87

Ortalama Nusselt sayıları değerlendirildiğinde, tüm Reynolds sayılarında en yüksek değerlerin, (M2b) sisteminde elde edildiği görülmektedir. Bu durum, M2b sisteminde mıknatıs ekseninin kaydırılması ve mıknatısların periyodik olarak 45° açıyla döndürülmesi nedeniyle, yüksek gradyanlı manyetik alanın akışa sürekli olarak uygulanması ve termal gelişme bölgesinde güçlü girdap oluşumuna katkı sağlanması ile açıklanabilir.

Ayrıca, M2b kaydırılmış mıknatıs düzeninde manyetik alan uygulanan bölge sayısı 4'ten 8'e çıkmaktadır. Buna karşın, faz açılı manyetik alanlar üzerine yapılan çalışmada bu sayı 4 ile sınırlı kalmaktadır. Değişken yönlü manyetik alan uygulamalarında faz açılı manyetik alan uygulamalarına göre daha yüksek taşınım katsayılarının elde edilmesinde, bu bölge sayısındaki artışın da önemli bir rol oynadığı ifade edilmelidir.

Bununla birlikte, manyetik alanın uygulama bölge sayısının yarı yarıya düşük olmasına rağmen, $\phi = 90^\circ$ ve 180° faz açılı manyetik alan uygulamaları B=0 durumuna göre, Tablo 16'da da görüldüğü üzere, ortalama Nusselt sayılarında %36'ya varan artışlar sağlamıştır. Bu durum, ilgili bölümlerde de belirtildiği gibi, $\phi = 90^\circ$ ve 180° uygulamalarında mıknatısların periyodik olarak zıt yönlerden devreye girmesi ve buna bağlı olarak manyetik kuvvetin zamanla yön değiştirmesiyle ilişkilidir. Böylece nanoparçacıkların boru içerisinde bir taraftan diğerine taşınması nedeniyle akış içerisinde önemli düzeyde çalkantılar oluşmakta ve yüksek oranlarda ısı transfer iyileşmeleri elde edilmektedir.

Şekil 53'teki PEC değerleri incelendiğinde ise, en yüksek PEC değerinin Re = 400 durumunda ve $\phi = 90^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulamasıyla elde edildiği görülmektedir. Reynolds sayısının 500 ve 600 değerleri için ise özgün yaklaşımların benzer sonuçlar verdiği dikkat çekmektedir. Bu sonuçlar, özellikle düşük Reynolds sayılarında $\phi = 90^\circ$ ve 180° faz açılı manyetik alan uygulamalarının termal performans açısından etkinliğini ortaya koymaktadır. Yüksek Reynolds sayılarında M2b uygulaması ile daha yüksek PEC

değerlerine ulaşılması, manyetik alanın 8 farklı bölgeden uygulanması ve bu sayede akış içerisinde manyetik kuvvet kaynaklı kümelenme, çalkantı gibi oluşumların, ısı taşınımını iyileştirmesi ile ilişkilendirilmektedir.

Buraya kadar yapılan incelemelerde manyetik alanın iki özgün uygulaması sonucu elde edilen bulgular ısıl etkinlik açısından irdelenmiştir. Aslında tez kapsamında gerçekleştirilen bu özgün uygulamalar arasında bir karşılaştırma yapabilmek için, faz açılı manyetik alan uygulamasındaki manyetik alan bölge sayısının 8'e yükseltilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Böylece daha doğru bir karşılaştırma olanağı söz konusu olacaktır. Yine de şimdiki değerlendirmeler manyetik alan etkilerinin referans uygulamalarla karşılaştırılması açısından önem taşımaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken asıl önemli nokta, faz açılı ve değişken yönlü sabit manyetik alan uygulamalarının her biri için özgün yaklaşımların geliştirilmesi ve bu yaklaşımların ısı transferini iyileştirmede olumlu sonuçlar vermesidir.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, farklı Fe_3O_4 yüzde hacim oranlarına sahip su bazlı ferroakışkanın dairesel kesitli boru içindeki laminar zorlanmış taşınım ile ısı transferi, farklı manyetik ve hidrodinamik parametreler eşliğinde deneysel olarak incelenmiştir. Manyetik alan uygulamalarının akış ve ısı transferine etkileri çalışmadan elde edilen genel sonuçlar olarak aşağıda sunulmuştur. Manyetik alan etkisi; faz açılı manyetik alan ve değişken yönlü manyetik alan şeklinde iki farklı durumda ele alınmış ve elde edilen sonuçlar bu başlıklar altında detaylandırılmıştır. Ayrıca genelleştirilmiş sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

Genel sonuçlar:

- Manyetik alan zorlanmış taşınım ile ısı transferini önemli ölçüde etkilemektedir. Manyetik alanın uygulandığı bölgede bu etki en yüksek seviyelere ulaşmaktadır.
- En yüksek ortalama Nusselt sayıları manyetik alanın akışın termal gelişme bölgesine uygulanmasıyla, en düşük ortalama Nusselt sayıları ise test borusunun çıkış bölgesine uygulanmasıyla elde edilmiştir.
- Manyetik alan uygulamasıyla ortalama Nusselt sayısında görülen iyileşme Reynolds sayısı arttıkça azalmaktadır. Isı transferinde görülen en yüksek artışlar düşük Reynolds sayılarında elde edilmiştir.
- Tüm durumlar için azalan nanoparçacık hacim oranıyla ortalama Nusselt sayıları düşme eğilimi göstermektedir.
- Tüm parametrelere ait deneylerde Reynolds sayısının artmasıyla basınç düşümü lineere yakın bir artış göstermiştir.
- Tüm manyetik alan uygulamalarında, manyetik alanın uygulanmadığı ($B=0$) duruma göre, test bölgesi boyunca daha yüksek basınç düşüşleri elde edilmiştir.
- $\phi_p = \%1$ ferroakışkan hacim oranında $\%0,5$ 'e kıyasla daha yüksek basınç değerleri gözlenmiştir.
- Saf su yerine ısı transfer akışkanı olarak $\%1$ nanoparçacık hacim oranına sahip ferroakışkan kullanılmasıyla elde edilen ortalama Nusselt sayıları, manyetik alan uygulanmadığı ($B=0$) duruma göre, yaklaşık $\%6$ oranında; $\%0,5$ nanoparçacık hacim oranına sahip ferroakışkan için ise yaklaşık $\%3$ oranında artmaktadır.

Faz açılı manyetik alan uygulanması:

- $\phi = 90^\circ$ ve $\phi = 180^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulamaları referans manyetik alan uygulamasına ($\phi = 0^\circ$) göre, manyetik alan uygulanan bölgelerde nanoparçacık kümelenmelerine ve akış çalkantısına sebep olmuştur.
- Manyetik alanın tez kapsamında önerilen özgün şekliyle (faz açılı, $\phi = 90^\circ$ ve 180°) uygulanması durumunda yerel ve ortalama değerler sırasıyla %73 ve %36'ya kadar yükselmiştir ($\phi_p = \%1$, $Re=400$).
- Frekans değerinin 1 Hz'den 5 Hz'ye yükselmesi, akış ortamında nanoparçacıkların etkileşim süresini kısaltarak ısı transferi performansını düşürmektedir.
- Nanoparçacık hacim oranının azalmasıyla birlikte, $\phi = 90^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulamasında, ısı transfer oranlarında en önemli azalmalar, $\phi = 180^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulamasında en yüksek artışlar görülmektedir.
- Isı transfer bölgesi boyunca en düşük basınç düşümü $\phi = 0^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulanmasında ölçülmüştür.
- En yüksek basınç düşümü değerleri, en yüksek Nusselt sayılarının elde edildiği $f=1\text{Hz}$, $\phi = 90^\circ$ ve $f=1\text{Hz}$, $\phi = 180^\circ$ faz açılı manyetik alan uygulamalarında ölçülmüştür.
- Manyetik alan frekansı basınç düşümü üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir.
- En yüksek PEC değerleri, $\phi_p = \%1$ ve $\phi_p = \%0,5$ nanoparçacık hacim oranları için sırasıyla; $\phi = 90^\circ$, $f=1\text{Hz}$ ve $\phi = 180^\circ$, $f=1\text{Hz}$ faz açılı manyetik alan uygulamalarında elde edilmiştir.

Değişken yönlü manyetik alan uygulaması:

- Yüksek manyetik alan gradyanının olduğu kaydırılmış mıknatıs düzenlemelerinde (M2a, M2b ve M2c) ısı transferi önemli ölçüde iyileşirken, uniform manyetik alan gradyanının olduğu karşılıklı mıknatıs düzenlemelerinde (M1a, M1b ve M1c) ısı transferindeki iyileşme daha azdır.
- Değişken yönlü mıknatıs düzenlemeleri, M1a ve M2a referans sistemlerine göre, ısı transferinin iyileştirilmesi açısından daha iyi bir performans sergilemiştir. M2b-45° mıknatıs konumu, $Re = 400$ ve $\phi_p = \%1$ için yerel Nusselt sayılarında %140,55'e kadar, ortalama Nusselt sayılarında ise %43,07 oranında en yüksek iyileşmeyi sağlamıştır.
- M1b ve M1c sistemlerinde ise mıknatısların periyodik olarak döndürülmesinin ısı transfer oranlarını önemli ölçüde artırmadığı belirlenmiştir.

- Nanoparçacık hacim oranının azalmasına rağmen, M2 sistemleri, (özellikle M2b), M1 sistemlerine göre çok daha iyi ısı transferi performansı sergilemektedir.
- M2 mıknatıs sistemlerinde M1 mıknatıs sistemlerine göre daha yüksek basınç düşümleri elde edilmiştir. M1b ve M1c ile M2b ve M2c sistemleri, referans sistemler (M1a ve M2a) ile karşılaştırıldığında basınç düşümünde gözlenebilir bir artış olmadan ısı transferinin iyileştiği görülmektedir.
- Performans Değerlendirme Kriteri (PEC) değerleri, tüm Reynolds sayıları ve nanoparçacık hacim oranları için en yüksek değerlerin elde edildiği M2b mıknatıs sisteminin üstün performansını ortaya çıkarmıştır. Bunun aksine, benzer basınç düşümleri elde edilmesine rağmen M2c mıknatıs sistemi en düşük performans değerlerinin elde edildiği sistem olmuştur.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların ışığında ileride yapılacak araştırmalara katkı sağlayacak öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Faz açılı manyetik alan değişken yönlerde uygulanarak manyetik alanın yönünün akış ve ısı transferine etkisi araştırılabilir.
- Dairesel kesitli kanal üzerine yapılan bu çalışmaya ek olarak düzlemsel kanal geometrisi, gözenekli veya çukur kanatçıklı boru için de manyetik alan parametrelerinin etkisi araştırılabilir.
- Tüm akış ve manyetik alan parametreleri için türbülanslı akışta akış ve ısı transferi incelenebilir.
- Faz açısı etkisiyle birlikte optimum mıknatıs sayısının araştırılması konuyla ilgili optimizasyon çalışmalarına katkı sağlayabilir.
- Farklı hacim oranlarına sahip ferroakışkanlar için araştırma yapılabilir.
- Dairesel kesitli boru içine türbülötörler yerleştirilerek manyetik alan etkisi altında akış ve ısı transferi incelenebilir.
- Değişken yönlü sabit manyetik alan uygulaması farklı mıknatıs konum ve yönleri ile birlikte incelenebilir, optimum mıknatıs sayısı ve yönünün araştırılması konuyla ilgili optimizasyon çalışmalarına katkı sağlayabilir.
- Fe_3O_4 nanoparçacıkların haricinde farklı nanoparçacıklardan oluşan hibrit nanoakışkanlar üzerinde bir termal performans araştırması yapılabilir.
- ANSYS FLUENT, COMSOL gibi paket programlarında manyetik alan modellenerek sayısal incelemeler yapılabilir, deneysel olarak belirlenmesi zor akış ve ısı transferi konularına destek ve açıklık getirilebilir.
- Isı alıcılı bir sistemde ya da güneş enerjisi gibi farklı uygulama alanlarında da ferroakışkanın etkisi araştırılabilir.
- Farklı dalga formlarına sahip (kare, üçgen, sinüs vb.) manyetik alanların sürece etkisi incelenebilir.
- Parametre sayısı genişletilerek bir yapay sinir ağı modeli yardımıyla ferroakışkanın termofiziksel özelliklerine dair korelasyonlar elde edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abadeh, A., Passandideh-Fard, M., Maghrebi, M. J., & Mohammadi, M. (2019). Stability and magnetization of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{water}$ nanofluid preparation characteristics using Taguchi method, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135, 1323–1334.
- Abadeh, A., Sardarabadi, M., Abedi, M., Pourramezan, M., Passandideh-Fard, M. & Maghrebi, M. J. (2020). Experimental characterization of magnetic field effects on heat transfer coefficient and pressure drop for a ferrofluid flow in a circular tube, *Journal of Molecular Liquids*, 299 112206.
- Abbas, K., Wang, X., Rasool, G., Sun, T., Yin, G. & Razzaq, I. (2023). Recent developments in the application of ferrofluids with an emphasis on thermal performance and energy harvesting, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 587 171311.
- Adogbeji, V. O., Sharifpur, M., & Meyer, J. P. (2024). Experimental investigation of heat transfer enhancement, thermal efficiency, and pressure drop in forced convection of magnetic hybrid nanofluid ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$) under varied magnetic field strengths and waveforms, *Case Studies in Thermal Engineering*, 63 105313.
- Alsaady, M., Fu, R., Li, B., Boukhanouf, R., & Yan, Y. (2015). Thermo-physical properties and thermo-magnetic convection of ferrofluid, *Applied Thermal Engineering*, 88, 14-21.
- 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 MWCNT– $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{water}$ hybrid nanofluid in a heated tube, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137:1809–1825.
- Altun, A. (2020). Yüzey Aktif Maddelerin Nanoakışkanların Termal Özellikleri ve Isı Transferi Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Altunay, F. M., Pazarlıoğlu, H. K., Gürdal, M., Tekir, M., Arslan, K., & Gedik, E. (2022). Thermal performance of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{water}$ nanofluid flow in a newly designed dimpled tube under the influence of non-uniform magnetic field, *International Journal of Thermal Sciences*, 179 107651.
- Amani, M., Ameri, M., & Kasaeian, A. (2018). Hydrothermal assessment of ferrofluids in a metal foam tube under lowfrequency magnetic field, *International Journal of Thermal Sciences*, 127, 242–251.
- Angayarkanni, S.A., & Philip, J. (2015). Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments, *Advances in Colloid and Interface Science*, 225, 146–176.
- Asfer, M., Mehta, B., Kumar, A., Khandekar, S., & Panigrahi, P. K. (2016). Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer characteristics of ferrofluid

flowing through a circular stainless steel tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 59, 74–86.

- 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 Mass Transfer*, 51, 953–964.
- Azizian, R., Doroodchi, E., McKrell, T., Buongiorno, J., Hu, L. W., & Moghtaderi, B. (2014). Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer of magnetite nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68, 94–109.
- Bahiraei, M., & Hangi, M. (2015). Flow and heat transfer characteristics of magnetic nanofluids: A review, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 125–138.
- Bakthavatchalam, B., Habib, K., Saidur, R., Saha, B. B., & Irshad, K. (2020). Comprehensive study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement: a review on current and future perspective, *J. Mol. Liquids*, 305.
- Bali, T., & Sarac, B. A. (2014). Experimental investigation of decaying swirl flow through a circular pipe for binary combination of vortex generators, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 53, 174–179.
- Bonab, M. H. D., Shafii, M. B., & Nobakhti, M. H. (2015). Experimental and numerical investigation of fully developed forced convection of water-based Fe_3O_4 nanofluid passing through a tube in the presence of an alternating magnetic field, *Advances in Mechanical Engineering*, 1–9.
- Brinkman, H.C. (1952). The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions, *J. Chem. Phys.* 20 571–571. <https://doi.org/10.1063/1.1700493>.
- Buschmann, M. H. (2020). Critical review of heat transfer experiments in ferrohydrodynamic pipe flow utilising ferronanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 157 106426.
- Cheng, L., & Kai, L. (2021). Study of Ferrofluid and Magnetic Fields, Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Singapore, March, 7-11.
- Cherief, W., Avenas, Y., Ferrouillat, S., Lebouc, A.K., Jossic, L., & Petit, M. (2017). Parameters affecting forced convection enhancement in ferrofluid cooling systems, *Applied Thermal Engineering*, 123, 156–166.
- Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, *Energy Technology Division and Materials Science Division Argonne National Laboratory*, Argonne, IL 60439.
- Çoğan, M. (2021). Cu-Su Nanoakışkanlı Çarpan Jet Kullanılarak Kısmen Elastik ve Eliptik Bir Yüzeyin Manyetik Alan Etkisi Altında Soğutulması, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa.

- Dağdevir, T. (2020). Nanoakışkan Kullanarak ve İç Eleman Yerleştirilmiş Düz Yatay Boruda Isı Transferinin Taguchi Yöntemi Yardımıyla Araştırılması, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.
- Dey, D., Kumar, P., & Samantaray, S. (2017). A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties, *Heat Transfer Asian Res.*, 46, 1413–1442.
- Dhumal, J., Bandgar, S., Zipare, K., & Shahane, G. (2015). Fe₃O₄ Ferrofluid Nanoparticles: Synthesis and Rheological Behavior, *Int. J. Mater. Chem. Phys.*, 1 141–145.
- Dibaei, M. H., & Kargarsharifabad, H. (2017). New achievements in Fe₃O₄ nanofluid fully developed forced convection heat transfer under the effect of a magnetic field: an experimental study, *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, 4, 1-11.
- Dinarvand, M., Abolhasani, M., Hormozi, F., & Bahrami, Z. (2023). Experimental investigation and performance comparison of Fe₃O₄/water and CoFe₂O₄/ water ferrofluids in presence of a magnetic field in a cooling system, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 148, 104927.
- Duangthongsuk, W., & Wongwises, S. (2009). Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33 (4), 706-714.
- Ebaid, S. Y. M., Ghrair, A. M., & Al-busoul, M. (2022). Investigation of heat transfer enhancement using ferro-nanofluids (Fe₃O₄/water) in a heated pipe under the application of magnetic field, *Advances in Mechanical Engineering*, *Advances in Mechanical Engineering*, 14 6, 1–17.
- Elçioğlu, E. B., Yazıcıoğlu, A. G., & Kakaç, S. (2014). Nanoakışkan Viskozitesinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, *J. of Thermal Science and Technology*, 34, 1, 137-151, 2014.
- Eslahchi, A., Nobakhti, M. H., Shafii, M. B., & Bonab, M. H. D. (2021). Experimental evaluation of forced convective heat transfer of Fe₃O₄ ferrofluid in a horizontal u-shaped tube under variable magnetic field effect based on Taguchi approach, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43:208.
- Esmaili, E., Chaydareh, R. G., & Rounaghi, S. A. (2017). The influence of the alternating magnetic field on the convective heat transfer properties of Fe₃O₄-containing nanofluids through the Neel and Brownian mechanisms, *Applied Thermal Engineering*, 110, 1212–1219.
- Fadaei, F., Shahrokhi, M., Dehkordi, A. M., & Abbasi, Z. (2017). Heat Transfer Enhancement of Fe₃O₄ Ferrofluids in the Presence of Magnetic Field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 304-8853 32470-2.
- Gao, D., Bai, M., Hu, C., Lv, J., Wang, C., & Zhang, X. (2020). Investigating control of convective heat transfer and flow resistance of Fe₃O₄/deionized water nanofluid in magnetic field in laminar flow, *Nanotechnology*, 495402.

- 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.
- Ghadiri, M., Haghan, O., Emam-jomeh, E., & Barati, E. (2021). Experimental investigation on laminar convective heat transfer of nano ferrofluids under constant and alternating magnetic field, *AUT J. Mech. Eng.*, 5 3 477-494.
- 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.
- Goharkhah, M., Ashjaee, M., & Jamali, J. (2015). Experimental investigation on heat transfer and hydrodynamic behavior of magnetite nanofluid flow in a channel with recognition of the best models for transport properties, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 582–592.
- Goharkhah, M., Ashjaee, M., & Shahabadi, M. (2016). Experimental investigation on convective heat transfer and hydrodynamic characteristics of magnetite nanofluid under the influence of an alternating magnetic field, *International Journal of Thermal Sciences*, 99, 113-124.
- Goharkhah, M., Salariana, 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.
- Goharshadi, E. K., Ahmadzadeh, H., Samiee, S., & Hadadian, M. (2013). Nanofluids for heat transfer enhancement-a review, *Phys. Chem. Res.*, 1 1, 1-33.
- Guzei, D., Minakov, A., Pryazhnikov, M., & Meshkov, K. (2017). Investigating the forced convection of magnetic nanofluids, *MATEC Web of Conferences*, 115, 07001.
- Güden, F. (2013). Ferrosıvı Nanoparçacıkların Magnetik Yakalama Metodu ile Depolanması ve Karakterizasyonu, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fizik ve Fizik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Kilis.
- Gürdal, M. (2022). Çukur Kanatçıklı Kanal İçindeki Nanoakışkan Akışına Etkiyen Manyetik Alanın Isı Transferi ve Akış Karakteristiği Üzerine Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Karabük.
- Gürdal, M., Pazarlıoğlu, H. K., Tekir, M., Arslan, K., & Gedik, E. (2022). Numerical investigation on turbulent flow and heat transfer characteristics of ferro-nanofluid flowing in dimpled tube under magnetic field effect, *Applied Thermal Engineering*, 200 117655.
- Gürdal, M., Gürsoy, E., Pazarlıoğlu, H. K., Arslan, K., & Gedik, E. (2023). An innovative approach of alternating magnetic field diversified with different wave types and magnet positions for ferrofluid flow in dimpled tube, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 581 170975.

- Gürsoy, E., Gürdal, M., Pazarlıoğlu, H. K., Dagdeviren, A., Tekir, M., Arslan, K., Gedik, E., Minea, A. A., & Kurt, H. (2023). Effect of magnetic field locations on thermo-magnetic convection performance of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{H}_2\text{O}$ ferrofluid flowing in a novel dimpled tube: An experimental study, *Applied Thermal Engineering*, 226, 120305.
- Hangi, M., & Bahiraei, M. (2019). A two-phase simulation for ferrofluid flow between two parallel plates under localized magnetic field by applying Lagrangian approach for nanoparticles, *European Journal of Mechanics / B Fluids*, 74, 252–259.
- Harandi, S. S., Karimipour, A., Afrand, M., Akbari, M., & D'Orazio, A. (2016). *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 171–177.
- Hosseinzadeh, M., Heris, S. Z., Beheshti, A., & Shanbedi, M. (2016). Convective heat transfer and friction factor of aqueous Fe_3O_4 nanofluid flow under laminar regime, *J Therm Anal Calorim*, 124, 827–838.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley New York, 1996. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.022>.
- Ilyas, S. U., Pendyala, R., & Marneni, N. (2017). Stability of nanofluids. In *Engineering Applications of Nanotechnology*, Springer, Cham, 1-31.
- Kalsi, S., Kumar, S., Kumar, A., Alam, T., & Dobrota, D. (2023). Thermophysical properties of nanofluids and their potential applications in heat transfer enhancement: A review, *Arabian Journal of Chemistry*, 16 105272.
- Kamyabi, M., & Hosseini, S. M. S. (2024). Magnetic field effects on the thermal performance of Fe_3O_4 nanofluids in a forced convection system, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 8853 00928-4.
- 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.
- Khairul, M. A., Doroodchi, E., Azizian, R., & Moghtaderi, B. (2017). Thermal performance analysis of tunable magnetite nanofluids for an energy system, *Applied Thermal Engineering*, 126 822–833.
- Kline, S. J., & McClintock, F. A. (1953). Describing Uncertainties In Single-Sample Experiments, *Mech Eng*, 75, 3–8.
- Lajvardi, M., Rad, J. M., 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, 3508–3513.
- Li, Q., Xuan, Y., & Wang, J. (2005). Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30, 109–116.

- Li, Q., & Xuan, Y. (2009). Experimental investigation on heat transfer characteristics of magnetic fluid flow around a fine wire under the influence of an external magnetic field, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 591–596.
- Manay, E., Sahin, B., Mandev, E., Ates, I., & Yetim, T. (2016), Determination of Thermophysical Properties of Water Based Magnetic Nanofluids, World Academy of Science, Engineering and Technology *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, 10 8, 2.
- Manay, E. (2014). Mikrokanallarda Nanoakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü Karakteristiklerinin Araştırılması, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Maxwell, J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism, Cambridge University, Cambridge, 1881.
- Mehrez, Z., & Cafsi, A. E. (2021). Heat exchange enhancement of ferrofluid flow into rectangular channel in the presence of a magnetic field, *Applied Mathematics and Computation*, 391 125634.
- Mulka, R., Bëben, G., Zajączkowski, B., & Buschmann, M. H. (2024). Magnetic field impact on ferronanofluid laminar flow, *International Journal of Thermal Sciences*, 203 109108.
- Mulka, R., Bëben, G., Zajączkowski, B., & Buschmann, M. H. (2024). Magnetic field influence on heat transfer in inclined laminar ferronanofluid flow, *International Journal of Thermal Sciences*, 205 109 312.
- Omiddezyani, S., Yousefi-Asli, V., Houshfar, E., Gharehkhani, S., Ashjaee, M., & Khazaei, I. (2021). On-demand heat transfer augmentation using magnetically triggered ferrofluid containing eco-friendly treated $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{rGO}$, *Powder Technology*, 378 468–486.
- Özbaldan, R. (2017). Manyetik Nanoakışkanların Sentezlenmesi ve Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi, Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Rasaee, S., Shahsavar, A., & Niazi, K. (2021). Experimental assessment on convection heat transfer characteristics of aqueous magnetite ferrofluid in a rifled tube under a rotating magnetic field, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 129 105673.
- Sadeghinezhad, E., Mehrali, M., Akhiani, A. R., Latibari, S. T., Pirouz, A. D., Metselaar, H. S. C., & Mehrali, M. (2017). Experimental study on heat transfer augmentation of graphene based ferrofluids in presence of magnetic field, *Applied Thermal Engineering*, 114, 415–427.
- Sahin, B., Comaklı, K., Comaklı, O., & Yılmaz, M. (2006). Nanoakışkanlarla ısı transferinin iyileştirilmesi, *Mühendis ve Makina*, 47 559, 29-34.

- Sarac, B. A., & Bali, T., (2007). An experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of decaying swirl flow through a circular pipe with a vortex generator, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32 (1), 158-165.
- Selim, M. M., El-Safty, S., Tounsi, A., & Shenashen, M. (2023). Review of the impact of the external magnetic field on the characteristics of magnetic nanofluids, *Alexandria Engineering Journal*, 76, 75–89.
- 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.
- Shafii, M. B., & Keshavarz, M. (2018). Experimental study of internal forced convection of ferrofluid flow in nonmagnetizable/ magnetizable porous media, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 96, 441–450.
- Shahsavari, 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.
- Shahsavari, A., Askari, I. B., Ghodrati, M., Arıcı, M., Nižetić, S., Rehman, T., & Ma, Z. (2023). Experimental investigation of the effect of mechanical vibration and rotating magnetic field on the hydrothermal performance of water- Fe_3O_4 ferrofluid inside a rifled tube, *J. Magn. Magn. Mater.*, 572 170586.
- Sheikhnejad, Y., Hosseini, R., & Avval, M. S. (2017). Experimental study on heat transfer enhancement of laminar ferrofluid flow in horizontal tube partially filled porous media under fixed parallel magnet bars, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 424, 16–25.
- Shyam, S., Mehta, B., Mondal, P. K., & Wongwises, S. (2019). Investigation into the thermo-hydrodynamics of ferrofluid flow under the influence of constant and alternating magnetic field by InfraRed Thermography, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135, 1233–1247.
- 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.
- Soltanipour, H., (2021). Numerical analysis of two-phase ferrofluid forced convection in an annulus subjected to magnetic sources, *Appl. Therm. Eng.*, 196 117278.
- 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.
- Sun, C., Geng, Y., Glowacz, A., Sulowicz, M., Ma, Z., Siarry, P., Gupta, M. K., & Li, Z. (2023). The heat transfer and fluid flow characteristics of water/ Fe_3O_4 ferrofluid flow in a tube with V-cut twisted tape turbulator under the magnetic field effect, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 586 171128.

- Sundar, L. S., Naik, M. T., Sharma, K. V., Singh, M. K., & Reddy, T. C. S. (2012). Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe_3O_4 magnetic nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 37, 65–71.
- Şahin, F., & Namlı, L. (2018). Nanoakışkanlarda Kararlılığın Isı Transferini İyileştirme Açısından Önemi, *Öhü Müh. Bilim. Derg. / Ohu J. Eng. Sci.*, 7, 880-898.
- Şahin, F., & Namlı, L. (2023). Experimental investigation of heat transfer characteristics of magnetic nanofluids (MNFs) under a specially designed revolving magnetic field effect, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 580 170961.
- 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., Taskesen, E., Aksu, B., Gedik, E., & Arslan, K. (2020). Comparison of bi-directional multi-wave alternating magnetic field effect on ferromagnetic nanofluid flow in a circular pipe under laminar flow conditions, *Applied Thermal Engineering*, 179 115624.
- Tetuko A. P., Simbolon, S., Sitorus, T.G., Zurcher, R., Hadi, R. K., Setiadi, E. A., Kurniawan, C., Ginting, M., & Sebayang, P. (2020). The effect of magnetic nanofluids (Fe_3O_4) on the heat transfer enhancement in a pipe with laminar flow, *Heat and Mass Transfer*, 56:65–74.
- Valitabar, M., Rahimi, M., & Azimi, N. (2020). Experimental investigation on forced convection heat transfer of ferrofluid between two-parallel plates, *Heat and Mass Transfer*, 56, 53–64.
- Valizadeh, M. , Ranjbar, A. K., & Sedighi, K. (2024). Experimental investigation of the hydro-thermal efficiency of the non-Newtonian ferrofluid in the annulus heat tube under the influence of the non-uniform magnetic fields, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 162 105568.
- 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, J., Li, G., Zhu, H., Luo J., & Sundén, B. (2019). Experimental investigation on convective heat transfer of ferrofluids inside a pipe under various magnet orientations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, 407–419.
- Wang, C., Rong, D., Zhang, W., Gong, B., & Wu, J. (2023). The flow and heat transfer performances of magnetic nanofluid in a duct in presence of magnetic fields with different direction, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37 9.
- Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 21 58–64.

- 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.
- Yu, W., & Xie, X. (2011). A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications, *Journal of Nanomaterials*, 17.
- Zabek, D., Grzebielec, A., Cmok, L., Boštjancić, P. H., & Mertelj, A. (2021). Experimental analysis of the stability of ferrofluids based on Iron Oxide powder, *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*, 2 1-6.
- Zhai, X., Qi, C., Yang, Y., & Wang, J. (2021). Thermo-hydraulic performance of nanofluids under adjustable magnetic field, *Applied Thermal Engineering*, 186 116491.
- 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.
- 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.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Esra YAĞCI, 2008 yılında Meram Konya (YDA) Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2013 yılında bu bölümden mezun oldu. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2016 yılında "İç Akışta Manyetik Alan Etkisi" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından 2017 yılında doktora eğitimine başladı. 2014 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. İngilizce bilmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir. Doktora tezi kapsamında yayınlanan makale ve bildiri çalışmaları aşağıda sunulmaktadır.

- Yagci, E., Yagci, O. K., Bali, T., Aydin, O., (2024). Laminar Flow and Convective Heat Transfer of Ferrofluid in a Tube Under Oscillating Magnetic Fields: Effect of Magnetic Phase Shift. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 159 111-293.
- Yagci, E., Yagci, O. K., Bali, T., Aydin, O., (2024). Laminar Flow and Heat Transfer of Magnetic Nanofluid in a Cylindrical Tube Under Constant Magnetic Fields, 18th International Nanoscience and Nanotechnology Conference, İstanbul, Türkiye, 26 - 28 Ağustos 2024, sa.14, ss.58.
- Yagci, E., Bali, T., Aydin, O., (2023). Manyetik Alan Etkisi Altında Silindirik Bir Boru İçindeki Ferroakışkanın Laminer Akış Ve Isı Geçişi, Uluslararası Katılımlı 24. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK'23), Ankara, Türkiye, 6 - 08 Eylül 2023, cilt.1, sa.340, ss.375-385.