



**DÜZ VE PÜRÜZLÜ YÜZEYLERE SAHİP ANİ  
GENİŞLEYEN KANAL İÇERİSİNDEKİ FERRO-  
NANOAKIŞKAN AKIŞININ MANYETİK ALAN  
ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL  
VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Emrehan GÜRSOY**

**2024  
DOKTORA TEZİ  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Engin GEDİK**

**DÜZ VE PÜRÜZLÜ YÜZEYLERE SAHİP ANİ GENİŞLEYEN KANAL  
İÇERİSİNDEKİ FERRO-NANOAKIŞKAN AKIŞININ MANYETİK ALAN  
ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK  
İNCELENMESİ**

**Emrehan GÜRİSOY**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Engin GEDİK**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2024**

Emrehan GÜRSOY tarafından hazırlanan “DÜZ VE PÜRÜZLÜ YÜZEYLERE SAHİP ANİ GENİŞLEYEN KANAL İÇERİSİNDEKİ FERRO-NANOAKIŞKAN AKIŞININ MANYETİK ALAN ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Engin GEDİK .....  
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 26/06/2024

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Adnan TOPUZ (BEÜN)	.....
Üye : Prof. Dr. Kamil ARSLAN (KBÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Alper ERGÜN (KBÜ)	.....
Üye : Doç. Dr. Hüseyin KAYA (BARÜ)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Emrehan GÜRSOY

## ÖZET

Doktora Tezi

### DÜZ VE PÜRÜZLÜ YÜZEYLERE SAHİP ANİ GENİŞLEYEN KANAL İÇERİSİNDEKİ FERRO-NANOAKIŞKAN AKIŞININ MANYETİK ALAN ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Emrehan GÜRSOY

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Engin GEDİK

Haziran 2024, 108 sayfa

Bu çalışmada, pasif ve aktif ısı transfer iyileştirme teknikleri kullanılarak ani genişleyen dairesel kesitli kanaldaki taşınım ile olan ısı transferinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, pasif ısı transfer iyileştirme yöntemi olarak pürüzlü yüzey (dairesel çukur kanat) ile ferro-nanoakışkan- $Fe_3O_4/H_2O$  (FNA) uygulamaları, aktif ısı transfer iyileştirme yöntemi olarak ise sabit manyetik alan (DC) uygulamaları tatbik edilmiştir. Uygulanan tekniklere ait parametreler birden fazla değişken göz önüne alınarak başlangıçta sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizlerde üç farklı giriş kanal dairesel kesiti ( $D_1=8, 10$  ve  $14$  mm), üç farklı çukur kanat çapı ( $d=3, 5$  ve  $7$  mm), üç farklı çukur kanat adım oranı ( $P/d=5,0, 3,0$  ve  $2,14$ ), üç farklı FNA hacimsel konsantrasyonu ( $\varphi=0,0, 1,0$  ve  $2,0$ ) ve altı farklı DC manyetik alan şiddeti ( $B=0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,3$  ve  $0,5T$ ) analiz edilmiştir.

Çalışmalar laminer akış şartlarında ( $Re=1000, 1500$  ve  $2000$ ) yürütülmüş ve akış geometrisinin çıkış kanalı üzerine  $q''=600 \text{ W/m}^2$  sabit ısı akısı uygulanmıştır. Yürütülen sayısal analizler neticesinde en yüksek Performans Değerlendirme Kriterini (PDK) sağlayan  $D_1, d, P/d$  ve  $\phi$  parametrelerinden yararlanılarak deney setinin kurulumu ve testleri yapılmıştır. Deneysel analizlerde sistemdeki ölçüm ekipmanlarının hata oranları dikkate alınmış ve belirsizlik analizi çerçevesinde süreçler yürütülmüştür.

Tatbik edilen sayısal analizlerde akışkanın sıkıştırılmaz ve Newtonyen akışkan olduğu kabul edilmiştir. Yapılan kabullere ve sınır şartlarına bağlı olarak süreklilik, momentum ve enerji genel yönetici denklemlerinin çözümlenmesi ANSYS Fluent 2020R2 programında gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen veriler ışığında  $D_1=14 \text{ mm}$ ,  $d= 7 \text{ mm}$ ,  $P/d=2,14$  ve  $\phi=\%2,0$  sistem parametrelerinin en yüksek PDK'yı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır ve deneysel sistem üzerindeki performansı da incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlardan B attıkça ortalama Nusselt sayısının ( $Nu$ ) arttığı belirlenmiştir. Ancak B'nin artırılması sonucunda ortalama sürtünme katsayısında ( $f$ ) meydana gelen kayda değer artışlar sistemin PDK'sını olumsuz etkilemiştir. Her iki analiz yönteminde de en yüksek PDK'nın  $B=0,3T$  şartında elde edildiği tespit edilmiştir. En yüksek PDK'nın sağlandığı parametrelerden elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında ortalama  $Nu$ , ortalama  $f$  ve PDK değerleri arasındaki farkların sırasıyla  $\%3,78$ ,  $\%0,65$  ve  $\%3,93$  oranlarında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca  $nu$  hata oranlarından yola çıkarak literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların birbirleri arasındaki farkların ya da herhangi bir korelasyon sonucuna göre elde edilen sonuçlar arasındaki farkların  $\%10$ 'dan düşük seviyede olması sonuçların iyi bir uyum sergilediğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada ulaşılan sonuçların da yüksek seviyede bir uyum sergilediği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Sözcükler :** Ani genişleyen kanal, dairesel çukur kanat, ferro-nanoakışkan, sabit manyetik alan, laminer akış, zorlanmış taşınım ile ısı transferi.

**Bilim Kodu :** 91412

## **ABSTRACT**

**Ph.D. Thesis**

### **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FERRO-NANOFLUID FLOW BEHAVIOR UNDER THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD IN THE SUDDEN EXPANSION TUBE WITH SMOOTH AND ROUGH SURFACES**

**Emrehan GÜRSOY**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Program**

**Department of Energy Systemes Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Engin GEDİK**

**June 2024, 108 pages**

In this study, it is aimed to improve the convective heat transfer in the sudden expansion tube with a circular cross-section by using passive and active heat transfer enhancement techniques. In this context, rough surface (circular dimpled fin) and ferro-nanofluid- $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{H}_2\text{O}$  (FF) applications were applied as the passive heat transfer enhancement method, and constant magnetic field (DC) was applied as the active heat transfer enhancement method. The parameters of the used techniques were initially investigated numerically by considering more than one variable. In the numerical analyses, three different inlet tube circular cross-sections ( $D_1=8, 10, \text{ and } 14 \text{ mm}$ ), three different dimpled fin diameters ( $d=3, 5 \text{ and } 7 \text{ mm}$ ), three different dimpled fin pitch ratios ( $P/d=5.0, 3.0 \text{ and } 2.14$ ), three different FF volume

concentrations ( $\phi=0.0\%$ ,  $1.0\%$ , and  $2.0\%$ ) and six different DC magnetic field strengths ( $B=0.01$ ,  $0.03$ ,  $0.05$ ,  $0.1$ ,  $0.3$  and  $0.5T$ ) were analyzed. The studies were carried out under laminar flow conditions ( $Re=1000$ ,  $1500$ , and  $2000$ ), and constant heat flux of  $q''=600\text{ W/m}^2$  was applied to the outlet tube of the flow geometry. As a result of the numerical analyses, the experimental set was installed and tested using the  $D1$ ,  $d$ ,  $P/d$ , and  $\phi$  parameters that provided the highest Performance Evaluation Criterion (PEC). In the experimental analyses, the error rates of the measurement equipment in the system were taken into account and the processes were carried out within the uncertainty analysis framework.

In the applied numerical analyses, the fluid was assumed to be incompressible and Newtonian. Depending on the assumptions and boundary conditions, the solution of the continuity, momentum, and energy governing equations was realized in the ANSYS Fluent 2020R2 program. In the light of the data obtained from the numerical analyses, it was concluded that the system parameters  $D1=14\text{ mm}$ ,  $d=7\text{ mm}$ ,  $P/d=2.14$ , and  $\phi=2.0\%$  provided the highest PEC, and the performance of the experimental system was also examined and a comparison was made. From the numerical and experimental results, as the  $B$  increased, the average Nusselt number ( $Nu$ ) was determined to be increased. However, the significant increases in the average friction factor ( $f$ ) as a result of increasing  $B$  negatively affected the PEC of the system. In both analysis methods, it was determined that the highest PEC was obtained under the condition of  $B=0.3T$ . When the numerical and experimental results obtained from the parameters where the highest PEC was provided were compared, it was determined that the differences between the average  $Nu$ , average  $f$ , and PEC values were  $3.78\%$ ,  $0.65\%$ , and  $3.93\%$ , respectively. In addition, comparisons were made with studies in the literature based on the error rates. When the studies in the literature are examined, it is revealed that the differences between the results obtained from experimental and numerical studies or the differences between the results obtained according to any correlation result are less than  $10\%$ , which shows that the results show good harmony. Therefore, it was concluded that the results obtained in this study also show a high level harmony.



**Key Words** : Sudden expansion tube, circular dimpled fin, ferrofluid, constant magnetic field, laminar flow, forced convection heat transfer.

**Science Code** : 91412

## TEŞEKKÜR

Hayatımın dönüm noktalarından birini teşkil eden bu çalışmanın ortaya çıkmasında bilgi, birikim ve deneyimlerinden tecrübe ettiğim, direktifleri ve yol göstericiliği ile çalışmamı bilimsel temeller ve hedefler kapsamına oturtmamı sağlayan kıymetli ve saygıdeğer hocam Prof. Dr. Engin GEDİK ile Tez İzleme Komitesinde yer alarak tecrübe ve bilgi birikimi aşıl原因 kıymetli hocalarım Prof. Dr. Kâmil ARSLAN ve Doç. Dr. Alper ERGÜN'e teşekkürü borç bilirim.

Diğer yandan saat ve vakit fark etmeksizin bir telefon uzağında olduğunu bilerek sürekli bilgi birikiminden ve akılcı yaklaşımlarından faydalandığım ve Doktora Eğitimim süresince birçok makalede birlikte çalıştığım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Mehmet GÜRDAL'a ve Stuttgart Üniversitesinde Araştırmacı olan sevgili dostum Hayati Kadir PAZARLIOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim. Sayısal analiz ve deney düzeneğinin kurulmaya başlanmasından itibaren maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Abdullah DAĞDEVİREN'e de çok teşekkür ederim.

Ayrıca bugünlere gelmemde büyük emek harcayan ve sabırları ile beni yetiştiren, büyüten sevgili annem Esma GÜRSOY'a, babam Mustafa GÜRSOY'a ve ablam Nagihan BAYARSLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Doktora Eğitimim süresinde her türlü konu hakkında bilgisine, tecrübesine başvurduğum ve aynı zamanda dertlerimi paylaşan eniştem Dr. Aydın BAYARSLAN bu tezin ortağıdır. Hazırladığım bu tez çalışmasını, Doktora Eğitimi süresinde gerek iş ve eğitim hayatının birlikteliğinden dolayı yaşadığım sıkıntıları atlatmamda en önemli pay sahiplerinden biri olan ve gelecekte bilim kadını olmak isteyen yeğenim Ada BAYARSLAN'a atfetmekteyim ve bu çalışmanın gelecekte kendisinin yapacağı bilimsel çalışmalara bir feyz oluşturması en büyük dualarımdan ve dileklerimden biridir.

Son olarak, bu doktora tez çalışması TÜBİTAK 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı ve Karabük Üniversitesi KBÜBAP-23-DR-044 no'lu Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK'a ve Karabük Üniversitesi'ne verdiği desteklerden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xviii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	6
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	6
2.1.    ANİ GENİŞLEMELİ DAİRESEL KESİTLİ KANAL ÇALIŞMALARI..	6
2.2.    ÇUKURLU KANAT YAPISI ÇALIŞMALARI .....	9
2.3.    NANOAKIŞKAN ÇALIŞMALARI .....	11
2.4.    MANYETOHİDRODİNAMİK (MHD) ÇALIŞMALARI .....	15
BÖLÜM 3 .....	20
MATERYAL VE METHOD .....	20
3.1. DENEYSEL YÖNTEM .....	21
3.1.1. Deney Düzenegi .....	22
3.1.1.1. Ana Ekipmanlar .....	23
Pompa.....	23
Plakalı Isı Değiştirici.....	23
Küresel Valf .....	23

	<b><u>Sayfa</u></b>
Plastik Türbin Debimetre .....	24
Dairesel Kesitli Giriş Kanalı .....	24
Çıkış Kanalı.....	25
DC Güç Kaynağı.....	25
Elektromıknatıs .....	25
Rezervuar .....	26
3.1.1.2. Veri Ölçüm ve Yardımcı Ekipmanlar .....	26
Debimetre Göstergesi.....	26
Fark Basınç Transmitteri ve Göstergesi.....	26
Isıtıcı Kablo.....	27
Ayar Kısıcıcı (Dimmer) .....	27
Wattmetre.....	27
Gaussmetre.....	27
Cam Yünü .....	27
Isıl Çiftler .....	28
Veri Kaydedicisi ve Dönüştürücüsü.....	29
3.1.2. Nanopartikül temini ve nanoakışkan üretimi .....	29
3.1.3. Deneysel Süreç .....	31
3.1.4. Deneysel Verilerin Analizi.....	34
3.1.5. Belirsizlik Analizi.....	39
3.2. SAYISAL YÖNTEM.....	40
3.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği .....	41
3.2.2. Geometri ve Ağ Yapısının Oluşturulması .....	43
3.2.3. Korunum Denklemleri ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	46
3.2.4. Sayısal Analiz Çözümlemesi.....	52
BÖLÜM 4.....	54
BULGULAR VE TARTIŞMA .....	54

	<u>Sayfa</u>
4.1. SAYISAL ÇALIŞMA BULGULARI .....	54
4.1.1. En Uygun Çözüm Ağının Doğrulaması.....	54
4.1.2. Çukur Kanat Yapısının Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi ....	55
4.1.3. Nanoakışkan Konsantrasyonunun Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi.....	61
4.1.4. Manyetik Alan Kuvvetinin Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi .....	66
4.1.5. Isı Transfer İyileştirme Yöntemlerinin Genel Sonuçları .....	70
4.2. DENEYSEL ÇALIŞMA BULGULARI .....	71
4.2.1. Nanoakışkan Konsantrasyonunun Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi.....	72
4.2.2. Manyetik Alan Kuvvetinin Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi .....	75
4.3. SAYISAL VE DENEYSEL ÇALIŞMA BULGULARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	78
BÖLÜM 5 .....	81
SONUÇLAR.....	81
KAYNAKLAR .....	85
EK AÇIKLAMALAR A.....	98
EK AÇIKLAMALAR B.....	101
EK AÇIKLAMALAR C.....	105
ÖZGEÇMİŞ .....	108

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1.	Nanopartikül 'den nanoakışkanlara olan gelişmelerin tarihsel süreçleri. ....	3
Şekil 3.1.	Sayısal ve deneysel analiz süreçlerinin akış şeması. ....	21
Şekil 3.2.	Deney düzeneğinin şematik akış şeması. ....	22
Şekil 3.3.	Deney düzeneğinin görüntüsü. ....	23
Şekil 3.4.	Dairesel kesitli giriş kanalının görüntüsü ve sisteme bağlantısı. ....	24
Şekil 3.5.	Dairesel kesitli çıkış kanalının görüntüsü ve sisteme bağlantısı. ....	25
Şekil 3.6.	Isıl çiftlerin bağlantısı. ....	28
Şekil 3.7.	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanopartiküllerine ait; (a) SEM ve (b) XRD görüntüleri. ....	29
Şekil 3.8.	FNF'deki çökeltme eğiliminin Çökeltme Fotoğraf Yöntemi ile belirlenmesi. ....	30
Şekil 3.9.	Deney sürecinde uygulanacak işlemlerin farklı akış rejimlerindeki kararlılık sürelerine ilişkin tespit çalışmaları; (a) çıkış sıcaklığının değişimi, (b) manyetik alanın uygulanması ve (c) deneysel uygulama adımları. ....	34
Şekil 3.10.	Dairesel kesitli kanalın şematik gösterimi. ....	35
Şekil 3.11.	HAD ile ilişkili olan bilim dalları [106]. ....	42
Şekil 3.12.	HAD işlem adımları. ....	43
Şekil 3.13.	Sayısal analiz akış geometrisi. ....	43
Şekil 3.14.	Çözüm ağı yakınsama işlemi; (a) Nu değişimi, (b) f değişimi. ....	45
Şekil 3.15.	Akış geometrisi çözüm ağı; (a) giriş, (b) çıkış, (c) çukur kanat, (d) çukur kanatlı dairesel kesitli kanal. ....	46
Şekil 3.16.	Sayısal analiz datasının 3B görünümü. ....	51
Şekil 4.1.	Sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması. ....	55
Şekil 4.2.	Çukur kanat geometrisinin Nu değeri üzerindeki etkisi; a) PK'daki ısı transfer ve akış karakteristiğinin etkileşimi, b) DK ve PK'daki lokal Nu'nun grafik olarak karşılaştırması, c) DK ve PK'daki lokal Nu'nun kontur yardımıyla karşılaştırması. ....	56
Şekil 4.3.	İçerisinden H <sub>2</sub> O akan DK ve P/d=5,0, 3,0 ve 2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'nın ortalama Nu ve f değerlerinin Re ile değişimi; a) GO=2,5 b) GO=2,0, c) GO=1,4. ....	59

- Şekil 4.4. İçerisinden H<sub>2</sub>O akan P/d=5,0, 3,0 ve 2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'nın PDK değerlerinin Re ile değişimi; a) GO=2,5 b) GO=2,0, c) GO=1,4.....61
- Şekil 4.5. Brownian hareketinin ısı transferine etki mekanizmasının şematik gösterimi.....62
- Şekil 4.6. İçerisinden H<sub>2</sub>O ile  $\phi$ =%1,0 ve %2,0 konsantrasyonlarında FNA akan P/d=2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'ya ait ortalama Nu ve f değerlerinin Re ile değişimi; a) GO=2,5 b) GO=2,0, c) GO=1,4.....64
- Şekil 4.7. İçerisinden H<sub>2</sub>O ile  $\phi$ =%1,0 ve %2,0 konsantrasyonlarında FNA akan P/d=2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'ya ait PDK değerlerinin Re ile değişimi; a) GO=2,5 b) GO=2,0, c) GO=1,4. ....66
- Şekil 4.8. Manyetiklenebilen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O FNA'daki magnetophoresis taşıma mekanizmasının temsili gösterimi.....67
- Şekil 4.9. İçerisinden  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonunda FNA akan GO=1,4 geometrisine ve P/d=2,14 çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanala uygulanan farklı büyüklüklerdeki DC manyetik alan şiddetinin ortalama Nu ve f üzerindeki etkisinin Re ile değişimi.....68
- Şekil 4.10. İçerisinden  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonunda FNA akan GO=1,4 geometrisine ve P/d=2,14 çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanala uygulanan farklı büyüklüklerdeki DC manyetik alan şiddetine ait PDK değerinin Re ile değişimi.....69
- Şekil 4.11. B=0,3T DC manyetik alan şiddetinin lokal Nu değeri üzerindeki etkisi. ....70
- Şekil 4.12. Isı transferi iyileştirme yöntemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması. ....71
- Şekil 4.13. İçerisinden H<sub>2</sub>O ile  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonundaki FNA akan GO=1,4 ve P/d=2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'ya ait ortalama Nu ve f değerlerinin Re ile değişimi. ....73
- Şekil 4.14. Farklı akış rejimine sahip  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonundaki FNA'nın GO=1,4 ve P/d=2,14 olan PK'daki lokal Nu değişimi.....74
- Şekil 4.15. İçerisinden H<sub>2</sub>O ile  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonundaki FNA akan GO=1,4 ve P/d=2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'ya ait PDK'nın Re ile değişimi. ....75
- Şekil 4.16. İçerisinden  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonunda FNA akan GO=1,4 geometrisine ve P/d=2,14 çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanala uygulanan farklı büyüklüklerdeki DC manyetik alan şiddetinin ortalama Nu ve f üzerindeki etkisinin Re ile değişimi. ....76
- Şekil 4.17. İçerisinden  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonunda FNA akan GO=1,4 geometrisine ve P/d=2,14 çukur kanat adım oranına sahip ani



	genişleyen dairesel kanala uygulanan farklı büyüklüklerdeki DC manyetik alan şiddetinin PDK üzerindeki etkisinin Re ile değişimi...77
Şekil 4.18.	İçerisinden $\phi=2,0\%$ konsantrasyonunda FNA akan $GO=1,4$ geometrisine ve $P/d=2,14$ çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanaldaki farklı akış rejim şartlarının PDK üzerindeki etkisinin DC manyetik alan şiddetinin ile değişimi.....78
Şekil 4.19.	Deneysel ve sayısal sonuçlardan elde edilen ortalama Nu ve f'lerin kıyaslanması. ....79
Şekil 4.20.	Deneysel ve sayısal sonuçlardan elde edilen PDK'ların kıyaslanması. ....80
Şekil 5.1.	Ani genişleyen dairesel kesitli kanallardaki ısı transfer performansını artırmaya yönelik uygulanabilecek çalışmalar. ....84
Şekil Ek A.1.	Temin edilen nanopartikülün teknik bilgileri. ....99
Şekil Ek A.2.	Temin edilen nanopartikülün ayrıntılı SEM ve XRD görüntüleri. ....100

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Ani genişlemeli geometrilerle ilgili yapılan çalışmalar.....	8
Çizelge 2.2. Çukurlu kanat yapısı ile ilgili yapılan çalışmalar. ....	10
Çizelge 2.3. Taşınım ile gerçekleşen ısı transferini iyileştirmek amacıyla yapılan nanoakışkan çalışmaları.....	13
Çizelge 2.4. Taşınım ile gerçekleşen ısı transferini iyileştirmek amacıyla yapılan nanoakışkanlara manyetik alan uygulama çalışmaları. ....	17
Çizelge 3.1. H <sub>2</sub> O ve Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanopartikülünün termofiziksel özellikleri [86].....	30
Çizelge 3.2. Ani genişleyen dairesel kesitli kanalda gerçekleştirilen deneyler ve değişkenleri.....	31
Çizelge 3.3. Ölçüm ekipmanları ve analitik değerlerin belirsizlikleri. ....	40
Çizelge 3.4. Sayısal analizde kullanılan sınır şartlar ve yapılan kabuller.....	52
Çizelge Ek B.1. Belirsizlik analizinin detaylı sonuçları. ....	102
Çizelge Ek C.1. Tez çalışması kapsamında yayımlanan çalışmalar. ....	106

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

a	: hassasiyet
A	: yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
B	: manyetik alan şiddeti (T)
d	: çukur kanat çapı (mm)
D	: çap (mm)
DC	: sabit akım (T)
f	: Darcy-Weisbach sürtünme faktörü
h	: ısı taşınım katsayısı (W/m <sup>2</sup> °C)
k	: ısı iletim katsayısı (W/m°C)
L	: kanal boyu (mm)
N	: gözlem sayısını
Nu	: Nusselt sayısı
P	: çukur kanat aralığı (mm)
P/d	: adım oranı
$\dot{Q}$	: ısı (W)
Re	: Reynolds sayısı
t	: akış kanalı kanal et kalınlığı (mm)
T	: sıcaklık (°C)
U	: belirsizlik
V	: hız (m/s)
$\dot{V}$	: hacimsel debi (lt/dk)
X <sub>m</sub>	: gözlemlerin aritmetik ortalamasını
X <sub>i</sub>	: yapılan gözlemleri
θ	: çapraz dağılım açısı
φ	: hacimsel konsantrasyon (%)
q"	: ısı akısı (W/m <sup>2</sup> )

$\sigma^2$  : varyans  
 $\sigma$  : standart sapma

### **Alt İndis**

ba : baz akışkan  
na : nanoakışkan  
np : nanopartikül  
r,  $\theta$ , z : silindirik koordinat sistemi eksenleri

### **KISALTMALAR**

DK : Düz Yüzeye Sahip Ani Genişleyen Kanal  
EHD : elektro hidrodinamik  
FNA : Ferronanoakışkan  
GO : Genişleme Oranı  
LES : Large Eddy Simulation  
MHD : Manyetik Hidrodinamik  
PDK : Performans Değerlendirme Katsayısı  
PK : Pürüzlü Düz Yüzeye Sahip Ani Genişleyen Kanal  
RANS : Reynolds Averaged Navier-Stokes

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

İnsanların refah düzeyinin bir göstergesi olan enerjinin önemi gelişen teknoloji ve sanayileşmenin yaygınlaşmasından dolayı gün geçtikçe artmaktadır. Ancak enerjinin elde edilebilmesi için faydalanılan kömür, doğal gaz, petrol vb. fosil yakıt gibi kaynakların azalması, çevrede ve küresel ölçekte neden olduğu etkiler ve ülkeler arasındaki politik nedenlerden dolayı önemini ve güvenilirliğini yitirmektedir. Enerji üretimi ve kullanımının neden olduğu bu etkilerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artması ve mevcut sistem performansının daha verimli hale getirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda son zamanlarda dikkate değer bir artış görülmektedir.

Enerji birçok formda ve farklı tanımlamalarla karşımıza çıkmaktadır. Bu formlardan birisi elektrik üretimi, sanayi sektörü ve konutlarda yoğun kullanımı olan ısı enerjisidir. Isı enerjisi sıcaklık farkından dolayı iki ısı kaynak arasında meydana gelmekte olup, iletim, taşınım ve ışınım olmak üzere üç farklı yöntem ile transfer edilebilen bir enerji türüdür. Termal sistemlerde ısının aktarımı için genel olarak ısı değiştiricilerden yararlanır. Isı değiştiriciler, iş akışkanı üzerinde gerçekleştirdiği etki ve kullanıldığı sektöre veya kullanıldığı ekipmana göre farklı terimler ile tanımlanmakta olup, genel olarak kondenser, evaporatör, radyatör, ısıtıcı, soğutucu, reboiler vb. terimler ile ifade edilmektedir. Bu ekipmanlardaki ısı transferi genellikle akışkanın pompa veya fan gibi harici bir güç yardımıyla akmaya zorladığı şartlar altında iç akış olarak gerçekleşmektedir.

Isı transferinin gerçekleştiği kesitler kullanım alanına göre daire, dikdörtgen, kare ve üçgen olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Isı transferinin gerçekleştiği ve özellikle ısı değiştiricilerinde kullanılan diğer bir kanal tipi ise ani genişlemeli dairesel kanal tipidir. Ani genişlemeli dairesel kanal sayesinde ısı değiştiricilerde meydana gelen

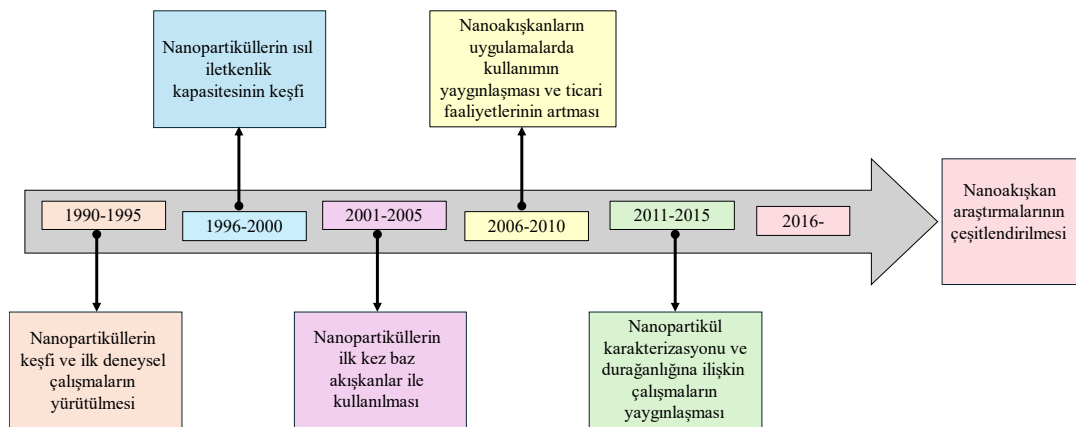
termal gerilmeler önlenmektedir [1]. Isı değiştiricilerin yanı sıra gaz türbini motorları, yakıcılar, serbest jetler, diğer ısıtma ve soğutma sistemleri gibi yerlerde de geniş kullanım alanına sahip ani genişlemeli dairesel kanal yapısı akış ayrılması ve yeniden birleşmenin yaşandığı bir geometridir. Ani genişleyen dairesel kanalda, taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin, yeniden birleşme noktası gibi bazı kritik noktalarda çok yüksek değerlere ulaşmasındaki fiziksel mekanizmanın irdelenmesi sistemlerin performansı açısından büyük önem arz etmektedir.

Zorlanmış taşınım ile gerçekleştirilen ısı transferinin iyileştirme yöntemleri ile ilgili literatürde birçok çalışma vardır. Bu yöntemler pasif ve aktif yöntemler olarak iki kategori altında toplanmış olup, Bergles tarafından on altı farklı teknik olarak detaylandırılmıştır [2]. Pasif ve aktif yöntemler arasındaki en temel fark pasif sistemin harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymamasıdır. Pasif teknikler genel olarak kanal, boru vb. yüzeyi ve geometrisindeki değişikliklere ya da kullanılan akışkanın termofiziksel özelliklerinin değiştirilmesine dayanır. Etkif ısı transfer yüzey alanına sahip genişletilmiş yüzeyler haricindeki pasif teknikler akış davranışını değiştirerek yüksek ısı transfer katsayısının elde edilmesini sağlar. Ancak bu durum basınç kaybının yükselmesine neden olur. Dolayısıyla pasif tekniklerin kullanıldığı sistemlerdeki amaç ısı transfer katsayısı artış oranının basınç kaybı artış oranından fazla olmasıdır. Aktif teknikler ise mekanik hareketler, manyetohidrodinamik (MHD) ve elektro hidrodinamik (EHD) gibi harici bir güç kaynağı gerektiren teknikleri içerir.

Uygulamada ve literatürde en çok karşılaşılan pasif tekniklerden biri kanatçıkların kullanıldığı genişletilmiş yüzey tekniğidir. Newton'un Soğutma Yasasında ısı transfer yüzey alanı gerçekleşen ısı transfer miktarı ile doğru orantılı olduğu için bu teknik sayesinde ısı transfer yüzey alanı ile ısı transferinde de artış gözlemlenmektedir. Literatür incelendiğinde dairesel kesitli kanal yüzeylerinde en fazla uygulaması yapılan kanatçık tiplerine dalgalı kanat, oluk kanat, çukur kanat, iç bükey şekilli kanat ve dış bükey şekilli kanat örnek olarak gösterebilir. Bu kanat yapıları ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda çukur kanat yapısının düşük basınç kaybına ve sınır katmanları harekete geçiren akış ayrımlarına neden olmasından

dolayısı diğerk kanat yapıları ile karşılaştırıldığında daha fazla ısı transferi sağladığı tespit edilmiştir [3–5].

Pasif tekniklerde yüzey ve geometride değişiklik yapılarak elde edilen ısı transferi artırma çalışmaları ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır ve bu teknik uygulanabilirlik sınırına ulaşmıştır. Bu nedenle araştırmacılar yeni tekniklerin geliştirilmesi ve araştırılması konusu üzerine yoğunlaşmış olup, son yıllarda nanoakışkan kullanımı ile ilgili yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar ilgi odağı haline gelmiştir. Nanoakışkanlar metal, metal olmayan ve polimer parçacıklar ile H<sub>2</sub>O, etilen glikol ve yağ baz akışkanın homojen dağılımından oluşan ve termal iletkenliğin artırılması amacıyla kullanılan akışkanlardır. İçerisindeki nanopartikül boyutu 100 nm'den küçük olan bu akışkanlar, geleneksel katılardan farklı özellikler sergilemektedir. Mikron boyutlu parçacıklarla karşılaştırıldığında, nanopartiküller çok daha büyük bağıl yüzey alanlarına ve ısı transferinin iyileştirilmesi için büyük potansiyele sahip olup, ısı değıştiricilerde, ısı borularında, güneş kolektörleri gibi ısı transfer uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [6–8]. Ayrıca, birden fazla nanopartikülün aynı baz akışkan içerisinde kullanılmasıyla oluşan ve sonuç olarak daha fazla ısı transferi etkisine sahip olan akışkanlar hibrit nanoakışkan olarak adlandırılmaktadır [9]. Nanopartiküllerin keşfi ile başlayan nanoakışkanların tarihsel serüveni kronolojik olarak Şekil 1.1'de belirtilmiştir.



Şekil 1.1. Nanopartikül'den nanoakışkanlara olan gelişmelerin tarihsel süreçleri.

Aktif tekniklerde sistemin harici bir güç kaynağına ihtiyaç duyması, sisteme adapte edilmesindeki zorluklar, tasarımındaki zorluklar ve maliyetinin yüksek olmasından

dolayı fazla tercih edilmezler ve ayrıca pasif sistemlere göre daha karmaşıktır. Aktif teknikler genel olarak pasif teknikler ile beraber kullanılır. Bu tekniklerin birden fazlasının aynı sistemde kullanıldığı sistemler kombine sistemler olarak adlandırılmaktadır [10]. Aktif tekniklerin pasif sistemlere göre avantajı ısı transferi kontrol mekanizmasının yüksek olmasıdır. Kombine teknik uygulamaları arasında manyetik alandan etkilenebilen nanopartiküller ile manyetik alanın birlikte uygulandığı çalışmalar özellikle laminer akış koşullarında çalışan ısı sistemlerde gün geçtikçe artmaya başlamıştır.

MHD, elektriksel olarak iletken sıvıların dışarıdan uygulanan veya endüktif etki ile sıvı içinde üretilen manyetik alanların etkisi altında akışkanın akış karakteristiğini inceleyen bilim dalıdır. MHD'nin ilk uygulamaları 20. yy. başlarında Julius Hartmann ve Hannes Alfvén tarafından gerçekleştirilmiştir. Ardından konu hakkındaki çalışmalar hız kazanmış ve sıvı metal teknolojilerinde, astrofizikte, yer bilimlerinde, uzay bilimlerinde ve nükleer fizyon alanlarındaki uygulamalarda kullanılmıştır. Günümüzde manyetiklenme özelliğine sahip nanopartiküllerden oluşan nanoakışkanlara manyetik alan uygulanması ile sistemlerin enerji performanslarında artışlar gözlemlenebilmektedir [11,12]. Manyetik alan etkisiyle nanoakışkan içerisindeki nanopartiküller dairesel kesitli kanal yüzeyine çekilerek sınır tabaka kalınlığı azalmış olur ve akış hız profili daha yaygın hale gelir. Dolayısıyla akışkan ile dairesel kesitli kanal yüzeyi arasındaki hareketsiz tabaka harekete geçer ve boru yüzeyinden akışkana ya da akışkandan dairesel kesitli kanal yüzeyine gerçekleşen taşınım ile ısı transferinde artış gözlemlenir [13,14].

Daha önce de bahsedildiği üzere ani genişlemeli dairesel kanal yapısı mekanik, kimyasal ve nükleer endüstrilerde yoğun olarak kullanılmakta ve bu yapı akış ayrılması, yeniden birleşme noktası gibi akış karakteristiklerine sahip olduğundan karmaşıktır. Ani genişlemeli dairesel kanal yapısında oluşan yeniden birleşme bölgesine kadar olan bölgede oluşan devridaim bölgeleri ısı taşınımını engelleyerek sistemin ısı performansının düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca akışkanın yeniden birleşme noktasında ısı transferi çok yüksek değerlere çıkabilmektedir. Dolayısıyla ısı transferine olan etkisi birçok araştırmacı tarafından kanıtlanan çukur kanatların



ilerleyen yıllarda ani genişlemeli dairesel kesitli kanallarda da kullanılması öngörülmektedir.

Yukarıda verilen ani genişlemeli dairesel kanallar, çukur kanatlar, manyetiklenebilen akışkana manyetik alan uygulamaları ve nanoakışkanlar hakkında yapılan detaylı literatür araştırması sonucunda çukur kanat yapısına sahip ani genişlemeli dairesel kanaldaki nanoakışkan akışının manyetik alan etkisi altında taşınımıyla gerçekleşen ısı transferinin sistem performansına etkisinin detaylı olarak incelenmediği görülmüştür. Literatürde görülen bu boşluğu doldurmak ve ileride birçok sektörde kullanılması öngörülen çukur kanat yapısına sahip ani genişlemeli dairesel kanalın manyetik alan etkisi altındaki nanoakışkan akışının ısı transferine olan etkisi laminer akış şartlarında hem deneysel hem de sayısal olarak bu tezde incelenmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, ısı transferi uygulamalarında en önemli ve karmaşık mekanizma olan taşınım ile ısı transferinin, yüzeyinde çukur kanatların olduğu ani genişlemeli dairesel kanaldaki davranışı çalışma akışkanı olarak nanoakışkan kullanıldığı ve harici olarak manyetik alan uygulanması durumlarında incelenmiştir. Bu tez kapsamında çalışılan dairesel kesitli kanal yapısı ve ısı transferi iyileştirme teknikleri için literatürde ayrı ayrı birçok çalışma bulunmasına rağmen hepsinin aynı çalışmada yer aldığı bir deneysel ya da sayısal çalışmaya ulaşılamamıştır. Bu bölüm içerisinde, ani genişlemeli dairesel kanal alanında yapılan çalışmalar, çukur kanat yapıları ile ilgili yapılan çalışmalar, nanoakışkan alanında yürütülen çalışmalar ve nanoakışkana manyetik alan uygulanması alanında yapılan çalışmalara detaylı olarak yer verilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen tez çalışmasının literatür kapsamında yapılan çalışmalardan farklılıkları ve özgün değeri detaylı olarak vurgulanmıştır.

#### 2.1. ANİ GENİŞLEMELİ DAİRESEL KESİTLİ KANAL ÇALIŞMALARI

Akışkan, ani genişlemeli dairesel kanaldan akarken sırasıyla akış ayrılmasına ve yeniden birleşme etkilerine uğrar. Bu tasarım özellikle ısıtma [15] ve soğutma [16] sistemlerinde önemli bir yere sahiptir. Akış ayrılmaları, basınç kayıpları ve enerji kayıplarına neden olduğu için bazı mühendislik uygulamalarında tercih edilmez. Ancak ani genişleyen kanallar, yanma odası [17], elektronik soğutma sistemleri [18], kimyasal prosesler [19], yüksek performanslı ısı değiştiriciler [20] ve türbin kanat geçişleri [21] gibi uygulamalarda akış ayrılması ve ardından oluşan yeniden birleşme noktasında ısı transferinin iyileştirilmesi adına çalışmaların yapıldığı sistemlerdir.

Ani genişlemeli geometri ile ilgili ilk çalışmanın Kenneth R. Cramer [22] tarafından 1950 yıllı sonlarına doğru yapıldığı bilinmektedir. Teknolojideki gelişme ve ilerlemeler sayesinde sayısal kod ve yazılımların gelişmesi ani genişlemeli geometri ile ilgili daha karmaşık çalışmaların ve 3D akış problemlerinin çözülmesine yardımcı olmuştur. Araştırmacılar bu sayede farklı geometrik özelliklere, sınır şartlarına ve akışkan özelliklerine sahip ani genişlemeli dairesel kanallarda zorlanmış, doğal ve karma akışlı problemleri rahatlıkla çözmüşlerdir. Nouri vd. [23] silindirik bir kanal içerisine yerleştirilen ani genişleme etkisi altındaki küresel ısı kaynağının entropi üretimini sayısal olarak incelemişlerdir. CuO/H<sub>2</sub>O nanoakışkanı kullanılan sayısal çalışmada nanoakışkan konsantrasyonu arttıkça entropi üretiminin azaldığı gözlemlenmiştir. Choi vd. [24] farklı genişleme oranlarına (GO=1,48, 2,00, 3,27) sahip ani genişlemeli dairesel kanaldaki akış karakteristiğini farklı Reynolds sayılarında ( $5000 \leq Re \leq 64000$ ) incelemişlerdir. Sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmada Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) ve Large Eddy Simulation (LES) yaklaşımları kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuca göre akış yapısı, akış ayrımları ve yeniden birleşme uzunlukları arasında tutarlılık gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan gözlemsel sonuçlar ile yaklaşım sonuçları karşılaştırıldığında LES yaklaşımının daha tutarlı sonuçlar sağladığı görülmüştür.

Kanna vd. [25] GO=2 genişleme oranına sahip ani genişlemeli dairesel kanalın nanoakışkan akışı altındaki birleşik ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada nanoakışkan konsantrasyonunun lokal ve ortalama Nu'yu etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca lokal Nu'nun yeniden birleşme noktasında en yüksek değere ulaştığı ve alt yüzeyde oluşan devridaim bölgenin ortalama Nu üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Lobanov ve Pakhomov [26] GO=3 genişleme oranına sahip ani genişlemeli dairesel kanaldaki ısı transfer ve akış karakteristiğini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan en yüksek ısı transferinin yeniden birleşme noktasında gerçekleştiği belirlenmiştir. Goharzadeh ve Rodgers [27] 50'den 600'e kadar olan Re'lerdeki H<sub>2</sub>O'nun GO=1,4 ve 1,6 genişleme oranına sahip ani genişlemeli dairesel kanalın akış ayrılma ve yeniden birleşme davranışını incelemişlerdir. Her iki genişleme oranı için yeniden bağlanma uzunluğunun sayısal tahminler ile tutarlı olduğu ve değişen Re sayıları ile doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca devridaim şiddetini

hem Re sayısına hem de genişleme oranına göre değiştiği ve Re sayısı ile yeniden bağlanma uzunluğu arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı görülmüştür.

Ani genişlemeli geometriler ile ilgili yapılan bazı çalışmalar Çizelge 2.1’de özet halinde verilmiştir.

Çizelge 2.1. Ani genişlemeli geometrilerle ilgili yapılan çalışmalar.

Referans	Metot	GO	Re	Akışkan	Bulgular
Tihon vd. [28]	Deneysel ve Sayısal	2,43-4,00	10-1250	H <sub>2</sub> O	Genişleme oranının artmasıyla ani genişleme bölgesindeki devridaim akışın daha karmaşık bir hale geldiği belirlenmiştir.
Mohammed vd. [29]	Sayısal	1,942	75-225	Au, Ag, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu, CuO, diamond, SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O	Nu’nun devridaim akıştan etkilendiği ve nanoakışkan konsantrasyon oranının bu bölgedeki Nu’yu olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.
Abu-Nada [30]	Sayısal	2,00	200-600	Cu, Ag, CuO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	Devridaim bölgesinin dışında termal iletkenliği yüksek olan nanoakışkanlardaki Nu daha fazla iyileştirme sağlarken, devridaim bölgesinin içinde termal iletkenliği düşük olan nanoakışkanlar daha fazla iyileştirme sağladığı belirlenmiştir.
Mehrez ve Cafsi [31]	Sayısal	2,00	100-300	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cu/ H <sub>2</sub> O	Yeniden birleşme uzunluğunun nanoakışkan konsantrasyonu arttıkça azaldığı ve Re sayısı arttıkça artış gösterdiği belirlenmiştir.
Kherbeet vd. [32]	Sayısal	2,00	0,05-0,5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO, SiO <sub>2</sub> , ZnO/etilen glikol	Çalışmada ani genişleme kaynaklı oluşan devridaim akış bölgesinin adım yüksekliğinin küçük olmasından dolayı oluşmadığı gözlemlenmiştir.

## 2.2. ÇUKURLU KANAT YAPISI ÇALIŞMALARI

Taşınımın gerçekleşen ısı transfer oranında artış sağlamak için akışkan geçişine kanatçıkların yerleştirilmesi uygulamada ve literatürde sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Bir kanaldaki ısı transfer artışı akışın engellenmesine, akış ayrılmasına ve ikinci akışlar oluşmasına yardımcı olan bükümlü bant, tel spiral, çubuk ve çukur yapılar yerleştirilerek yapılır. Akışın engellenmesi basınç kayıplarının ve serbest akış alanının azalmasıyla viskoz etkilerinin artmasına neden olur. Akışın engellenmesi ayrıca akış hızlanmasına ve bazı durumlarda ikincil akışlarına oluşmasına da neden olur. Oluşan ikincil akış akışkan ve dairesel kesitli kanal yüzeyi arasında daha iyi ısı temas oluşmasını sağlayan girdaplar oluşturur ve akışkanın karışması sıcaklık gradyanını geliştirerek yüksek ısı transfer katsayısı sağlar.

Yüzey alanının artırılması ile ısı transferinin artmasını sağlayan ısı ve akış karakteristiği değişimlerinin yoğun olarak görüldüğü yapı çukur kanat yapısıdır ve 1993 yılının başında Bearman ve Harvey [33] tarafından gerçekleştirilen çalışmadan günümüze kadar literatürde birçok araştırmacı tarafından ısı transferini arttırmak amacıyla kullanılmıştır. Zhang vd. [34] elips şeklindeki çukur kanadın ısı transferine ve akış karakteristiğine olan etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel verilerin ışığında elips şeklindeki çukur kanat yapısının %48,3 oranında ısı transferinde artış sağladığı belirlenmiştir. Pazarlıoğlu vd. [35] bir çukurlu kanat yapısına sahip dairesel kesitli kanal içerisindeki NiO/H<sub>2</sub>O nanoakışkanının ısı ve akış karakteristiğini incelemişlerdir.  $20000 \leq Re \leq 50000$  akış şartlarında, %0,6 nanoakışkan hacimsel konsantrasyonunda ve  $P/d=7,5, 15,0$  ve  $30,0$  çukur kanat adım oranlarında gerçekleştirilen sayısal çalışmada en yüksek Nu sayısının  $P/d=7,5$  adım oranında elde edildiği belirlenmiştir. Al-Obadi [36] düz dairesel kesitli kanal ve çukur kanat yapısına sahip dairesel kesitli kanal kullanılarak tasarlanan bir ısı değiştiricide akan H<sub>2</sub>O'nun hidrotermal performansını sayısal olarak incelemiştir. Çalışma, çukur kanat çapı  $d=0,75-1,5-2,0$  mm olan ve  $1500 \leq Re \leq 24000$  akış şartlarındaki dairesel kesitli kanalda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre  $d=2$  mm çukur kanat çapına sahip geometrinin düşük akış oranına rağmen en yüksek ısı transferini sağladığı belirlenmiştir. Liao vd. [37] elips şeklinde çukur kanatlara sahip dairesel kesitli kanalın akış karakteristiğini ve ısı transfer performansını sayısal

olarak incelemişlerdir. Çukur kanatların  $P/d=14$  ve  $16$  adım oranlarına,  $d=1,5$  mm çapa ve  $\theta=0^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $60^\circ$  çapraz dağılım açısına sahip olduğu dairesel kesitli kanal üzerinde gerçekleştirilen çalışmada akış karışımı ve ikincil akışlar sayesinde çukur kanatlı dairesel kesitli kanalın düz dairesel kesitli kanala göre sistemin termo-hidrolik performansını önemli derecede arttırdığı belirlenmiştir. Dagdevir vd. [38] farklı çaplara ve aralığa sahip çukur kanatların ısı transfer ve akış karakteristiğini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan çukur kanatlı dairesel kesitli kanalın düz dairesel kesitli kanal ile karşılaştırıldığında daha fazla ısı transferi sağladığı ve ısı transferindeki en önemli geometrik parametrenin çukur kanat aralık uzunluğu olduğunu belirlemişlerdir.

Çukur kanat yapısı ile ilgili yapılan bazı çalışmalar Çizelge 2.2’de özet halinde verilmiştir.

Çizelge 2.2. Çukurlu kanat yapısı ile ilgili yapılan çalışmalar.

Referans	Metot	P/d	Re	Akışkan	Bulgular
Cheraghi vd. [39]	Sayısal	4	500-2000	H <sub>2</sub> O	Çukur kanat yapısı kullanıldığında en yüksek ısı transfer artışının %600 oranında en büyük çukur çapı ve en küçük adım aralık değerleri kullanıldığında elde edildiği belirlenmiştir.
Eiamsa-ard vd. [40]	Deneysel ve Sayısal	0,67	5000-15000	TiO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	Çukur kanat yapısı sayesinde sistem performansının en yüksek çukur kanat dağılım açısının ve nanoakışkan konsantrasyon oranının kullanıldığı durumda 1.258 kat arttığı görülmüştür.
Manoram vd. [41]	Deneysel ve Sayısal	3	-	H <sub>2</sub> O	Çukur kanatlı dairesel kesitli kanalın 2,5 kg/dk’lık akışkan debisindeki Nu sayısı düz dairesel kesitli kanala göre 2,5 kat artış göstermiştir. Ayrıca $f'$ ’te %11,1’lik artış belirlenmiştir.

Çizelge 2.2. (devam ediyor).

Aroonrat ve Wongwises [42]	Deneysel	4,33- 2,88- 2,16	-	R-134a	Çukur kanatlı dairesel kesitli kanalın ısı transferi ve basınç kayıplarında önemli artışlar meydana getirdiği ve artış oranlarının sırasıyla %83,0 ve %892 olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Araştırmacılar ayrıca Nu sayısı ve f için yeni korelasyonlar oluşturmuştur.
Firoozi vd. [43]	Sayısal	1,0- 2,0- 4,0	500- 4000	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O	Çukur kanatlı dairesel kesitli kanal kullanılarak sistemin genel performansının 3,12 oranında arttığı gözlemlenmiştir.

### 2.3. NANOAKIŞKAN ÇALIŞMALARI

Akışkanlarda mikropartikül kullanımı nanopartikül kullanımından daha önceye dayanır. Teknolojinin gelişmesiyle daha küçük boyutlara getirilen partiküller sayesinde mikropartiküllerin kullanımı sırasında ortaya çıkan zorluklar ortadan kaldırılmış ve nanopartiküller ile çalışma ilk kez Choi ve Eastman [44] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışmada nano boyuttaki partiküllerin mikro boyuttaki partiküllere göre çökme bakımından daha durağan bir hal sergilediği gözlemlenmiştir. Yapılan bu araştırma ve elde edilen sonuçlar akışkanların termofiziksel özelliklerini geliştirmek için nanopartikül kullanımına öncülük etmiştir.

Bu alandaki çalışmaların öncüsü niteliğindeki diğer çalışmalar Masuda vd. [45] ile Pak ve Cho [46] tarafından gerçekleştirilmiştir. Isı transferinin geliştirilmesi açısından pasif teknikler içerisinde yer alan bu teknik, H<sub>2</sub>O, yağ ve etilen glikol gibi geleneksel ısı transferi akışkanlarına alüminyum, gümüş, nikel, demir, bakır gibi metal nanopartiküllerin; alüminyum oksit, titanyum oksit, silikon oksit, demir oksit, bakır oksit gibi metal oksitlerin; ve grafen, karbon nanotüp gibi polimerlerin eklenmesi prensibine dayanmaktadır. Günümüzde nanoakışkanların kullanımı ve termofiziksel özelliklerinin araştırılarak ısı transferi ile akış karakteristiğine etkisi yoğun bir şekilde incelenmektedir. Nanoakışkanların termal enerji depolama

sistemlerinde [47,48], termoelektrik jeneratörlerinde [49,50], otomobil radyatörlerinde [51,52], ısı değiştiricilerde [53,54], bina ısıtma ve soğutma sistemlerinde [55,56], nükleer reaktörlerde [57,58] ve mikro kanallar [59,60] gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur. Bunun yanı sıra, nanoakışkanlar ile ilgili yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini, çökeltme eğilimlerini vb. araştıran çalışmalar olup, farklı geometrilere sahip kanal içerisinde zorlanmış taşınım olan sistemler üzerinde yapılan çalışmaların daha az araştırıldığı gözlemlenmektedir.

He vd. [61] içerisinden  $\phi = \%1,0-4,0$  konsantrasyonunda akan  $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$  nanoakışkanı geçen ve içerisine bir ve iki kıvrımlı bant yerleştirilmiş bir dairesel kesitli kanalın tek ve çift faz modeli kullanarak  $3000 \leq \text{Re} \leq 36000$  akış şartlarındaki akış karakteristiğini ve ısı transfer performansını incelemiştir. Sayısal çalışmadan elde edilen verilere göre en yüksek PDK'nın değerinin  $\text{Re}=36000$ ,  $\phi = \%4,0$  hacimsel konsantrasyonda ve çift faz modelinde 2,18 olarak tek kıvrımlı banda sahip dairesel kesitli kanalda elde edildiği belirlenmiştir. Sajid vd. [62] çalışma akışkanı olarak  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  nanoakışkanı kullanılan bir ısı alıcının üç farklı kanal yapısı altındaki ısı transfer ve hidrodinamik karakteristiğini deneysel olarak incelemiştir. Hacimsel konsantrasyon oranı  $\phi = \%0,006-0,012$  aralığında olan nanoakışkanın  $\text{H}_2\text{O}$ 'ya göre daha iyi ısı transferi gerçekleştirdiği belirlenmiştir.  $\phi = \%0,012$  konsantrasyonda Nu sayısının  $\%40,57$  oranında artış göstererek maksimum değere ulaştığı belirlenmiştir. Osman vd. [63] hacimsel konsantrasyonu  $\phi = \%0,3, 0,5$  ve  $1,0$  olan  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$  nanoakışkanının  $200 \leq \text{Re} \leq 7000$  akış şartlarındaki ısı transfer karakteristiğini dikdörtgen kesitli kanal içerisinde deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel verilerden elde ettikleri sonuçlara göre taşınım ile gerçekleşen en yüksek ısı transferinin  $\phi = \%1,0$  konsantrasyonunda geçiş akış rejimi ve türbülans akış rejimi için sırasıyla  $\%54,0$  ve  $\%11,0$  olarak meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Klazly ve Bognar [64] laminer akış koşulları altındaki  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  nanoakışkanlarının ani genişlemeli kanaldaki sıcaklık dağılımlarını ve akış karakteristiğini sayısal olarak incelemişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçlardan sıcaklık farkı arttıka hızın arttığı, birincil ve ikincil devridaim gölgelerinin sıcaklık farkından önemli derecede etkilendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca sıcaklık farkı arttıka



devridaim akışın gerçekleştiği alanın da arttığı belirlenmiştir. Gürdal vd. [65] manyetik alan etkisi altındaki çukur kanata sahip dairesel kesitli kanaldan akan  $Fe_3O_4/H_2O$  FNA'nın termohidrolik performansını deneysel olarak incelemiştir. Yapılan çalışma  $1131 \leq Re \leq 2102$  akış rejiminde,  $4500 \text{ W/m}^2$  sabit ve üniform ısı akısında ( $q''$ ) ve  $0.03 \leq T \leq 0.3$  manyetik alan etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında çukur kanatlı dairesel kesitli kanalda FNA kullanılması durumunda taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin düz ve çukurlu dairesel kesitli kanallarda  $H_2O$ 'nun kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında sırasıyla %3,57 ve %2,58 oranında arttığı belirlenmiştir.

Nanoakışkanların taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan bazı çalışmalar Çizelge 2.3'te özet halinde verilmiştir.

Çizelge 2.3. Taşınım ile gerçekleşen ısı transferini iyileştirmek amacıyla yapılan nanoakışkan çalışmaları.

Referans	Metot	$\phi$	Re	Akışkan	Bulgular
Rabienataj Darzi [66]	Deneysel	%1,0	5000- 20000	$Al_2O_3/H_2O$	Çift borulu ısı değiştirici ile gerçekleştirilen deneysel sonuçlardan nanoakışkan kullanımı ile ısı transfer ve basınç kayıplarının attığı görülmüştür. En yüksek taşınım ile ısı transferinin yüksek Re sayılarına, en yüksek basınç kayıplarının da düşük Re sayılarında gerçekleştiği belirlenmiştir.

Çizelge 2.3. (devam ediyor).

Khoshvaght- Aliabadi [67]	Sayısal	%0- 4	6000- 22000	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O	Sinüs şekilde kıvrımlara sahip kanal içerisinde gerçekleştirilen çalışmada nanoakışkanın baz nanoakışkan ile kıyaslandığında Nu sayısını artırdığı gözlenmiş, basınç kaybında önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Ayrıca yazar sinüs kıvrımlı kanal içerisinde Nu sayısı ve $f''$ 'in tahmin edilebilmesi için korelasyon geliştirmiştir.
Fazeli [68]	Deneysel	%0,1	349- 599	MWCNT- CuO/H <sub>2</sub> O	Plakalı ısı değiştiricideki ısı transferi ve akış karakteristiğini incelemek için yapılan çalışmada hibrit nanoakışkan kullanımı ile birlikte 14,4 lt/dk, 18,9 lt/dk ve 24,4 lt/dk debilerde taşınımın gerçekleşen ısı transferinin H <sub>2</sub> O'ya göre sırasıyla %85,56, %101,2 ve %139,19 artış sağladığı belirlenmiştir.
Yang vd. [69]	Deneysel	%0,3	9600- 14600	MWCNT- R141b	Nano soğutucu akışkan alanında gerçekleştirilen deneysel çalışmada nanoakışkanın ısı transfer ve akış karakteristiği incelenmiştir. Elde edilen deneysel verilere göre Nu sayısının nanoakışkan kullanımı ile birlikte %40'a kadar artış gösterdiği belirlenmiştir.

Çizelge 2.3. (devam ediyor).

Wang vd. [70]	Sayısal	%6,0	20000- 100000	CuO/ H <sub>2</sub> O-etilen glikol	Dairesel bir kanal içerisine trapez çubuk yerleştirilerek ısı transfer ve akış karakteristiği incelenen çalışmada Nu sayısı H <sub>2</sub> O-etilen glikol karışımı ile kıyaslandığında %41,5 artış gerçekleştiği belirlenmiştir. Ayrıca f'in nanoakışkan kullanımı ile birlikte %6.9 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.
------------------	---------	------	------------------	---	--

#### 2.4. MANYETOHİDRODİNAMİK (MHD) ÇALIŞMALARI

Manyetizma ve akışkan hareket yasalarını konu alan MHD 1930'ların sonlarında araştırma ve uygulama konusu haline gelmiş olup, ilk çalışma konunun babası olarak nitelendirilen Julius Hartmann tarafından 1937 yılında gerçekleştirilmiştir. Julius Hartmann iki paralel levha arasında manyetik alan uygulayarak elektriksel olarak iletken akışkanın tam gelişmiş akış şartlarındaki hız dağılımını ve akım yoğunluğunu incelemiştir [71]. Ancak 1960 yılı sonlarına kadar mühendislik uygulamalarında kullanılmayan MHD ile ilgili çalışmalar bu yıldan sonra artış göstermiştir.

MHD, yıldız ve gezegenlerin manyetik alanları ve dönüş hızları, güneş lekeleri, alevleri ve rüzgarları, manyetosferin yapısı, kozmik ışınların kökeni gibi birçok doğa olayının açıklanmasında önemli rol oynamaktadır. MHD, füzyon/fisyon reaktörleri gibi proseslerin bir parçasıdır. MHD'nin diğer bir kullanım alanı ise harici olarak kullanılarak ısı transferini artırma veya azaltma uygulamalarında aktif teknik olarak kullanılabilir. Bunun yanı sıra, erimiş metalin karıştırılması, indüksiyon fırınlarında türbülans kontrolü, katılaşma sırasında yüzdürme kaynaklı akışın sönümlenmesi ve erimiş çeliğin sürekli döküm işlemleri sırasında külçelerin şekillendirilmesi gibi uygulamaları içerir.

Isı transferini iyileştirmek amacıyla manyetik alan etkisinde kullanılan manyetiklenebilen nanoakışkan uygulamaları aktif tekniklerden biridir. Bir demir

minerali olan manyetit ( $Fe_3O_4$ ) manyetiklenebilen nanoakışkanlara örnek olarak gösterilebilir. MHD uygulaması manyetiklenebilen nanoakışkanın kullanılmasıyla günümüze ısı değiştiricilerinde [72], güneş kolektörlerinde [73], jeneratör, pompa, yataklar ve sınır katmanı kontrol sistemleri gibi endüstriyel uygulamalarda [74], motor soğutma sistemlerinde [75] ve nükleer reaktörlerde [76] kendine kullanım alanı bulmaktadır. Akışkan ile dairesel kesitli kanal yüzeyi arasında oluşan ve ısı taşınımını engelleyen sınır katmanlar manyetiklenebilen nanoakışkandaki nanoparçacıkların manyetik alanın etkisi altında dairesel kesitli kanal yüzeyine yaklaşması sonucu sınır katmanlar bozulur ve bu sayede ısı transferinde artış meydana gelir.

Arjun ve Rakesh [77] dairesel kesitli kanal içerisinden geçen  $CuO/H_2O$  nanoakışkanının manyetik alan etkisi altındaki ısı transferini sayısal olarak incelemişler ve Nu sayısının Re sayısı ve nanoakışkan konsantrasyonu arttıkça artış gösterdiği,  $0 \leq Ha \leq 20$  aralığı haricinde Ha sayısı arttıkça azalma eğilimde olduğu görülmüştür. Sheikholeslami vd. [78] içerisinden  $CuO/H_2O$  nanoakışkanı geçen ve manyetik alan etkisine altında kalan dairesel kesitli kanalın ısı transfer mekanizmasını sayısal olarak incelediklerinde elektromanyetik kuvvetlerin viskoz kuvvetleri baskıladığını ve akışkan hızını azalttığını belirlemişlerdir. Dolayısıyla Ha sayısı arttıkça hızda azalma meydana geldiği sonucuna varmışlardır. Sheikholeslami vd. [74] ayrıca iki yatay ve paralel plaka arasındaki ısı transferini ve akış karakteristiğini incelediğinde manyetik alanın uygulanmasıyla akışkana ters yönde etki eden Lorentz kuvvetlerinin hidrodinamik sınır katman kalınlığını azalttığını görmüşlerdir. Hadavand ve Souza [79] Lattice Boltzman metodu kullanarak mikro kanal içerisinden geçen ferronanoakışkanın manyetik alan etkisi altındaki ısı transfer karakteristiğini incelemişlerdir. Sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmada manyetik alan şiddeti arttıkça devridaim alanının genişlediği ve bu olayın sıcaklık profilini değiştirdiği belirlenmiştir. Ghasemian vd. [80] mini kanal içerisindeki ferronanoakışkanın sabit ve alternatif manyetik alan etkisi altında ısı transfer karakteristiğini laminer akış şartlarında araştırmışlardır. Sayısal analiz sonuçlarından elde ettikleri verilere göre manyetik alanın uygulanması sonucu oluşan vortekslerin termal sınır tabakasını bozduğu ve bunun sonucunda ısı transferinde artış meydana

geldiğini ve bu etkinin tam gelişmiş akış şartlarında daha fazla artış sağladığını da ayrıca belirtmişlerdir.

Nanoakışkanlara manyetik alan uygulayarak taşınımınla gerçekleşen ısı transferindeki artışı inceleyen bazı çalışmalar Çizelge 2.4'te özet halinde verilmiştir.

Çizelge 2.4. Taşınımınla gerçekleşen ısı transferini iyileştirmek amacıyla yapılan nanoakışkanlara manyetik alan uygulama çalışmaları.

Referans	Metot	Manyetik Alan Tipi	Manyetik Alan Şiddeti	Re	Akışkan	Bulgular
Motozawa vd. [81]	Deneysel 1	DC	0-500 mT	780	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (W-40)/H <sub>2</sub> O	Dikdörtgen kanalda gerçekleştirilen deneysel çalışmada manyetik alanın uygulanmasıyla ısı transfer katsayısının manyetik alanın uygulandığı bölgede %20'ye kadar artış gösterdiği belirtilmiştir.
Ghofrani vd. [82]	Deneysel 1	AC	0-0,2 T	80-1350	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O	Bakır malzemeden imal edilmiş dairesel kesitli kanal içerisinde gerçekleştirilen çalışmada alternatif manyetik alanın 20 Hz ve nanoakışkan konsantrasyonunun %2,0 olduğu durumda taşınımınla gerçekleşen ısı transferinde %27,6'lık artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 2.4. (devam ediyor).

X.Zhang ve Y.Zhang [83]	Sayısal	DC	0-0,09 T	1000- 9500	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O	Kare kesitli kanal içesindeki manyetik nanoakışkana uygulanan 0,09T manyetik alan şiddetinde ısı transferinin manyetik alan olmayan duruma göre %43,9, 0,05T olan duruma göre ise %22,7 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir.
Heidary vd. [84]	Sayısal	DC	0<Ha<60	50- 1000	Cu/H <sub>2</sub> O	2D yatay düz kanal için yapılan çalışmada nanoakışkana Ha=30 şiddetinde manyetik alan uygulandığında en yüksek ısı transferinin $\phi$ =%10 hacimsel konsantrasyonunda ve Re=250 akış rejiminde %76 oranında gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 2.4. (devam ediyor).

---

Sheikholeslami ve Ganji [85]	Sayısal	DC	$0 \leq Ha \leq 20$	1-20	Cu/H <sub>2</sub> O	Gözenekli yapıya sahip kanaldaki nanoakışkanın manyetik hidrodinamik akış karakteristiği incelenen çalışmada hız sınır tabaka kalınlığının Ha sayısının artmasıyla artış gösterdiği, nanoakışkan konsatrasyonu ve Re sayısı artışı ile azalma eğiliminde olduğu belirtilmiştir.
------------------------------------	---------	----	---------------------	------	---------------------	---

---

## BÖLÜM 3

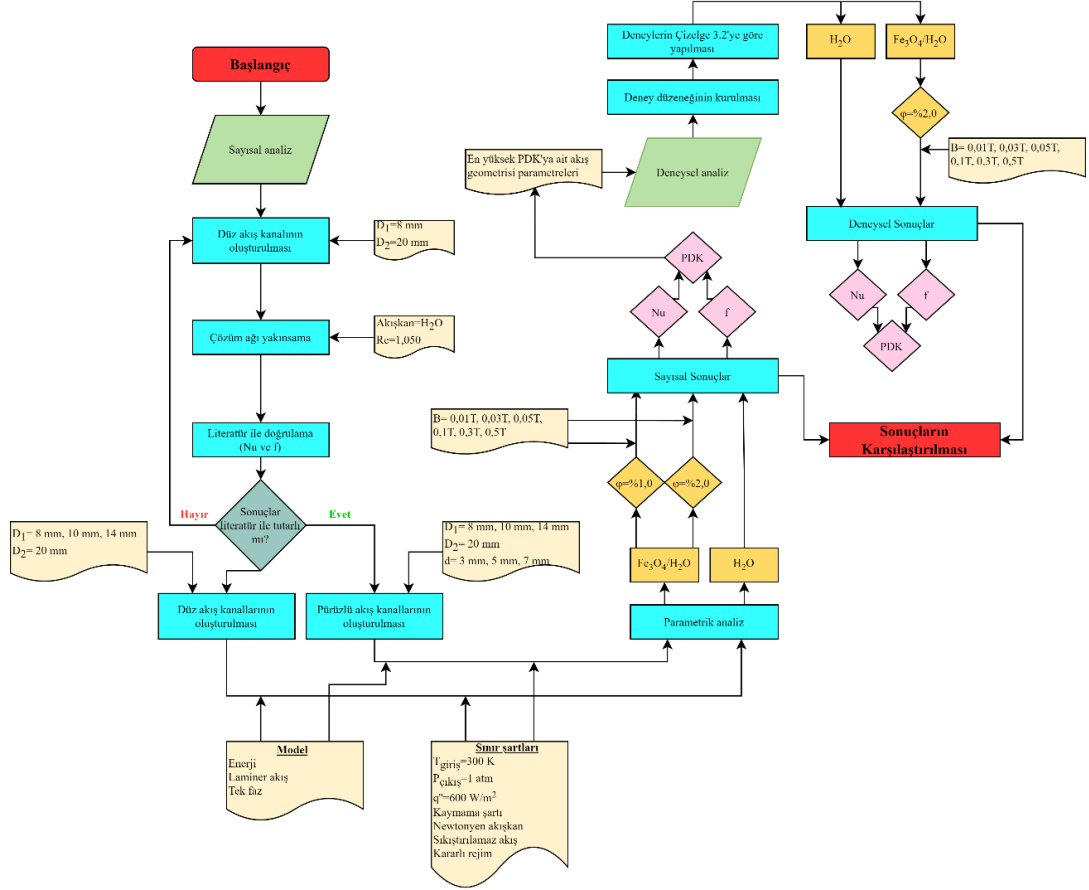
### MATERYAL VE METHOD

Bu çalışmada, içerisinde  $\phi = \%1,0$ ,  $\%1,5$  ve  $\%2,0$  hacimsel konsantrasyona ve  $1000 \leq Re \leq 2000$  laminer akış rejimine sahip FNA geçen  $GO = 2,5$ ,  $2,0$  ve  $1,4$  olmak üzere üç farklı genişleme oranına sahip ani genişlemeli dairesel kanala  $d = 3$ ,  $5$  ve  $7$  mm çaplarında ve  $P = 15$  mm aralığında çukur kanatlar eklenerek  $B = 0,01$ ,  $0,03$ ,  $0,05$ ,  $0,1$ ,  $0,3$  ve  $0,5$  T DC manyetik alan şiddeti altındaki ısı transfer ve akış karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada yer alan geometrik parametreler için daha önce yayımlanan “Energy analysis of magnetite nanofluid flowing in newly designed sudden expansion tube retrofitted with dimpled fin” [86] çalışmasında en iyi sonuçları veren parametreler kullanılmıştır. Sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlarda en yüksek PDK’ya sahip geometrinin deney düzeneğinde kurulumu yapılmıştır. Deneysel çalışmalar Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında, sayısal çalışmalar ise ANSYS Fluent 2020 R3 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal ve deneysel analiz süreçlerinin akış şeması, analizlerde kullanılan geometrik, manyetik ve akış parametreleri Şekil 3.1’de verilmiştir.

Literatür incelendiğinde ikinci kanal/birinci kanal uzunluk oranının Mehrez ve Cafsi [31]; Hussain ve Ahmed [87] gibi birçok araştırmacı tarafından yaklaşık 3 olarak alınması önerildiğinden yapılacak çalışmada kanal uzunlukları oranı 3 olarak belirlenmiştir. Kanal uzunluk oranlarının literatüre benzer olması için dairesel kesitli giriş kanalının uzunluğu 375 mm, çıkış kanalının uzunluğu ise 1125 mm olarak imal edilecek ve toplam kanal uzunluğu 1500 mm olacaktır. Nanoakışkanlara manyetik alan uygulanması ile ilgili yürütülen literatür çalışmaları incelendiğinde manyetik alan şiddetinin  $0,01-2,0$  T [88,89] aralığında değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla, gerçekleştirilecek nanoakışkan deneylerinde çıkış kanalının orta bölgesinde  $0,01T$ ,



0,03T, 0,05T, 0,1T, 0,3T ve 0,5T büyüklüklerinde ve akışa dik yönde sabit manyetik alan uygulanacaktır.

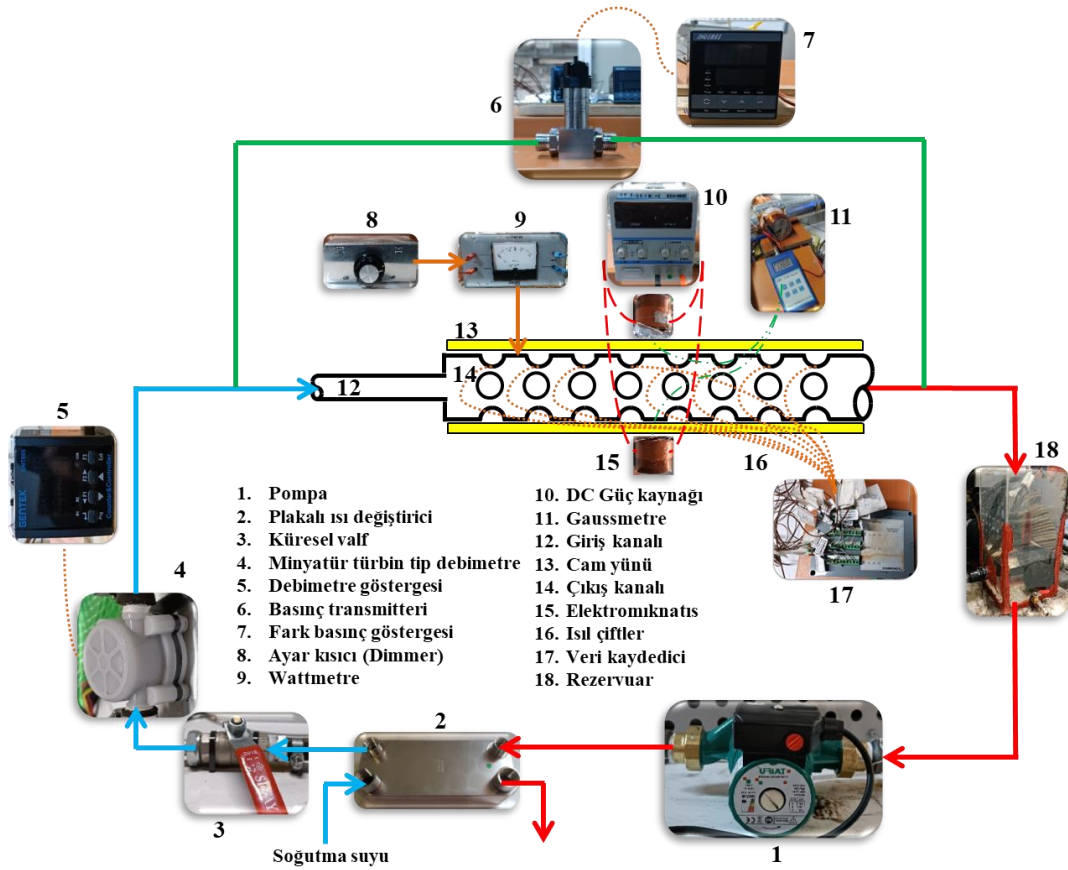


Şekil 3.1. Sayısal ve deneysel analiz süreçlerinin akış şeması.

### 3.1. DENEYSEL YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında yapılacak olan deneysel sürece ait akış şeması Şekil 3.2’de verilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarına göre ısı transferi ve akış karakteristiği bakımından en yüksek performans sergileyen  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen kanalın imalatı yapılarak deneysel set haline getirilmiştir. Dairesel kesitli giriş kanalı olarak  $D_1=14$  mm çapında ve 375 mm uzunluğunda, genişleyen dairese kesitli kanal olarak ise  $D_2=20$  mm çapında ve 1125 mm uzunluğunda manyetiklenme özelliği bulunmayan ve yapılan literatür araştırmasında birçok araştırmacı tarafından da tercih edilen alüminyum malzemeden imal edilmiş  $t=2$  mm et kalınlığına sahip dairese kesitli kanallar kullanılmıştır [90–

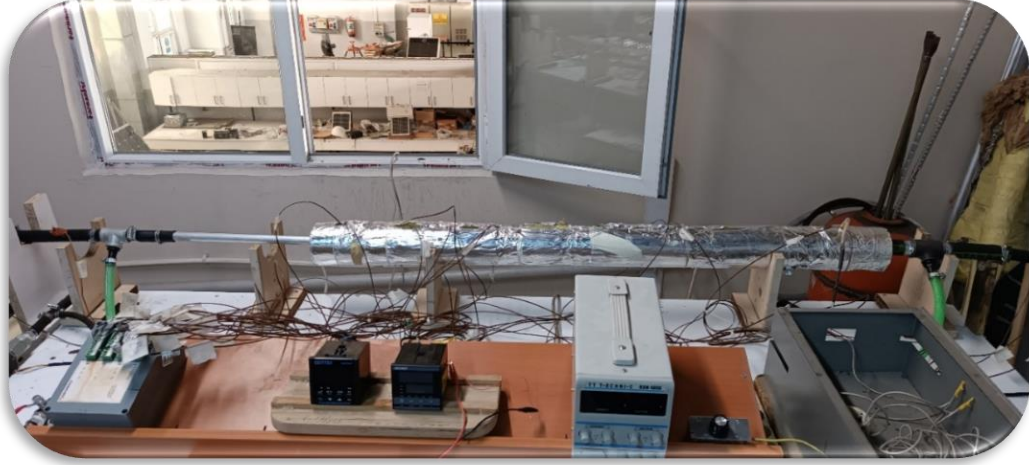
93]. Genişleyen dairesel kesitli kanal yüzeyine  $600 \text{ W/m}^2$  değerinde sabit ve üniform ısı akısı uygulanmıştır. Deneylede çalışma akışkanı olarak hacimsel konsantrasyonu  $\phi=2,0$  olan FNA kullanılmıştır. Deneysel çalışmada genişleyen dairesel kesitli kanalın orta bölgesinde nanoakışkana  $B=0,01, 0,03T, 0,05T, 0,1T, 0,3T$  ve  $0,5 T$  şiddetlerinde DC manyetik alan uygulanmıştır. Deneysel çalışmadaki ısı performans ve akış karakteristikleri  $1000 \leq Re \leq 2000$  akış rejiminde incelenmiştir.



Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik akış şeması.

### 3.1.1. Deney Düzeneği

Ani genişlemeli dairesel kanal içerisinde akan FNA'nın DC manyetik alan etkisi altındaki ısı transferi ve akış karakteristiğini incelemek amacıyla hazırlanan deney düzeneği Şekil 3.3'te verilmiştir. Deney düzeneğinde toplam 17 farklı bileşen olup, deney düzeneğindeki görevleri ve özellikleri ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.3. Deney düzeneğinin görüntüsü.

### 3.1.1.1. Ana Ekipmanlar

#### Pompa

Deney düzeneğinde  $Re=1000-2000$  akış rejimi aralığını elde edebilmek için 137 W motor gücüne sahip TAİFU marka GRS25/8 model santrifüj tip sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Pompa rezervuardan çektiği akışkanı basınçlandırarak plakalı ısı değiştiriciye göndermektedir.

#### Plakalı Isı Değiştirici

Deney düzeneğinde dairesel kesitli kanal yüzeyine uygulanan ısı akısı kaynaklı sıcaklığı artan test akışkanların sirkülasyonu tekrarlanırken ve tekrar test kanalına gelmeden 16 plakaya sahip bir ısı değiştirici yardımıyla soğutulmuştur ve bu sayede deneysel sürecin sürekliliği sağlanmıştır.

#### Küresel Valf

Dairesel kesitli giriş kanalı ile plakalı ısı değiştirici arasına yerleştirilen bu valf küresel tip vana olup, akış debisi ayarı yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Küresel tip vana kullanılmasının nedeni küresel valflerin debi kontrol kabiliyetini yüksek

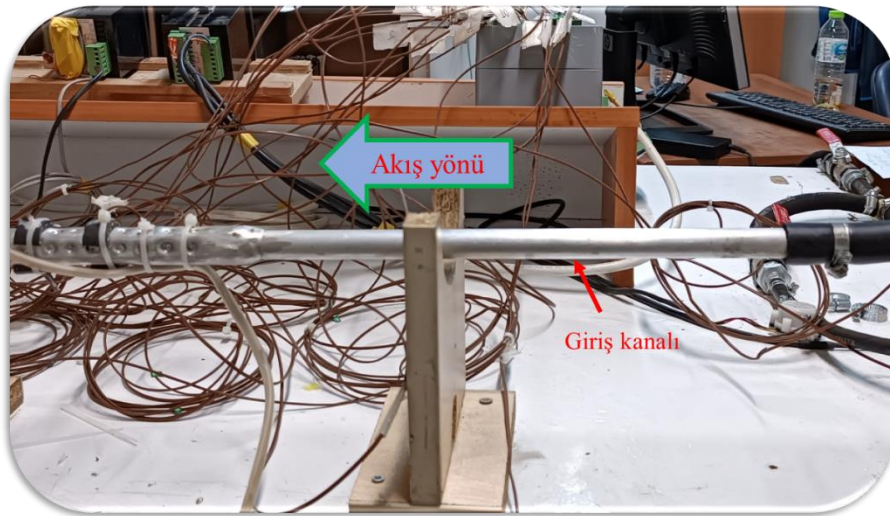
olmasıdır. Valfin açıklık oranı değiştirildiği zaman değişim miktarı debimetre göstergesinden görülmektedir.

### **Plastik Türbin Debimetre**

Deney düzeneğinde, küresel valf ile ayarlanan ve istenilen Re değerindeki debiyi lt/dk cinsinden ölçen, 1-60 lt/dk ölçüm aralığına ve %1,0 ölçüm hassasiyetine sahip VFA marka VF-M1-25 tip minyatür türbin tip debimetre kullanılmıştır. Debimetreden alınan bilgi yine GENTEK marka GNT605 model dijital debi göstergesine aktarılmaktadır.

### **Dairesel Kesitli Giriş Kanalı**

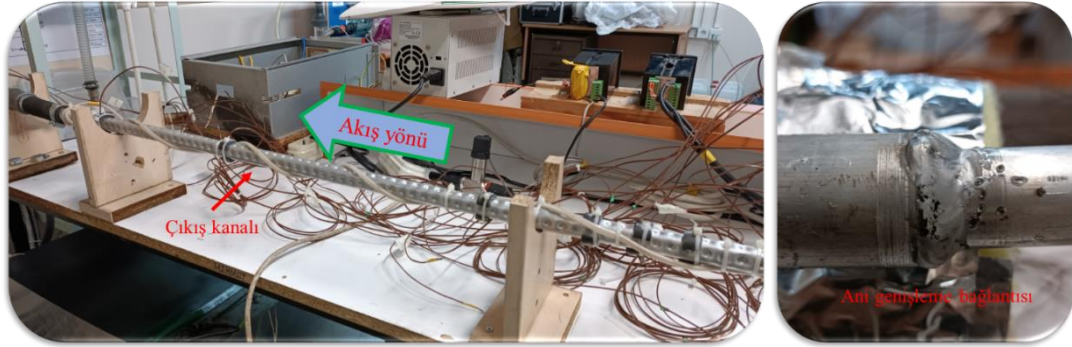
Akışkanın dairesel kesitli kanal boyunca akması sırasında akış sapmaları sonucu oluşacak hataların minimize edilmesi için akışın hidrodinamik olarak tam geliştirilmesi ve deneyin amacı kapsamında ani genişleme elde edebilmek için 375 mm uzunluğunda alüminyum malzemeden yapılmış dairesel kesitli kanal yerleştirilmiştir. Bu dairesel kesitli kanalın çapı en iyi performansı sağlayan durumun giriş kanal çapı olan  $D_2=14$  mm'dir ve deney düzeneğindeki yeri Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Dairesel kesitli giriş kanalının görüntüsü ve sisteme bağlantısı.

## Çıkış Kanalı

Akışkanı ani genişlemeye uğratmak için akışkanın girdiği ve hidrodinamik olarak geliştiği dairesel kesitli kanalın çıkışına 20 mm çapında ve 1125 mm uzunluğunda alüminyum malzemeden imal edilmiş dairesel kesitli kanal yerleştirilmiştir. İki farklı çapa sahip bu dairesel kesitli kanallar atölye ortamında alüminyum kaynağı ile birleştirilerek ani genişleme geometrisi elde edilmiştir. Ardından sayısal analiz sonuçlarında en yüksek PDK'yı sağlayan çukur kanat yapısı pres makinesi kullanılarak Mold Tool Yöntemi ile alüminyum kanal üzerine işlenmiştir. Kullanılan dairesel kesitli çıkış kanalı Şekil 3.5.'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Dairesel kesitli çıkış kanalının görüntüsü ve sisteme bağlantısı.

## DC Güç Kaynağı

Manyetiklenebilen FNA'ya DC manyetik alan uygulamak için TT TECHNIC marka ve RXN 605D model güç kaynağı kullanılmıştır. 0-60V güç ve 0-5A akım sağlayabilen bu ekipman  $\leq 0,01 + \%2mV$  gerilim kararlılığına ve  $\leq 0,01 + \%3mA$  akım kararlılığına sahiptir.

## Elektromıknatıs

Manyetiklenebilen FNA'ya DC manyetik alan uygulamak ve istenilen  $B=0,01T$ ,  $0,03T$ ,  $0,05T$ ,  $0,1T$ ,  $0,3T$  ve  $0,5T$  manyetik alan şiddetlerinde ulaşabilmek için 20 mm çapındaki saf demir çubuk etrafına 3000 siper yaparak elde edilen bobin kullanılmıştır. Bobin direnci  $28 \Omega$  olup,  $0,16 T/A$  manyetik alan şiddeti

üretebilmektedir. Farklı manyetik alan kutbu oluşturabilmek için 2 adet özdeş elektromıknatıs 1125 mm uzunluğundaki çıkış kanalının tam ortasına yerleştirilmiştir.

### **Rezervuar**

Dairesel kesitli çıkış kanalından gelen akışkanın depolanmasını ve akışkanın depolanmasıyla pompa emişine kesintisiz akışkan sağlayan şeffaf mika malzemedен imal edilmiş ekipmandır.

### **3.1.1.2. Veri Ölçüm ve Yardımcı Ekipmanlar**

#### **Debimetre Göstergesi**

Türbin tip debimetreden gelen sinyali okuyarak lt/dk cinsinden debinin okunmasına ve bu sayede Ana Ekipmanlar bölümünde açıklanan küresel vana ile sistemin Re değerinin belirlenmesini sağlayan ekipmandır. GENTEK marka GNT605 model olan bu ekipman 2x4 dijit göstergelidir ve %0,1 ölçüm hassasiyetine sahiptir.

#### **Fark Basınç Transmitteri ve Göstergesi**

Sistemdeki basınç kayıplarını belirlemek için dairesel kesitli ani genişleyen kanalın giriş ve çıkışı arasına bağlanan ve maksimum 600 mbar fark basınç ölçebilen VFA marka VF-BFT10-210 model basınç transmitteri kullanılmıştır. %0,5 ölçüm hassasiyetine sahip bu ekipman Eşitlik 3.13 yardımıyla Darcy sürtünme faktörünü hesaplamak için basınç kaybının bilinmesi amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca transmitterden gelen 4-20 mA sinyali mbar basınç değerinde okunabilmesini sağlayan VFA marka ve VF-UPI7-2200-23 model dijital göstergeden yararlanılmıştır. Cihaz 2x4 dijit göstergeli olacak şekilde seçilmiştir ve %0,3 ölçüm hassasiyetine sahiptir.

## **Isıtıcı Kablo**

Deney setindeki çıkış kanalı yüzeyine  $q''=600 \text{ W/m}^2$  değerinde ısı akısı uygulamak için elektrik direnci yardımıyla birim uzunluk başına 50 W ısı üreten ısıtıcı kablolar kullanılmıştır. Literatürde “Joule Heating” olarak da bilinen bu fenomende gerekli kablo mesafesi için kanal yüzey alanı Solidworks’te oluşturulan akış datasından elde edilmiştir ve değeri  $0.09409 \text{ m}^2$  olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak yaklaşık 1,13 m ısıtıcı kablo çıkış kanalı yüzeyine eşit hatve boyunda sarılmıştır.

## **Ayar Kısıcı (Dimmer)**

Dairesel kesitli kanal yüzeyine ısı akısı uygulamak amacıyla kullanılan ısıtıcı kablonun güç ayarının yapılabildiği ekipmandır.

## **Wattmetre**

Dairesel kesitli kanal yüzeyine ısı akısı uygulamak amacıyla kullanılan ısıtıcı kabloya güç veren, %2,0 doğruluk oranına sahip, LAB-VOLT marka ve 8431-05 model ekipmandır.

## **Gaussmetre**

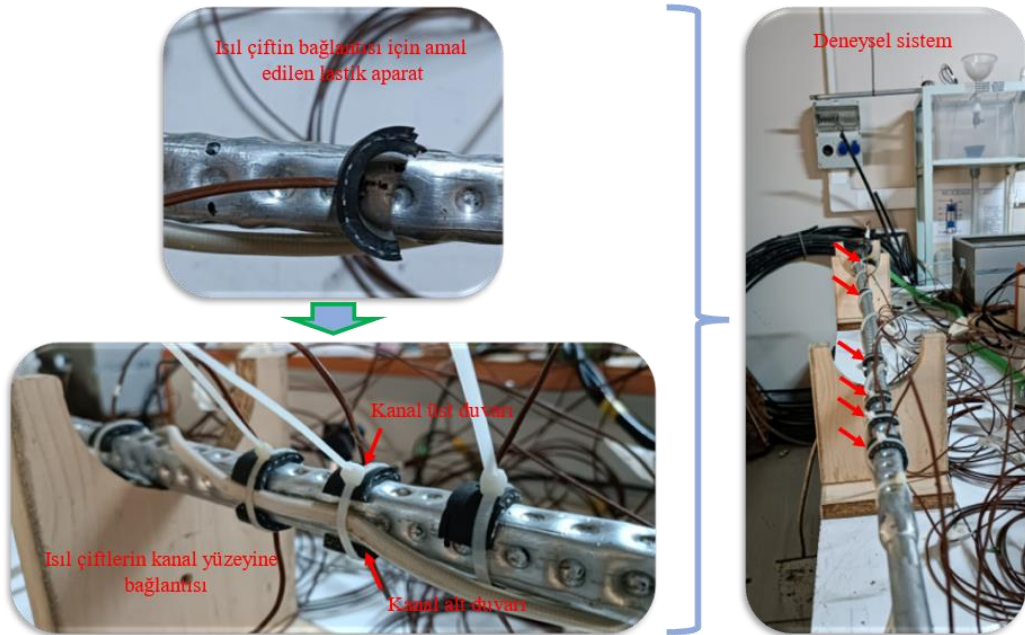
Yapılan deneysel çalışmalarda manyetik alan yoğunluğunu belirlemek amacıyla kullanılan ekipmandır. Kullanılan Gaussmetre HT201 marka olan bu ekipman ile manyetik alan ölçümü yaparken probun uç noktası elektromıknatısları merkezine gelecek şekilde ayarlanmıştır.

## **Cam Yünü**

Isı akısı uygulanan çıkış kanalındaki ısı kayıplarını en az seviyeye indirmek için ısı iletkenliği  $0,035 \text{ W/mK}$  ve kalınlığı 24 mm olan alüminyum folyo kaplı cam yünü yalıtım malzemesi kullanılmıştır. İzolasyon malzemesi plastik kelepçeler yardımıyla sabitlenmiştir.

## Isıl Çiftler

Deney düzeneğinde akışkan, yüzey ve ortam sıcaklıklarını ölçmek amacıyla kullanılan ekipmandır. ORDEL marka olan bu ısı çiftleri T tipi olup, düzenek üzerindeki farklı noktalardan aldığı veriyi Veri Kaydedici yardımıyla bilgisayar ortamına aktarmaktadır. Isıl çiftlerin bağlantısı Şekil 3.6’da verilmiş olup, plastik kelepçeler yardımıyla test kanalına sabitlenmiştir. Isıl çiftlerin uç noktaları ise çukur kanatların merkez noktasına gelecek şekilde yerleştirilip lastik destek içerisinden geçirilerek özel yapılandırıcı yardımıyla sabitlenmiştir. Isı transferi hesaplamaları için önem taşıyan duvar sıcaklığını ölçmek için ısı akısı uygulanan çıkış kanalının alt ve üst duvarında karşılıklı olacak şekilde altı farklı lokasyon için toplam 12 ısı çifti kullanılmıştır. Bu ısı çiftlerinden 6 tanesi yeniden birleşme noktasındaki ısı transferini detaylı olarak araştırabilmek için ani genişleme sonrasına 4 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Kalan 6 adet ısı çifti ise kanal çıkışına doğru 40 cm aralıklarla kanal yüzeyine yerleştirilmiştir. Sistemde toplam 20 adet ısı çifti kullanılmış olup, kalan ısı çiftlerinden 1’er tanesi sırasıyla sisteme giren akışkanın sıcaklığını, deneyin gerçekleştirildiği laboratuvarın ortam sıcaklığını ve rezervuardaki akışkanın sıcaklığını, 3 tanesi sistemden çıkan akışkanın sıcaklığını ve 2 tanesi izolasyon sıcaklığını ölçmek için yerleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Isıl çiftlerin bağlantısı.

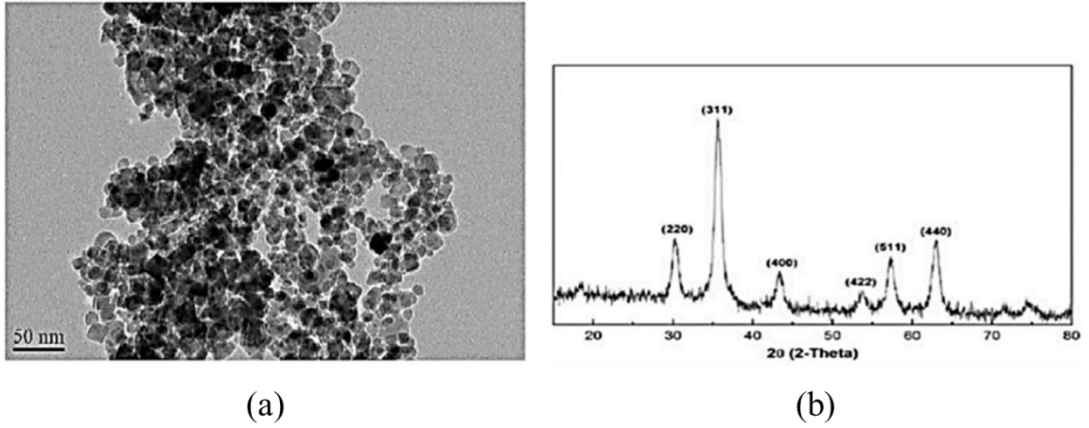


## Veri Kaydedicisi ve Dönüştürücüsü

Deney düzeneğinde dairesel kesitli kanal üzerindeki sıcaklıkları ölçmek için yerleştirilen 20 adet ısı çiftten alınan verileri toplamak amacıyla ORDEL marka UDL200 model veri kaydedici, veri kaydediciden alınan bilgileri dijital ortama aktarmak için ise ORDEL marka SBD200 model veri dönüştürücü kullanılmış olup, lokal sıcaklık değerleri DaLi 485 yazılımı yardımıyla hem takip edilmiş hem de kayıt altına alınmıştır.

### 3.1.2. Nanopartikül temini ve nanoakışkan üretimi

Deneylerde kullanılacak olan FNF nanoakışkanı için gerekli olan ve termofiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de ayrıntılı olarak verilen  $Fe_3O_4$  nanopartikülleri Nanografi firmasından temin edilmiştir. Şekil 3.7’de yer alan SEM ve XRD görsellerinden de anlaşılacağı üzere nanopartiküllerin ortalama boyutu 14-29 nm olup, %99,5 oranında yüksek saflık değerine sahiptir.

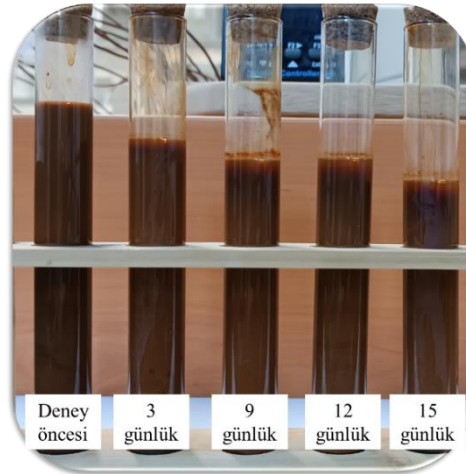


Şekil 3.7.  $Fe_3O_4$  nanopartiküllerine ait; (a) SEM ve (b) XRD görüntüleri.

Çizelge 3.1. H<sub>2</sub>O ve Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanopartikülünün termofiziksel özellikleri [86].

Termofiziksel Özellik	Akışkan/Partikül	
	H <sub>2</sub> O	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Yoğunluk, $\rho$ , (kg/m <sup>3</sup> )	998	5180
Termal İletkenlik, $k$ , (W/mK)	0.600	9.6
Dinamik Viskozite, $\mu$ , (Pa.s)	1.003x10 <sup>-3</sup>	-
Özgül Isı, $c_p$ , (J/kgK)	4182	670
Manyetik geçirgenlik, $\mu_{mf}$ , (H/m)	1.25e <sup>-6</sup>	8.80e <sup>-6</sup>
Elektriksel İletkenlik, $\sigma$ , (S/m)	0.05	25000

Temin edilen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanopartiküllerinden  $\phi=2,0\%$  konsantrasyonuna sahip FNA elde etmek için ikili adım metodundan [94] yararlanılmıştır. Bu yöntemden yola çıkarak ilk olarak satın alma yöntemi ile kuru Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanopartikülleri temin edilmiştir. İkinci adımda ise nanopartiküller su içerisine dağıtılmış ve ultrasonik vibrasyon [95] ile karıştırma yapan cihaza aktarılmıştır. Ultrasonik vibrasyon cihazı olarak 180W ısıtma gücüne ve 4 litre doldurma haznesine sahip Alex marka ürün kullanılmıştır. Nanopartiküller 60 dakika boyunca 80°C sıcaklık altında ultrasonik karıştırma işlemine maruz bırakılmıştır. Ultrasonik karıştırma işlemi elde edilen FNA'nın çökeltme miktarını Çökeltme Fotoğraf Yöntemi [96] ile tespit edebilmek için 15 günlük sürede belli aralıklarla tekrar edilmiştir. Bu periyodun başlangıcından FNA'nın sisteme entegresine kadar alınan numunelerin çökeltme oranları Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Elde edilen görselden de anlaşılacağı üzere sürecin 9. gününde çökelmelerin başladığı görülmüştür. Ancak genel olarak ifade edildiğinde FNA'ya ait çökeltme eğiliminin oldukça iyi durumda olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.8. FNF'deki çökeltme eğiliminin Çökeltme Fotoğraf Yöntemi ile belirlenmesi.

### 3.1.3. Deneysel Süreç

Gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarına göre geometrik ve nanoakışkan parametreleri bakımında en yüksek PDK'ya sahip durumun deneysel çalışması yapılabilmesi için parametre ve değişkenlerin belirlenmesinin yanı sıra ilk olarak deneysel planların yapılması ve ekipmanların deneye uygunlukları ile ölçüm değerlerinin tutarlılığı önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra sistemin hem hidrodinamik olarak hem de ısıl olarak rejime girme süreleri kontrol edilmesi akışkana uygulanacak manyetik alanın ısı transferi ve akış karakteristiğine etkisi net olarak belirlenebilmesi açısından da önemlidir. Çalışma boyunca gerçekleştirilen deneyler Çizelge 3.2'de verilmiş olup, yirmi dört farklı deneysel çalışma üç tekrar ile yürütülmüştür.

Çizelge 3.2. Ani genişleyen dairesel kesitli kanalda gerçekleştirilen deneyler ve değişkenleri.

Deney No	Re	Akışkan		Manyetik Alan Şiddeti, B (T)						
		Su	FNA	0	0,01	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5
		$\phi$								
1.	1000	%100,0	%0,0	X	-	-	-	-	-	-
2.	1500	%100,0	%0,0	X	-	-	-	-	-	-
3.	2000	%100,0	%0,0	X	-	-	-	-	-	-
4.	1000	%98,0	%2,0	X	-	-	-	-	-	-
5.	1000	%98,0	%2,0	-	X	-	-	-	-	-
6.	1000	%98,0	%2,0	-	-	X	-	-	-	-
7.	1000	%98,0	%2,0	-	-	-	X	-	-	-
8.	1000	%98,0	%2,0	-	-	-	-	X	-	-
9.	1000	%98,0	%2,0	-	-	-	-	-	X	-
10.	1000	%98,0	%2,0	-	-	-	-	-	-	X
11.	1500	%98,0	%2,0	X	-	-	-	-	-	-
12.	1500	%98,0	%2,0	-	X	-	-	-	-	-
13.	1500	%98,0	%2,0	-	-	X	-	-	-	-
14.	1500	%98,0	%2,0	-	-	-	X	-	-	-
15.	1500	%98,0	%2,0	-	-	-	-	X	-	-
16.	1500	%98,0	%2,0	-	-	-	-	-	X	-
17.	1500	%98,0	%2,0	-	-	-	-	-	-	X
18.	2000	%98,0	%2,0	X	-	-	-	-	-	-
19.	2000	%98,0	%2,0	-	X	-	-	-	-	-
20.	2000	%98,0	%2,0	-	-	X	-	-	-	-
21.	2000	%98,0	%2,0	-	-	-	X	-	-	-
22.	2000	%98,0	%2,0	-	-	-	-	X	-	-

Çizelge 3.2. (devam ediyor).

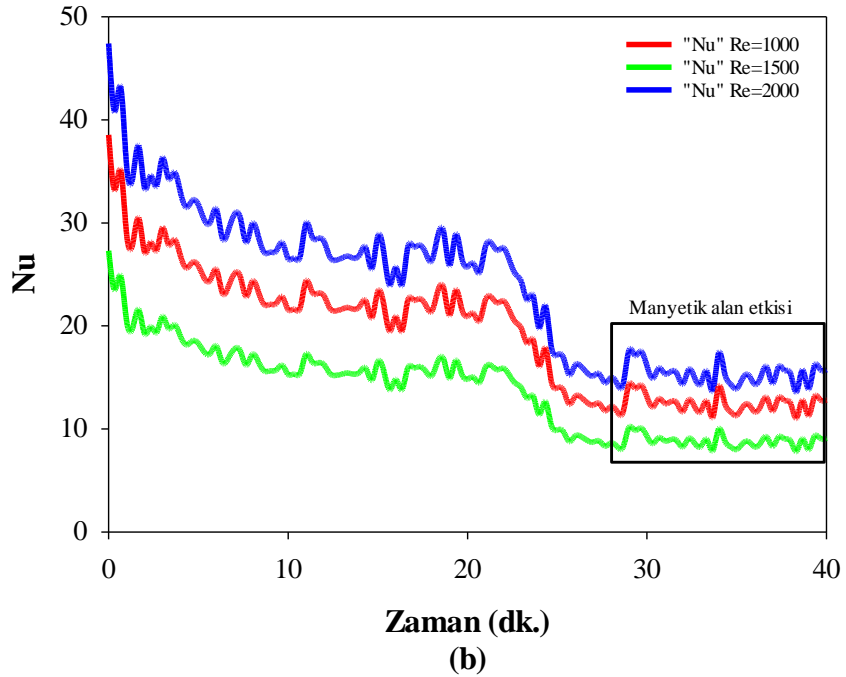
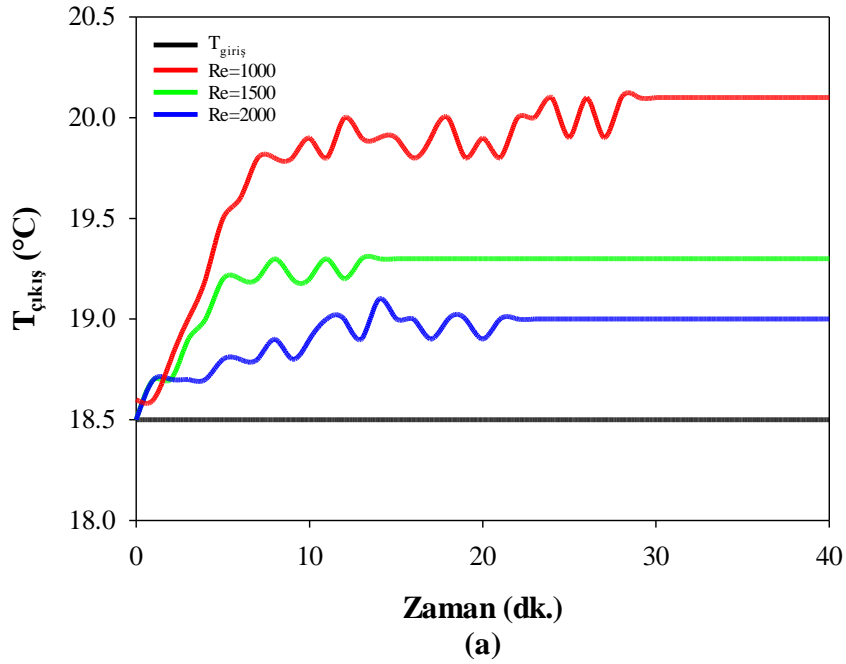
23.	2000	%98,0	%2,0	-	-	-	-	-	X	-
24.	2000	%98,0	%2,0	-	-	-	-	-	-	X

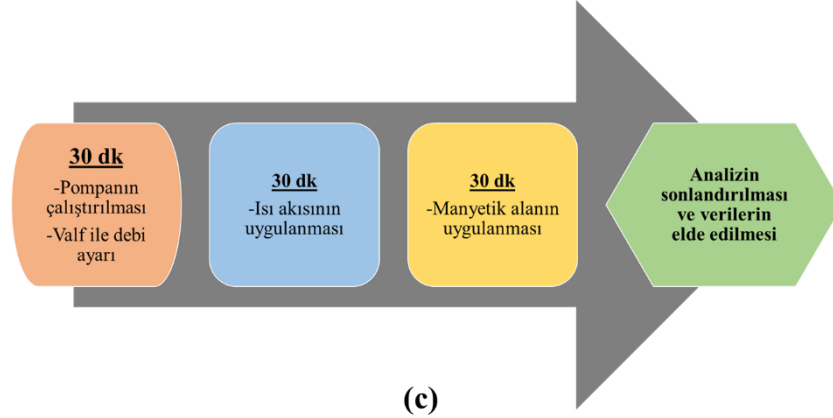
X: Yapılan deneyi ve parametrelerini belirtmektedir.

Deneysel çalışmada ilk olarak pompa çalıştırılmış ve pompa çıkış hattında bulunan vana yardımıyla istenilen debiye ayarlama yapılmıştır. Akışın hidrodinamik olarak tam gelişmesi zaman aldığı için debimetre göstergesinden anlık okunan değer takip edilerek görülen değişikliğe bağlı olarak vanada açma veya kapama işlemleri yapılmıştır. Elde edilen debi değerinin sabit kaldığı gözlemlendiğinde değer kayıt altına alınmıştır. Ardından Wattmetre yardımıyla kablolu ısıtıcı enerjilendirilerek çukur kanadın olduğu dairesel kesitli kanal yüzeyine ısı akısı uygulanmış olup, göstergede okunan değer kaydedilmiştir. Ayrıca, deneysel sistemin giriş ve çıkışı arasında ölçüm yapan bir adet fark basınç transmitteri yerleştirilerek deney süresi boyunca gözlemlenen basınç değerleri 2 dakika aralıklarla transmitterin sinyal gönderdiği gösterge üzerinden kayıt altına alınmış olup, bu sayede sistemdeki basınç kaybı hesaplanmıştır.

Bu noktadan itibaren akışın ısıl olarak tam gelişmiş hale gelme süresi bilinmelidir. Bunun için deneysel çalışmalara başlamadan önce ön çalışmaların yapılması ve manyetik alan uygulanmadan önce sistemin hem hidrodinamik hem de ısıl olarak tam gelişmiş halde olması için gerekli sürenin bilinmesi gerekmektedir. Yapılan ön çalışmada elde edilen tam gelişmiş rejim süresinin literatürdeki deneysel çalışmalar ile de tutarlılık göstermesi büyük önem arz etmektedir. Tam gelişmiş rejim süresini elde edebilmek için  $Re=1000$ ,  $1500$  ve  $2000$  akış rejimindeki  $\phi=\%2,0$  FNA'nın kullanıldığı bir deneysel süreç oluşturulmuştur. Pompanın çalıştırılması ve istenilen debinin elde edilerek akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş rejime ulaşması yaklaşık 30 dk sürmüştür. Ardından Wattmetre yardımıyla boru yüzeyine ısı akısı uygulanmış ve ısıl çiftlerden elde edilen sıcaklık değerleri 1 sn aralıklarla veri kaydedici yardımıyla gözlemlenmiştir. Bu noktaya kadar yapılan işlemlere bağlı olarak elde edilen veriler doğrultusunda ortalama çıkış sıcaklığının Şekil 3.9 (a)'da gösterildiği gibi 30 dk sonra değişmediği ve kararlı hale gelerek sistemin ısıl rejime ulaştığı gözlemlenmiştir. Ardından elektromıknatıs yardımıyla nanoakışkana  $B=0,5T$

şiddetinde manyetik alan uygulanmıştır. Bu noktadan itibaren ortalama Nu değerindeki değişim gözlemlenmiş olup, 30 dk sonra ortalama Nu değerinin kararlı hale geldiği Şekil 3.9 (b) gözlemlenmiştir. Deneysel olarak yapılan ön çalışmadan elde edilen veriler ışığında akışın hidrodinamik olarak tam gelişmiş rejime girdiği süre ile manyetik alanın uygulanmadığı ve manyetik alanın uygulandığı durumlarda ortalama Nu değerinin kararlı hale gelerek akışın ısıl olarak tam gelişmiş rejime ulaştığı süreler Şekil 3.9 (c)'de özetlenmiştir.

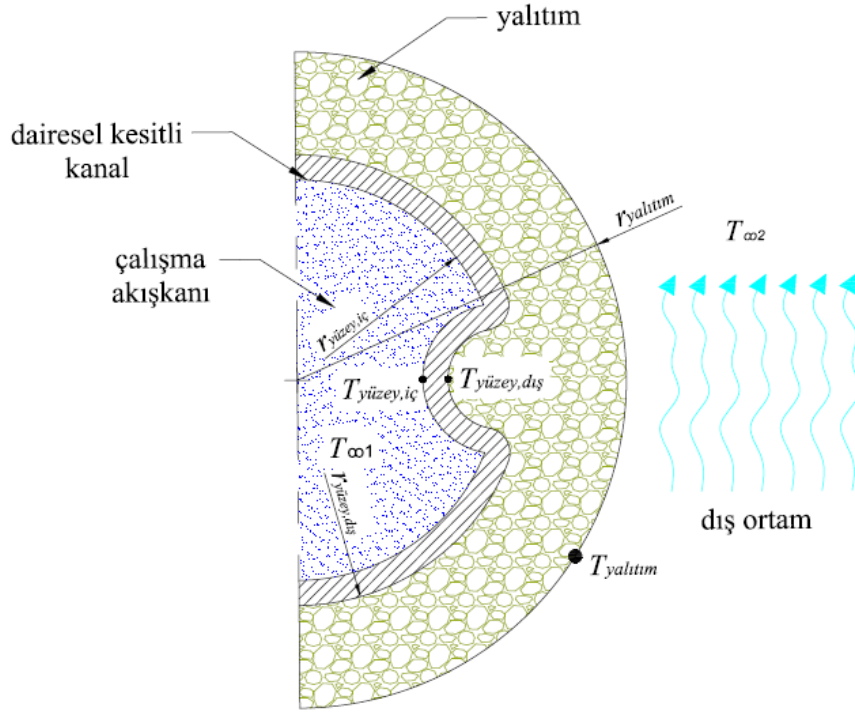




Şekil 3.9. Deneysel süreçte uygulanacak işlemlerin farklı akış rejimlerindeki kararlılık sürelerine ilişkin tespit çalışmaları; (a) çıkış sıcaklığının değişimi, (b) manyetik alanın uygulanması ve (c) deneysel uygulama adımları.

#### 3.1.4. Deneysel Verilerin Analizi

Deneysel düzeneğinde ısı akısı uygulanan dairesel kesitli kanal içerisinde akan akışkanın kanal yüzeyindeki sıcaklıkları ölçülemediği için mevcut ısı çiftleri tarafından ölçülen değerler ile Termodinamik ve Isı Transferi denklemleri kullanılarak akışkan sıcaklıkları hesaplanmıştır. Deneysel düzeneği göz önüne alındığında dairesel kesitli kanalda gerçekleşen ısı transfer mekanizmalarının şematik resmi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Kablolulu ısıtıcı tarafından dairesel kesitli kanal yüzeyine uygulanan ısı hem akışkana doğru hem de dış ortama doğru yönlendiği gerçeği göz önüne alındığında bu durum Termodinamiğin I. Yasasında Eşitlik 3.1'deki gibi ifade edilir.



Şekil 3.10. Dairesel kesitli kanalın şematik gösterimi.

$$\dot{E} = \dot{Q}_{\text{kanal}} + \dot{Q}_{\text{yalıtım}} \quad (3.1)$$

Denklemdaki  $\dot{E}$  (W) ısıtıcı kablo yardımıyla birim zamanda aktarılan enerjiyi,  $\dot{Q}_{\text{kanal}}$  (W) kanal iç duvarına doğru iletimle aktarılan enerjiyi,  $\dot{Q}_{\text{yalıtım}}$  (W) ise yalıtımın dış duvarına doğru iletimle aktarılan enerjiyi belirtmektedir. Isıtıcı kablo tarafından aktarılan enerji Eşitlik 3.2 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E} = L_{\text{IK}} \dot{P} \quad (3.2)$$

Burada,  $L_{\text{IK}}$  (m) dairesel kesitli kanal üzerine sarılan ısıtıcı kablunun uzunluğunu,  $\dot{P}$  (W/m) ise ısıtıcı kablunun birim uzunluğu başına ısıtma kapasitesini belirtmektedir. Dairesel kesitli kanal iç yüzey sıcaklığını belirlemek için ilk olarak yalıtım malzemesi üzerinden geçen  $\dot{Q}_{\text{yalıtım}}$  (W) değerinin bilinmesi gerekir. Bunun

için Fourier Isı İletim Kanunda [97] Eşitlik 3.3'ten türetilen ve silindirik yüzeyler için tanımlanan Eşitlik 3.4 kullanılır.

$$\dot{Q}_{\text{iletim,silindir}} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (3.3)$$

$$\dot{Q}_{\text{yalıtım}} = 2\pi L k_{\text{yalıtım}} \frac{T_{\text{yüzey,dış}} - T_{\text{yalıtım}}}{\ln\left(\frac{r_{\text{yalıtım}}}{r_{\text{yüzey,dış}}}\right)} \quad (3.4)$$

Denklemdaki L (m) dairesel kesitli kanal boyunu,  $k_{\text{yalıtım}}$  (W/mK) boru yüzeyine sarılan yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısını,  $T_{\text{yüzey,dış}}$  (°C) ısıtıcı kabloların sarılı olduğu kanal yüzeyinin sıcaklığını,  $T_{\text{yalıtım}}$  (°C) yalıtım malzemesinin dış yüzey sıcaklığını,  $r_{\text{yalıtım}}$  (m) izolasyon malzemesinin dış yüzey yarıçapını,  $r_{\text{yüzey,dış}}$  (m) ise kanalın dış yüzey yarıçapını belirtmektedir.  $\dot{Q}_{\text{yalıtım}}$  (W) değerinin elde edilmesinden sonra Eşitlik 3.5 kullanılarak  $\dot{Q}_{\text{kanal}}$  (W) değeri hesaplanır ve ısıl çiftler yardımıyla ölçülen kanal dış yüzey sıcaklıkları vasıtasıyla kanalın iç yüzey sıcaklıkları Eşitlik 3.6 yardımıyla belirlenir.

$$\dot{Q}_{\text{kanal}} = 2\pi L k_{\text{kanal}} \frac{T_{\text{yüzey,dış}} - T_{\text{yüzey,iç}}}{\ln\left(\frac{r_{\text{yüzey,iç}}}{r_{\text{yüzey,dış}}}\right)} \quad (3.5)$$

$$T_{\text{yüzey,iç}} = T_{\text{yüzey,dış}} - \frac{\dot{Q}_{\text{kanal}} \ln\left(\frac{r_{\text{yüzey,iç}}}{r_{\text{yüzey,dış}}}\right)}{2\pi L k_{\text{kanal}}} \quad (3.6)$$

Burada,  $k_{\text{kanal}}$  (W/mK) dairesel kesitli kanalın imal edildiği malzemenin ısı iletim katsayısını,  $T_{\text{yüzey,iç}}$  (°C) akışkanın kanal yüzeyi ile temas ettiği noktadaki iç yüzey sıcaklığını,  $r_{\text{yüzey,iç}}$  (m) ise kanalın iç yüzey yarıçapını belirtmektedir. Bu denklem yardımıyla dairesel kesitli kanalın dış yüzeyinden alınan sıcaklık değerlerinin karşılığı olan iç yüzey sıcaklık değerleri belirlenerek ortalama Nu değeri için gerekli



olan ve Eşitlik 3.6’da verilen  $h$  (W/mK) ısı taşınım katsayısı Newton Soğutma Kanunundan [97] yararlanılarak hesaplanabilir.

$$h = \frac{\dot{Q}_{\text{kanal}}}{A_{\text{kanal}} (T_w - T_b)} \quad (3.7)$$

Denklemdaki  $A_{\text{kanal}}$  ( $m^2$ ) dairesel kesitli kanalın iç yüzey alanını,  $T_w$  ( $^{\circ}C$ ) Eşitlik 3.8 ile hesaplanan dairesel kesitli kanalın iç yüzey sıcaklıklarının aritmetik ortalamasını,  $T_b$  ( $^{\circ}C$ ) ise Eşitlik 3.9 ile ifade edilen giriş ve çıkış sıcaklıklarının ortalaması olan yığın sıcaklığı belirtmektedir. Dairesel kanalın iç yüzey alanı ANSYS Design Modeller’da oluşturulan akış datasından elde edilmiştir ve değeri  $0.05941 m^2$  olarak ölçülmüştür. Yığın sıcaklığın belirlenmesinde tek ısı çift kullanılarak ölçülen çalışma akışkanının kanal giriş sıcaklığı ile üç ısı çift yardımıyla ölçülen ve aritmetik ortalaması alınan çalışma akışkanı çıkış sıcaklığının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanır.

$$T_w = \frac{T_{\text{yüzey,iç1}} + T_{\text{yüzey,iç2}} + T_{\text{yüzey,iç3}} + \dots + T_{\text{yüzey,iç12}}}{12} \quad (3.8)$$

$$T_b = \frac{T_{\text{giriş}} + \left( \frac{T_{\text{çıkış1}} + T_{\text{çıkış2}} + T_{\text{çıkış3}}}{3} \right)}{2} \quad (3.9)$$

Dairesel kesitli kanal ve çalışma akışkanı arasındaki ısı transferini belirleyen  $h$  ( $W/m^2K$ ) ısı taşınım katsayısının hesaplanmasından sonra denklemdaki değişken sayısını azaltmak ve bu değişkenleri boyutsuzlaştırmak için Eşitlik 3.10’da verilen ortalama Nu sayısı [98] kullanılır.

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

Burada,  $D$  (m) dairesel kesitli kanalın çapını,  $k$  (W/mK) sistemdeki çalışma akışkanının ısı iletim katsayısı temsil etmektedir. Diğer yandan sistemdeki akışın karakteristiğini belirleyebilmek amacıyla  $l/dk$  biriminde ölçülen sistem debisinin

Eşitlik 3.11 yardımıyla dönüşümü yapılarak  $V$  (m/s) akış hızı belirlenmiştir. Akış hızı ise Eşitlik 3.12 kullanılarak deneyin akış karakteristiklerini belirleyen  $Re$  sayısı [98] tespit edilmiştir.

$$V = \frac{240000 \dot{V}}{\pi D^2} \quad (3.11)$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.12)$$

Denklemdaki  $\dot{V}$  (lt/dk),  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) ve  $\mu$  (kg/ms) sırasıyla çalışma akışkanının debisini, yoğunluğunu ve dinamik viskozitesini ifade etmektedir. Sistemde akışkanın kanal yüzeyi ile teması sonucu oluşan viskoz kuvvetler ve akışkanın çukur kanat yapılarına çarpmasından dolayı  $\Delta P$  (Pa) basınç kayıpları meydana gelir. Oluşan bu basınç farkını ölçmek için sistemin giriş ve çıkış hatlarına bağlantısı yapılan fark basınç transmitteri kullanılmıştır. Sistemde oluşan basınç farkı zorlanmış taşınım için gerekli olan pompalama gücü arttırarak hem kurulum hem de işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Oluşan basınç farkı ile ortalama  $f$  Eşitlik 3.13'te verilen Darcy-Weisbach denklemi [99] ile hesaplanabilir.

Bununla birlikte ısı transferi ve akış karakteristiğinin birlikte incelendiği sistemlerde ısı transferini arttırmak amacıyla gerçekleştirilen yapısal ve termofiziksel değişikliklerin ilave pompa gücüne ihtiyaç oluşturması durumunda sistemde yapılacak değişikliğin efektif olup olmadığı belirlemek amacıyla Eşitlik 3.14'te verilen PDK kullanılır. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde elde edilen değer  $PDK > 1$  olması durumunda ısı transferindeki artışın basınçta meydana gelen düşüğe üstün gelerek yapılan çalışmanın efektif olduğu anlaşılmaktadır. PDK değerlendirmesinin son yıllarda nanoakışkanlar ile ilgili yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanıldığı da belirlenmiştir [100–102].

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{\rho V^2}{2}\right)} \quad (3.13)$$

$$PDK = \frac{\left( \frac{Nu_{na}}{Nu_{ba}} \right)}{\left( \frac{f_{na}}{f_{ba}} \right)} \quad (3.14)$$

Yapılan bu çalışmada hem çukur kanat yapısının hem de nanoakışkan etkisini tespit edebilmek için denklemden yer alan  $Nu_{na}$  ve  $f_{na}$  çalışma akışkanı olarak nanoakışkanın kullanıldığı dairesel kesitli çukur kanat yapısına sahip kanaldan,  $Nu_{ba}$  ve  $f_{ba}$  ise çalışma akışkanı olarak  $H_2O$ 'nun kullanıldığı dairesel kesitli düz yüzeye sahip kanaldan elde edilmiştir. Bu sayede çukur kanat ve nanoakışkan kullanımının efektifliği kolaylıkla göz önüne serilmektedir.

### 3.1.5. Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, deneysel verilerin doğruluk sınırını belirlemek amacıyla yapılmakta olup, sonuçların doğruluğunu belirlemede büyük önem arz etmektedir. Deneysel çalışmalarda meydana gelen belirsizlik ortam koşullarından, deney şartlarından, ölçüm ekipmanlarının seçiminden, ölçüm ekipmanlarının yanlış dizaynından, skala hatalarından ve ölçüm yapan kişilerden kaynaklanabilir.

Bu çalışmada yürütülecek belirsizlik analizi için kullanılan Moffat metodu literatürde en çok kullanılan metotlardan biridir [103,104]. Bu metot yardımıyla deney düzeneğinde yer alan ölçüm ekipmanları ile analitik değerlerin belirsizlikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Ayrıca deney düzeneğinde yer alan ölçüm ekipmanlarının belirsizlikleri standart sapma hesaplamaları göz önüne alınarak aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$X_m = \frac{1}{N} \sum X_i \quad (3.15)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{(N-1)} \sum (X_i^2 - X_m^2) \quad (3.16)$$

$$\sigma = \sqrt{V} \quad (3.17)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (3.18)$$

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^R a_i^2 \cdot S_i^2} \quad (3.19)$$

Denklemlerde yer alan  $X_m$  gözlemlerin aritmetik ortalamasını,  $N$  gözlem sayısını,  $X_i$  yapılan gözlemleri,  $\sigma^2$  varyansı,  $\sigma$  standart sapmayı,  $a$  hassasiyeti,  $U$  ise belirsizliği göstermektedir [105]. Yapılan belirsizlik analizi sonuçları detaylı olarak EK AÇIKLAMALAR B’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Ölçüm ekipmanları ve analitik değerlerin belirsizlikleri.

Cihaz	Değişken	Hassasiyet	Belirsizlik (%)	
			Min.	Maks.
Ordell T Tip Isıl Çift	Yığın Sıcaklık	$\pm 0,1$ °C	0,649	0,766
	Duvar Sıcaklığı	$\pm 0,2$ °C	5,985	6,531
VFA / VF-M1-25	Debimetre	$\pm \%1$	0,061	0,062
Isıtıcı Kablo 50 W/m	Isıtıcı Gücü	$\pm 1$ W	1,0	1,0
GENTEK / GNT605	Debimetre Göstergesi	$\pm \%0,1$	0,1	0,1
HT201	Gaussmetre	$\pm 0,0002T$	0,65	0,79
GENTEK / PT124B-210	Fark Basınç	$\pm \%0,5$	0,110	0,113
Değişken Adı			Belirsizlik (%)	
			Min.	Maks.
Reynolds Sayısı			1,0	2,0
Nusselt Sayısı			2,33	2,88

### 3.2. SAYISAL YÖNTEM

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan parametre ve değişkenler kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta birçok geometri için gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarına göre ısı transferi ve akış karakteristiği bakımından en yüksek performans sergileyen durumun sayısal sonuçları bu bölümde detaylı olarak irdelenmiştir. Çalışma kapsamındaki değişkenlere bağlı olarak girişteki dairesel kesitli kanal  $D_1=8, 10$  ve  $14$  mm çapında ve  $375$  mm uzunluğunda, çıkış kanalı ise

$D_2=20$  mm çapında ve 1125 mm uzunluğunda tasarlanmıştır. Çıkış kanalı yüzeyine  $600 \text{ W/m}^2$  değerinde sabit ve tekdüze ısı akısı uygulanmıştır. Sayısal çalışmalarda akışkan olarak  $\text{H}_2\text{O}$  ile  $\phi=\%1,0$  ve  $\%2,0$  olmak üzere iki farklı konsantrasyona sahip  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{H}_2\text{O}$  nanoakışkanı kullanılmıştır. Sayısal çalışmada çıkış kanalının orta bölgesinde nanoakışkana  $B=0,01, 0,03T, 0,05T, 0,1T, 0,3T$  ve  $0,5T$  şiddetlerinde DC manyetik alan uygulanmıştır. Sayısal çalışmadaki ısıl performans ve akış karakteristikleri  $1000 \leq Re \leq 2000$  akış rejiminde ve tek faz modeli ile gerçekleştirilmiştir.

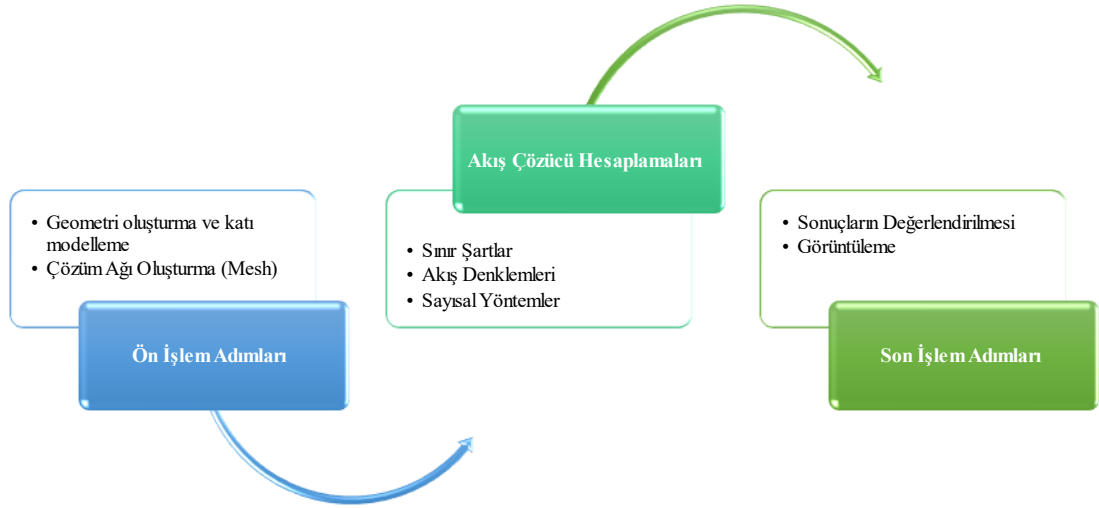
### **3.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği**

Başlangıçta havacılık ve uzay sektörlerinde kendisine kullanım alanı bulan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) teknolojinin ilerlemesi ve yaygınlaşması ile günümüzde birçok mühendislik uygulamalarında karmaşık problemlerin çözümü için kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Akışkanlar mekaniği ve ısı transferi alanlarından ortaya çıkan HAD özellikle termal sistemlerde kullanılmasının yanı sıra, kimya, inşaat ve çevre mühendisliği gibi alanlarda kendisine kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Bir sistem ve bileşenlerinin nihai tasarımları yapılmadan önce HAD simülasyonları yardımıyla incelenerek performansları araştırılabilir. Bu sayede ekipman üretim maliyetleri ile zamandan tasarruf sağlayabilmektedir. Ayrıca mevcut sistem veya ekipman üzerinde de simülasyonlar gerçekleştirilerek performans artışı sağlanabilir. Elde edilen veriler doğrultusunda doğru modernizasyon uygulamaları yapılarak işletme maliyetlerinin önüne geçilebilir. HAD'ın diğer bilim dalları ile ortak noktalarına bakıldığında aslında Şekil 3.11'de gösterildiği gibi mühendislikteki akışkanlar dinamiği, matematik ve bilgisayar bilimlerinin bir parçası olduğu görülebilir.



Şekil 3.11. HAD ile ilişkili olan bilim dalları [106].

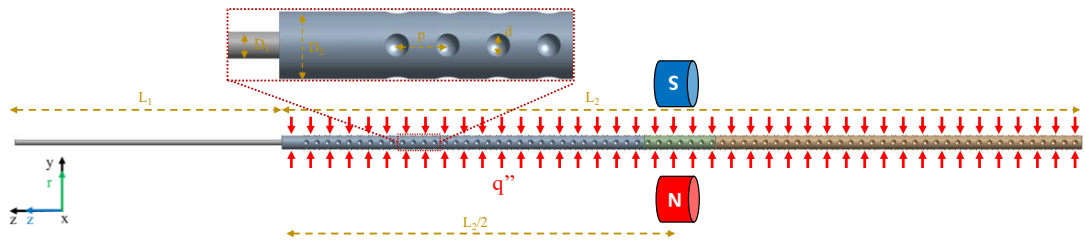
Bir HAD işlemi süresince çözülmesi gereken problem Şekil 3.12’de gösterildiği gibi üç farklı aşamadan geçmektedir. İlk adım olan ön işlem adımları geometrinin oluşturulması ve katı modellemeyi, sonlu hacimler metoduna göre işlem yapıldığı için çözüm ağlarının oluşturulmasını kapsamaktadır. İkinci adım olan akış çözücü hesaplamalarında ise çözücüye problemin çözülmesi için gerekli sınır şartlarının belirtildiği, akış denklemlerinin seçildiği ve sayısal yöntemlerin belirtildiği adımdır. Üçüncü adım olan son işlem adımları ise yapılan analiz sonuçlarının değerlendirildiği ve elde edilen sonuçlara ait görüntülerin alındığı adımdır.



Şekil 3.12. HAD işlem adımları.

### 3.2.2. Geometri ve Ağ Yapısının Oluşturulması

HAD analizlerinde ilk adımı olan ön işlem adımlarında ilk olarak akış geometrisi oluşturulur ve modellemesi yapılır. Ardından akış modeli ikinci adımda gerçekleşecek olan akış çözme işleminin sonlu hacimler metoduna bağlı olarak küçük eleman ve noktalardan oluşan ağ yapısına dönüştürülür. Ön işleme ait bu iki işlem yapıldıktan sonra çözücü programın HAD analiz sürecinde yer alan geometri ve mesh adımları oluşturulmuş olur. Bu adımların gerçekleştirilmesinden sonra analizde çözümü yapılan akış geometrisi Şekil 3.13'teki hale gelmiştir.



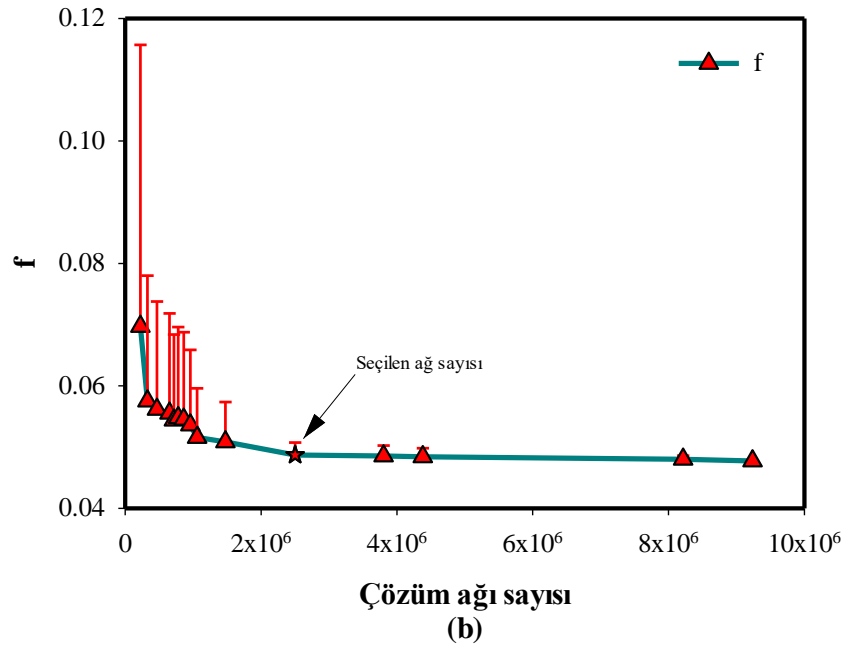
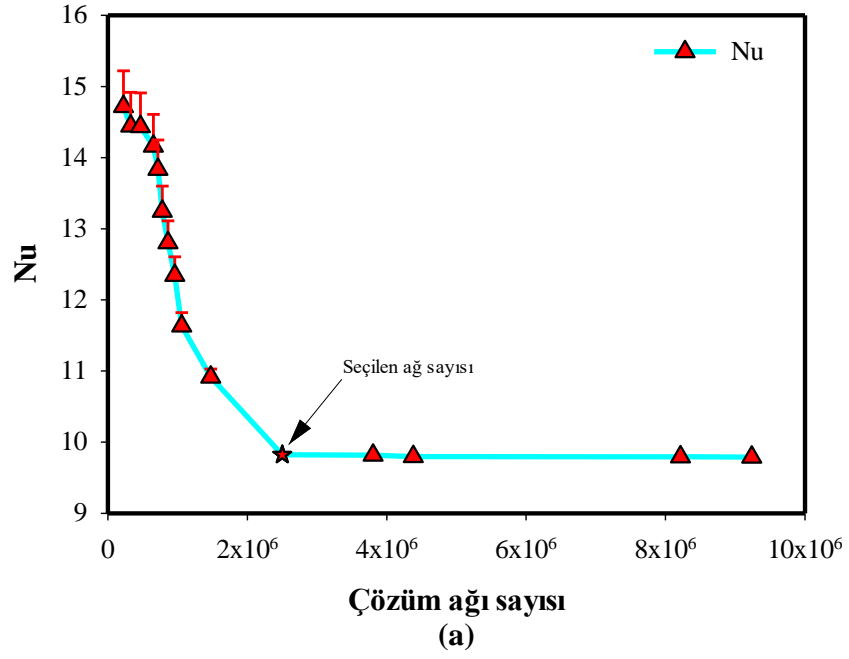
Şekil 3.13. Sayısal analiz akış geometrisi.

Geometride ani genişleme noktasına kadar gelen ve çapı  $D_1=8-10-14$  mm olarak değişen küçük çaplı dairesel kesitli kanalın boyu  $L_1=375$  mm'dir. Ani genişleme noktasından sonra oluşturulan dairesel kesitli kanalın çapı ve uzunluğu ise sırasıyla  $D_1=20$  mm ve  $L_2=1125$  mm'dir. Çapı daha büyük olan dairesel kesitli kanal üzerine

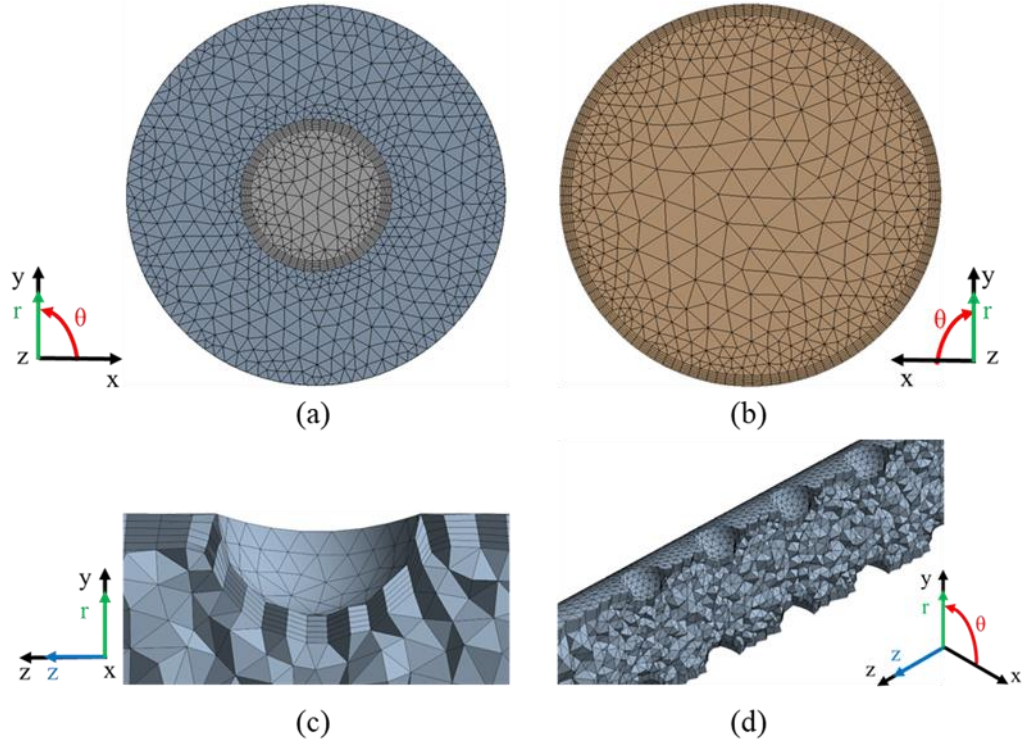
$d=3-5-7$  mm çaplarında ve  $p= 15$  mm aralığında çukur kanatlar yerleştirilmiş olup, kanalın tam orta noktasından ( $L_2/2=562,5$  mm) akışkana  $B=0,01T-0,03T-0,05T-0,1T-0,3T-0,5T$  şiddetlerinde manyetik alan uygulanmıştır. Sayısal analizde manyetik alanın çalışma akışkanı üzerindeki etkisini daha iyi anlayabilmek için kanalın orta noktasındaki 100 mm'lik mesafede daha yoğun ağ yağı oluşturulmuştur.

Oluşturulan geometrilerde sonlu hacimler tekniğine göre analiz gerçekleştirebilmek için geometrinin uygun ağ yapısına sahip olması gerekmektedir. Analizlerden elde edilen sonuçları doğrudan etkileyen bu çözüm ağlarında düşük kaliteli ağ yapısı olması durumunda hücre sayısı azalarak elde edilen sonuçlardaki hata oranı artmaktadır. Yüksek kaliteli ağ yapısı olması durumunda ise hücre sayısı artış göstermekte ve analiz süresi uzamaktadır. Dolayısıyla yapılan sayısal çözümlerinde sonuçlardaki hata oranını ve analiz süresini en az seviyeye indiren uygun ağ yapısı belirlenir. Bu kapsamda çalışmadaki uygun ağ yapısını belirlemek için çalışma akışkanı olarak  $H_2O$ 'nun kullanıldığı  $Re=1000$  akış rejiminde “Çözüm Ağı Yakınsama İşlemi” yapılmıştır. Analizde  $GO=1,4$  ve  $P/d=2,14$  geometrisine sahip ani genişleyen kanal kullanılmıştır. Şekil 3.14 (a)'da verilen  $Nu$  sayısının değişimi ve Şekil 3.14 (b)'deki  $f$ 'ten de anlaşıldığı gibi çözüm ağı sayısı arttıkça analiz sonuçlarının 2499684 çözüm ağı sayısından sonra değişmeyerek yakınsadığı anlaşılabilir. Yapılan çözüm ağı yakınsama işleminden sonra  $H_2O$  ve nanoakışkanlar ile yapılan analizlerde elde edilen çözüm ağı en uygun çözüm ağı olarak kabul edilmiştir ve akış geometrisi çözüm ağı yapıları Şekil 3.15'de gösterilmiştir.





Şekil 3.14. Çözüm ağı yakınsama işlemi; (a) Nu değişimi, (b) f değişimi.



Şekil 3.15. Akış geometrisi çözüm ağı; (a) giriş, (b) çıkış, (c) çukur kanat, (d) çukur kanatlı dairesel kesitli kanal.

### 3.2.3. Korunum Denklemleri ve Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Ani genişlemeli kanal üzerinde gerçekleştirilen analizlerde akışkan olarak  $H_2O$  ve nanoakışkan kullanılmasının yanı sıra, akış karakteristiğinde ve ısı transferinde önemli etkiye sahip manyetik alanın uygulandığı ve uygulanmadığı analiz süreçleri de mevcuttur. Dolayısıyla analiz sürecini doğru yönetebilmek amacıyla manyetik alanın uygulanmadığı  $H_2O$  ve nanoakışkanlar için hidrodinamik korunum denklemi olan Navier-Stokes Denklemleri, manyetik alanın uygulandığı nanoakışkanlar için ise manyetohidrodinamik korunum denklemi olan Navier-Stokes ve Maxwell Denklemleri kullanılmıştır.

Sonlu Hacimler Yöntemine göre yapılan hesaplamalarda her bir akış hacmi için akışın sıkıştırılmaz ve kararlı rejim şartlarında olduğu varsayıldığında süreklilik denklemi Eşitlik 3.20 ile ifade edilmektedir.

$$\vec{\nabla} \vec{V} = 0 \quad (3.20)$$

Denklemden yer alan  $\vec{\nabla}$  sembolü silindirik koordinatlar için kullanılan Laplace operatörünü,  $\vec{V}$  (m/s) ise akış hızını belirtmektedir. Yapılan analizlerde manyetik alanın uygulandığı ve uygulanmadığı durumlar olduğu için yapılan sayısal çalışmada iki farklı momentum denklemi karşımıza çıkmaktadır. Manyetik alan uygulanmadığı ve sıkıştırılmaz kabul edilen akışta Eşitlik 3.21'de verilen momentum denkleminin yararlanılmaktadır.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (3.21)$$

Denklemden  $\nabla^2$  Laplace operatörünü göstermektedir. Manyetik alanın olmadığı, sıkıştırılmaz akışa ait momentum denkleminin r-bileşeni Eşitlik 3.22 ile ifade edilmektedir.

$$\rho \left( V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left( \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right) \quad (3.22)$$

Manyetik alanın olmadığı, sıkıştırılmaz akışa ait momentum denkleminin  $\theta$ -bileşeni Eşitlik 3.23 ile ifade edilmektedir.

$$\rho \left( V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left( \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (3.23)$$

Manyetik alanın olmadığı, sıkıştırılmaz akışa ait momentum denkleminin z-bileşeni Eşitlik 3.24 ile ifade edilmektedir.

$$\rho \left( V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z$$

$$+ \mu \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (3.24)$$

Akış analizinde nanoakışkanın manyetik alan etkisi altında kalması durumunda sıkıştırılmaz olarak kabul edilen akışın genel momentum denkleminde nanoakışkan içerisindeki partiküllere etkiyen  $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$  Lorentz kuvveti Eşitlik 3.25'te belirtildiği gibi Eşitlik 3.21'e dahil edilir.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{j} \times \vec{B} \quad (3.25)$$

Denklemdaki  $\vec{j}$  (A/m<sup>2</sup>) Ohm yasası ile türetilen akım yoğunluğunu,  $\vec{B}$  (T) ise Maxwell denklemleri ile türetilen manyetik alan şiddetini belirtmektedir. Manyetik alanın uygulandığı, sıkıştırılmaz akışa ait momentum denkleminin r-bileşeni Eşitlik 3.26 ile ifade edilmektedir.

$$\rho \left( V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left( \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right) \quad (3.26)$$

$$+ q(E_0 + v_r B_0) B_0$$

Manyetik alanın uygulandığı, sıkıştırılmaz akışa ait momentum denkleminin  $\theta$ -bileşeni Eşitlik 3.27 ile ifade edilmektedir.

$$\rho \left( V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) =$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left( \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (3.27)$$

$$+ q(E_0 + v_\theta B_0) B_0$$

Manyetik alanın uygulandığı, sıkıştırılamaz akışa ait momentum denkleminin z-bileşeni Eşitlik 3.28 ile ifade edilmektedir.

$$\rho \left( V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) + q(E_0 + v_z B_0) B_0 \quad (3.28)$$

Denklemlerde yer alan  $E_0$  (V/m) elektriksel alanı,  $\mu$  (kg/ms) dinamik viskoziteyi,  $q$  (Coulomb/m<sup>3</sup>) nanoakışkan içerisindeki partikül yük yoğunluğunu ve  $g$  (m/s<sup>2</sup>) yer çekimi ivmesini ifade etmektedir.

Tek fazlı sayısal çözüm için manyetik alanın kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için enerji korunum denklemi aşağıda sırasıyla Eşitlik 3.29 ve Eşitlik 3.30'da verilmiştir. Momentum denkleminde olduğu gibi enerji denkleminde de manyetik alan uygulanması ve iletken maddeler üzerinden elektrik akımının geçmesi sonucu oluşan ısının da denkleme dahil edilmesi gerekir. Joule Heating terimi olarak literatürde yer alan bu etki,  $Q = \frac{1}{\sigma} \vec{j} \cdot \vec{j}$  eşitliği ile ifade edilir.

$$\rho c_v \left( V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi \quad (3.29)$$

$$\rho c_v \left( V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi + \frac{1}{\sigma} j^2 \quad (3.30)$$

Bu denklemlerde yer alan  $\Phi$  (W/m<sup>3</sup>) viskoz kuvvetlere karşı harcanan gücü belirten yayılım enerjisini,  $\sigma$  (S/m) ortamın elektriksel iletkenliğini belirtmektedir.

Faz değişiminin olmadığı varsayımı yapılan sayısal analizde baz akışkan ile nanopartikülün belirli hacimsel veya kütleli oranlarda karıştırılması ile oluşan akışkanların  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) yoğunluk,  $k$  (W/mK) ısı iletim katsayısı,  $c_p$  (J/kgK) sabit

basınç altındaki özgül ısı kapasitesi ve  $\mu$  (kg/ms) dinamik viskozite gibi termofiziksel özellikleri değişiklik göstermektedir. Sayısal çalışmada miktar olarak %1,0 ve %2,0 hacimsel konsantrasyon içeren  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{H}_2\text{O}$  nanoakışkanının termofiziksel özelliklerinden yoğunluğu hesaplamak için Eşitlik 3.31’de verilen Pak ve Cho denkleminde faydalanılmıştır [107].

$$\rho_{na} = (1 - \varphi)\rho_{ba} + \varphi\rho_{np} \quad (3.31)$$

Nanoakışkan ısı iletim katsayısını hesaplamak için Eşitlik 3.32’de verilen Hamilton ve Crosser denklemi kullanılmıştır [108].

$$\frac{k_{na}}{k_{ba}} = \frac{k_{np} + 2k_{ba} - 2\varphi(k_{ba} - k_{np})}{k_{np} + 2k_{ba} + \varphi(k_{ba} - k_{np})} \quad (3.32)$$

Nanoakışkanın özgül ısı kapasitesi hesaplamak için Eşitlik 3.33’te ifade edilen Xuan ve Roetzel denklemi kullanılmıştır [109].

$$c_{p,na} = \frac{(1 - \varphi)(\rho c_p)_{ba} + \varphi(\rho c_p)_{np}}{\rho_{na}} \quad (3.33)$$

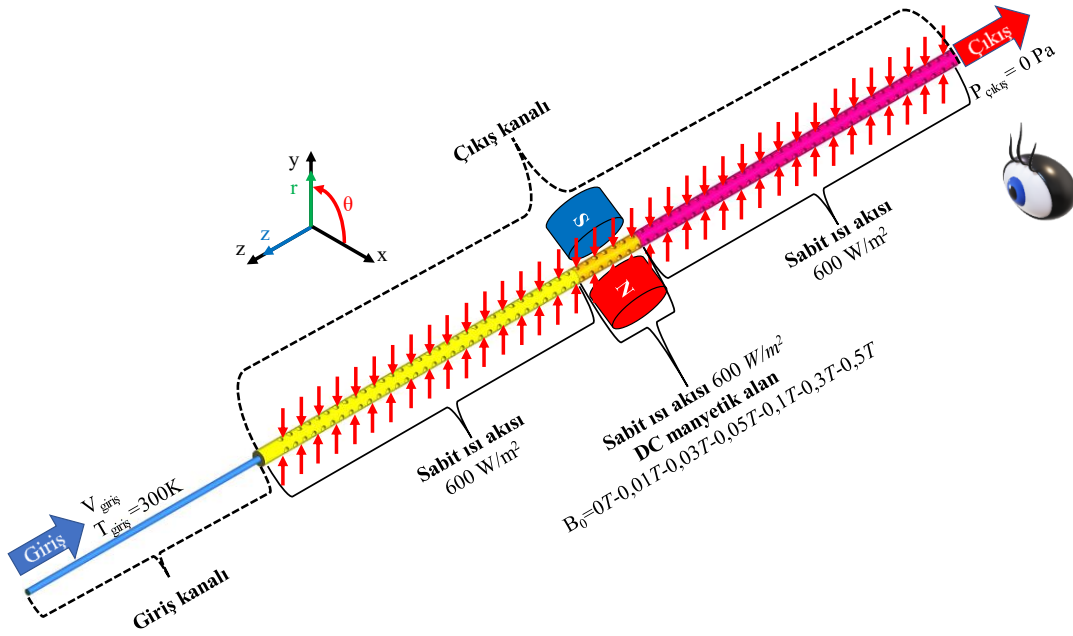
Nanoakışkanın dinamik viskozitesini hesaplamak için Eşitlik 3.34’de verilen Wang denkleminde faydalanılmıştır [110].

$$\mu_{na} = (1 + 7.3\varphi + 123\varphi^2)\mu_{ba} \quad (3.34)$$

Denklemlerde kullanılan  $\varphi$  simgesi nanoakışkan içerisindeki nanopartikül konsantrasyonunu, alt indis olarak verilen na, np ve ba ise sırasıyla nanoakışkan özelliğini, nanopartikül özelliğini ve baz akışkan özelliğini temsil etmektedir.

Sayısal analizdeki akış geometrisinde manyetik alanın uygulandığı ve manyetik alanın uygulanmadığı durumlardaki korunum denklemlerinin çözülebilmesi için akış geometrisine ait giriş ve sınır koşulları deneysel parametrelere göre belirlenmiş olup,

Şekil 3.16’da ve Çizelge 3.4’te detaylı bir şekilde belirtilmiştir. Yapılan sayısal analizde giriş sıcaklığı (300 K) ve hızının üniform olduğu kabul edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan nanopartikülün ortalama çapı 20 nm olması ve baz akışkan içerisindeki hacimsel konsantrasyonu  $\phi=5,0$  nm altında olmasından dolayı sayısal analiz çözümlemesinde tek faz modeli kullanılmıştır. Bu parametrelere bağlı kalınarak tek faz modelinin kullanılmasındaki en büyük etken literatürde Ziad Saghir vd. [111], Akbari vd. [112] ile Albojamal A. ve Vafai K. [113] yapılan çalışmalarda bu parametrelerde tek faz olarak gerçekleştirilen çözümlemelerin çift faz çözümlemeye göre daha doğru sonuç sağlamasıdır. Diğer yandan sınır şartlarında akışkanın dairesel kanal yüzeyi ile temas ettiği noktada kaymama şartı olduğu ve yine bu noktada akışkan sıcaklığı ve yüzey sıcaklığının birbirine eşit olduğu kabul edilmiştir. Dairesel kanaldan akışkana uygulanan ısı akısı değerinin deneysel düzeneğe bağlı kalınarak  $600 \text{ W/m}^2$  değerinde uygulanmıştır. Sayısal çözüm datası üzerinde lokal olarak manyetik alan uygulanacağı için ani genişleyen kanal üç farklı yüzey olarak tasarlanmıştır. Çıkış sınır şartlarında ise akışkanın atmosfere aktığı, dolayısıyla etkin (gösterge) basıncın  $P_{\text{çıkış}}=0 \text{ Pa}$  olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3.16. Sayısal analiz datasının 3B görünümü.

Çizelge 3.4. Sayısal analizde kullanılan sınır şartlar ve yapılan kabuller.

Giriş Sınır Şartları	Cidar Sınır Şartları	Çıkış Sınır Şartları
$T(r, \theta, 0) = T_{\text{giriş}}$	$V_r(R, \theta, z) = 0$	$P_{\text{çıkış}}(R, \theta, L) = 0$
$V(r, \theta, 0) = V_{\text{giriş}}$	$V_\theta(R, \theta, z) = 0$	$\frac{\partial V(R, \theta, L)}{\partial z} = 0$
$D_{\text{np,ort}} \cong 20\text{nm}$	$V_z(R, \theta, z) = 0$	$\frac{\partial \Theta(R, \theta, L)}{\partial z} = 0$
$\varphi = \% 1,0 - \% 2,0$	$q_0''(R, \theta, z) = \text{sabit}$	$\Theta = \frac{T(R, \theta, z) - T_{\text{yüzey}}(R, \theta, z)}{T_{\text{yığın}}(R, \theta, z) - T_{\text{yüzey}}(R, \theta, z)}$

**Yapılan Kabuller:**

1. Akışkana ait termofiziksel özellikler sıcaklık ve basınç değişimlerinden etkilenmemektedir.
2. Akışın kararlı rejimde, Newtonyen, laminer ve sıkıştırılmaz olduğu varsayılmıştır.
3. Analizlerin 3B ve sürekli olduğu kabul edilmiştir.
4. Tek faz modeli kullanılmıştır.
5. Akışkanın üniform giriş hızına ve sıcaklığına sahip olduğu varsayılmıştır.
6. Viskoz yayılım, ışınım, doğal taşınım ve kaldırma kuvveti gibi etkenler ihmal edilmiştir.

Sayısal çalışmadaki tüm korunum denklemleri, yapılan kabuller, sınır şartları, doğrulama ve matematiksel formülasyonlar uygulama adımları göz önüne alınarak Şekil 3.1’de özetlenmiştir. Laminer akış rejiminde yürütülen analizlerde ilk olarak korunum denklemleri olan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar çalışma akışkan olarak H<sub>2</sub>O’nun kullanıldığı literatür çalışmaları ile kıyaslanmıştır. Sonuçlarda tutarlılık sağlandıktan sonra çalışma akışkanı olarak FNA kullanılmış ve korunum denklemlerine Maxwell ve Ohm denklemleri de eklenerek manyetik alan etkisi altındaki ısı transfer ve akış karakteristikleri incelenmiştir.

**3.2.4. Sayısal Analiz Çözümlemesi**

Bu bölümde, sonucu hacimler yöntemi vasıtasıyla analiz gerçekleştirebilen ANSYS Fluent 2021R3 programı ile düz ve pürüzlü yüzeye sahip olan ani genişlemeli dairesel kesitli kanalın ısı transfer ve akış karakteristikleri sayısal hesaplamalar ile incelenmiştir. Analizlerin temelini oluşturan süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemleri “Laminar Viscous” modeli ile çözülmüştür. Çözücü



yönteminde ise korunum denklemlerinin çözümünü yakınsama işlemi gerçekleşene kadar sürdüren “Pressure-Based Solver” kullanılmıştır. Analizlerde akışın kararlı durumda olduğu kabulü yapıldığı için “Solver Time” “Steady” olarak seçilmiş olup, sistemde dönel bir parça veya ekipman olmadığı için “Velocity Formulation” “Absolute” olarak belirlenmiştir. Çözüm sürecinde viskoz yayılım, ısıtım, doğal taşınım ve kaldırma kuvveti gibi etkenler ihmal edilmiştir. Analizin çözüm metodunda basınç-hız çiftinin ayrıklaştırılmasında diğer çözüm metotları olan “PISO” ve “COUPLED”e göre daha hızlı iterasyon gerçekleştiren ve süreklilik denklemini sağlamasının yanı sıra basınç alanı elde etmek için hız ve basınç düzeltmeleri arasında ilişki kuran “SIMPLE” metodu kullanılmıştır. Analizi yapılan akış datasında ani basınç ve hız değişimi gerçekleştiği için bu çözüm metodu seçilmiştir. Korunum denklemlerinin ayrıklaştırılmasında ise analizlerdeki hata oranını azaltmak amacıyla “Second Order Upwind” metodu kullanılmıştır. Diğer yandan analiz programında MHD modülü tanımlanarak nanoakışkana  $D_2=20$  mm çapındaki dairesel kesitli kanalın tam orta bölgesinden  $B=0,01T, 0,03T, 0,05T, 0,1T, 0,3T, 0,5T$  olmak üzere farklı şiddetlerde manyetik alan uygulanmıştır.

## BÖLÜM 4

### BULGULAR VE TARTIŞMA

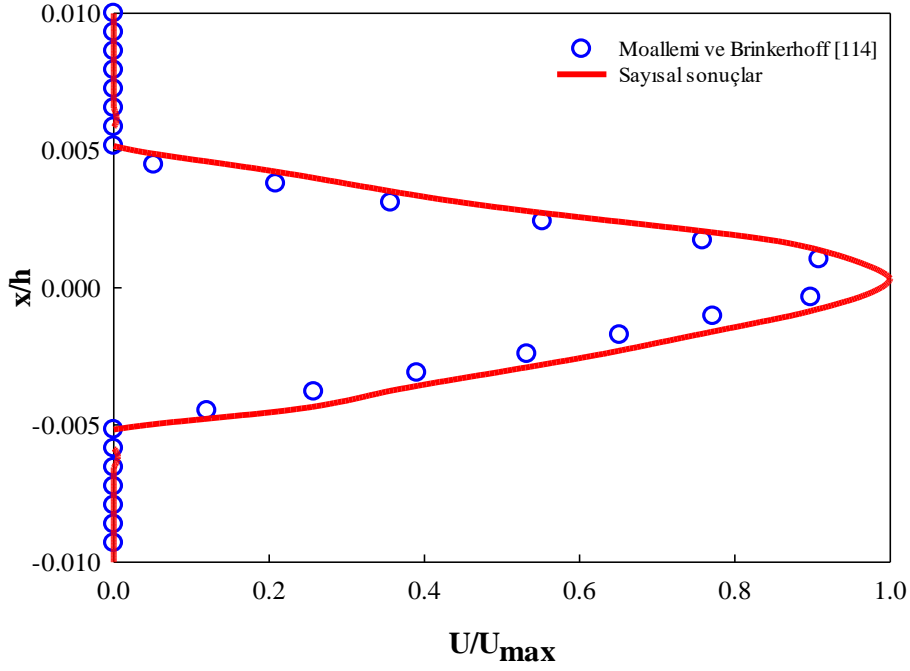
Çalışmanın bu bölümünde düz (DK) ve pürüzlü (PK) yüzeye sahip ani genişleyen kanalların sayısal ve deneysel sonuçları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

#### 4.1. SAYISAL ÇALIŞMA BULGULARI

Tezin bu bölümünde fiziksel özellikleri Bölüm 3.2’de ayrıntılı bir şekilde verilen DK ve PK’nın temel korunum denklemleri ve Maxwell denklemleri yardımıyla ısı transferi ve akış analizi yapılmıştır. Zamana bağlı olmayan akış şartlarında gerçekleştirilen analizlerde akışın Newtonyen ve sıkıştırılmaz olduğu varsayılmıştır. Ayrıca akışta viskoz yayılım, ışınlım, doğal taşınım ve kaldırma kuvveti gibi etkenler göz ardı edilmiştir. Sayısal analiz için akış hacmi oluşturulmuş ve sonlu hacimler yöntemi ile analizler yürütüldüğü için akış hacmine çalışma akışkanı olarak H<sub>2</sub>O’nun kullanıldığı Re=1,050 akış rejiminde “Çözüm Ağı Yakınsama İşlemi” yapılmıştır. Detaylı sonuçları Şekil 3.26’da verilen Çözüm Ağı Yakınsama İşleminde en uygun çözüm ağı yapısını sağlayan çözüm ağı ayarları tüm geometrilere uygulanmıştır. Elde edilen en uygun çözüm ağı yapısı ise Şekil 3.27’de verilmiştir.

##### 4.1.1. En Uygun Çözüm Ağının Doğrulaması

Sayısal analiz sonuçlarının doğruluğu ani genişleme noktasındaki hız profili yardımıyla doğrulanmıştır. Bu işlem için Moallemi ve Brinkerhoff [114] tarafından yürütülen çalışmadan faydalanılmıştır.  $D_2/D_1=2,0$  ani genişleme oranındaki DK’dan Re=290 akış rejimindeki H<sub>2</sub>O’nun geçirilmesiyle elde edilen hız profili ile karşılaştırma yapılmıştır. Ani genişleme noktasındaki hız profilleri Şekil 4.1’de verilmiş olup, değerler arasında yüksek oranda tutarlılık gözlemlenmektedir.

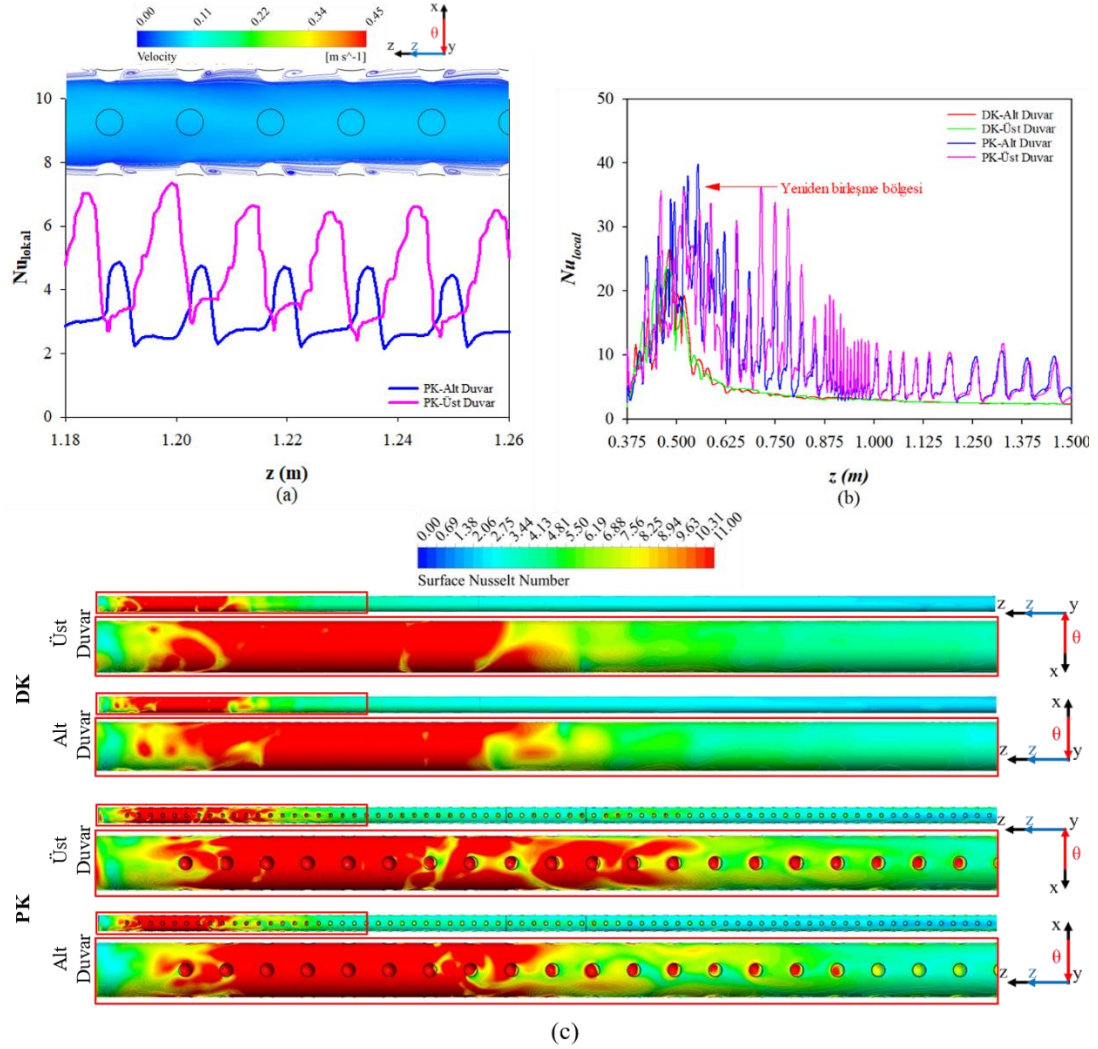


Şekil 4.1. Sayısal sonuçların literatür ile karşılaştırılması.

#### 4.1.2. Çukur Kanat Yapısının Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi

Şekil 4.2’de çukur kanat geometrisinin lokal Nu üzerindeki etkisi verilen grafik ve konturlar ile açıkça görülmektedir. Şekilde yer alan sonuçlar  $Re=2000$  akış rejiminde elde edilmiştir. Şekil 4.2 (a)’da akışkan PK boyunca akarken çukur kanatın ön yüzeyi kaynaklı bir engel ile karşılaşır ve akışta ayrılma olayı ile akış hızında azalma meydana gelir. Oluşan akış ayrılması ısı sınır tabakayı bozar ve böylece çukur kanatın ön yüzeyinde lokal olarak meydana gelen taşınım ile ısı transferinde artış meydana gelir. Isıl sınır tabakanın bozulması, hız ve sıcaklık gradyanlarının arasındaki etkileşim açısının ( $\alpha$ ) azalmasına ve bu gradyanların birbirleri ile paralel hale gelmesini sağlar. İlk kez Guo ve ark. [115] tarafından ortaya atılan alan etkileşim açısı termal sistemlerin taşınım ile gerçekleşen ısı transfer performansını değerlendirmek için kullanılan efektif bir metot olup, literatürde ısı transferini arttırmada kullanılan üç metottan biridir [116]. Akışkan, kanal yapısı gereği iki çukur kanat arasından geçtiğinde ise akış hızında ve ısı sınır tabaka kalınlığında artış meydana gelir. Ardından akışkan daha geniş bir hacme yayıldığı için basıncında artma ve hızında azalma meydana gelir. Çukur kanat yüzeyi ile dairesel kanal yüzeyinin tekrar birleştiği noktada geri akış olayı meydana gelir [117]. Bu

noktalardaki akışkanlar sürekli olarak kendi içerisinde bir devridaim şeklinde hareket ettiği için dairesel kanal yüzeyine uygulanan ısı akısı sistemde dolaşan çalışma akışkanına aktarılmaz. Şekil 4.2 (b)'de ise DK ve PK boyunca lokal Nu'nun değişimi verilmiş olup, çukur kanat yapılarının tüm akış geometrisi üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Şekil 4.2 (c)'de ise çukur kanat geometrisinin lokal Nu değeri üzerindeki etkisi kontur ile gösterilmiştir. DK'da yüksek ısı transferinin gerçekleştiği nokta sadece ani genişleyen geometriden dolayı meydana gelen yeniden birleşme noktasıyla sınırlı kaldığı görülürken, PK'da çukur kanat geometrisi sayesinde ısı transferi artışının çıkış noktasına doğru gittikçe devam ettiği görülmektedir.

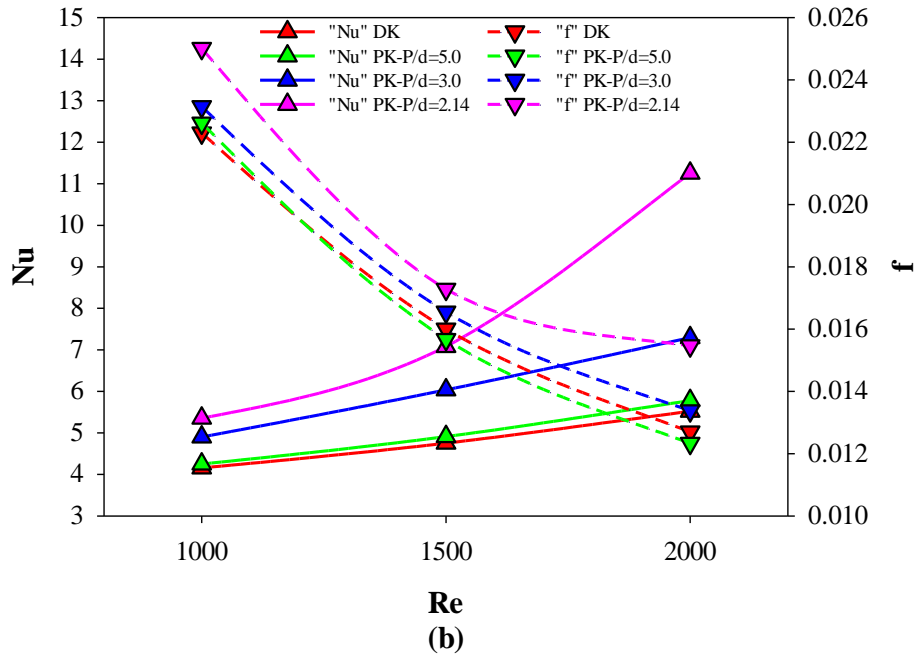
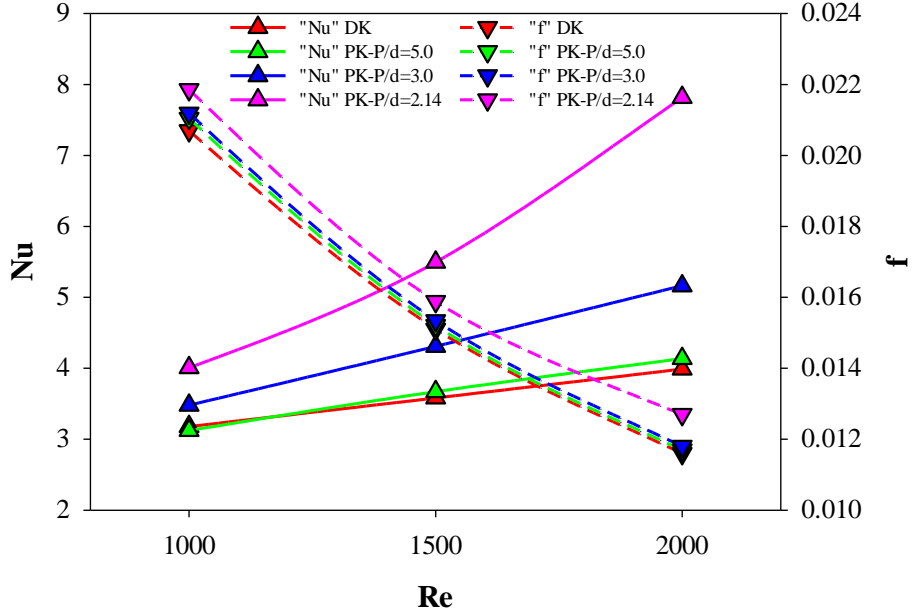


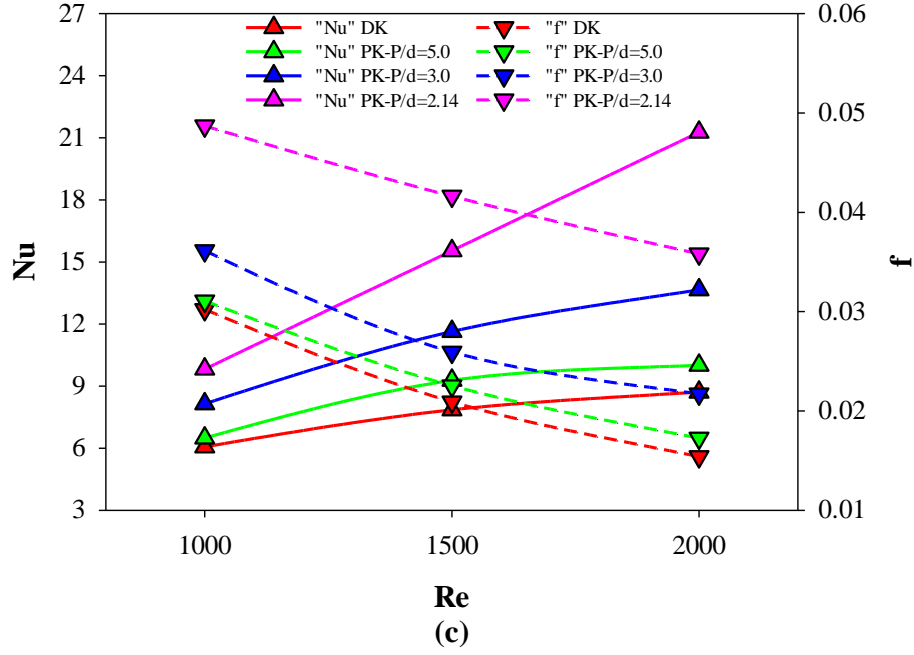
Şekil 4.2. Çukur kanat geometrisinin Nu değeri üzerindeki etkisi; a) PK'daki ısı transfer ve akış karakteristiğinin etkileşimi, b) DK ve PK'daki lokal Nu'nun grafik olarak karşılaştırması, c) DK ve PK'daki lokal Nu'nun kontur yardımıyla karşılaştırması.

Sayısal çalışmada yer alan  $d=3$  mm, 5 mm ve 7 mm çapındaki çukur kanat yapısının ısı ve akış karakteristiği üzerindeki etkisi Şekil 4.3'te incelenmiştir. Her üç çukur kanat çapı sayısal çalışmadaki tüm ani genişleyen dairesel kesitli kanal GO'ları üzerinde ısı transfer akışkanının  $H_2O$  olduğu durumda incelenmiştir. Şekildeki ortalama Nu ve f sonuçların genel olarak bakıldığında, ortalama Nu'nun Re arttıkça artış gösterdiği, ortalama f'in ise Re arttıkça azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.  $GO=2,5$  geometrisine sahip çıkış kanalındaki çukur kanat yapısının ortalama Nu ve f sonuçları incelendiğine en yüksek sonuçların  $Re=2000$ 'de  $P/d=2,14$  adım oranında elde edildiği görülmektedir.  $Re=2000$ 'de  $P/d=2,14$  adım oranından elde edilen ortalama Nu  $P/d=5,0$  ve  $3,0$  adım oranları ile kıyaslandığında sırasıyla %89,0 ve %51,4 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca  $P/d=2,14$ 'ten elde edilen ortalama Nu çukur kanat yapısına sahip olmayan DK ile kıyaslandığında ortalama Nu değerinin %96,0 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Benzer karşılaştırma ortalama f için yapıldığında  $P/d=2,14$ 'ten elde edilen sonucun  $P/d=5,0$  ve  $3,0$ 'e göre sırasıyla %8,5 ve %7,6 oranında artış gösterdiği, DK ile kıyaslandığında ise %9,4 oranında artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

Ani genişleyen dairesel kanal geometrisinin  $GO=2,0$  değerleri ve  $P/d=2,14$  adım oranına sahip çukur kanat tasarımındaki ortalama Nu için kıyaslama yapıldığında DK,  $P/d=5,0$  ve  $P/d=3,0$ 'a göre sırasıyla %103,8, %94,8 ve %54,4 oranlarında artış gözlemlenmiştir. Aynı kıyaslama ortalama f için de yapıldığında  $P/d=2,14$ 'ün DK,  $P/d=5,0$  ve  $P/d=3,0$ 'a göre sırasıyla %32,1, %25,4 ve %15,6 oranında artışa sebebiyet verdiği hesaplanmıştır.  $GO=1,4$  değerlerinden elde edilen Nu ve f değerleri kıyaslandığında;  $P/d=2,14$ 'ün ortalama Nu değeri DK,  $P/d=5,0$  ve  $P/d=3,0$ 'a göre sırasıyla %144,2, %112,6 ve %55,8 oranında artış sağlamış, f değeri ise DK,  $P/d=5,0$  ve  $P/d=3,0$ 'a göre sırasıyla %132,6, %107,6 ve %65,0 oranında artışa neden olmuştur. Ani genişleme oranları arasında da kıyaslama yapıldığında ise  $GO=1,4$  geometrisindeki ani genişleyen dairesel kesitli kanalın en yüksek Nu ve f değerine sahip olduğu da ayrıca vurgulanmalıdır. Elde edilen sonuçlar detaylı olarak incelendiğinde PK'daki çukur kanatların çapı arttıkça ortalama Nu değerinde ve f değerinde artış gözlemlenmektedir. Elde edilen ısı transfer ve akış karakteristiği Xie ve ark. [118] ile Aroonrat ve Wongwises [42] tarafından yürütülen çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Çukur kanat çapı arttıkça taşınımınla gerçekleşen ısı

transferinde ve ortalama Darcy sürtünme faktöründe meydana gelen artışların nedeni temel olarak akışkanın akması sırasında ani olarak akış hızının artması ve azalmasıdır.

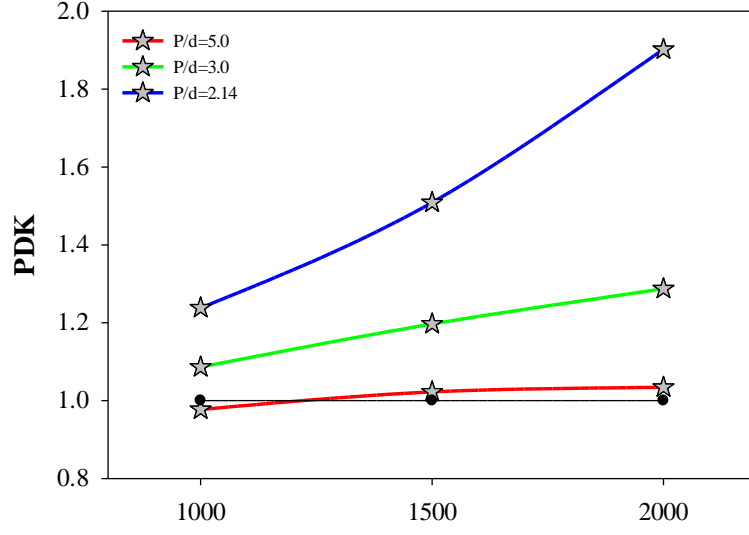




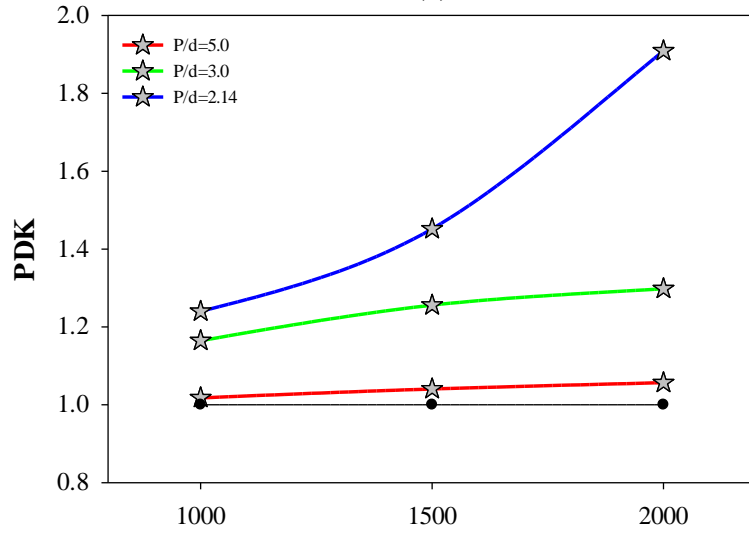
Şekil 4.3. İçerisinden H<sub>2</sub>O akan DK ve P/d=5,0, 3,0 ve 2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'nın ortalama Nu ve f değerlerinin Re ile değişimi; a) GO=2,5 b) GO=2,0, c) GO=1,4.

Çukur kanat yapısının termo-hidrolik performans üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla Eşitlik 3.14'ten yararlanılmıştır. Daha önce de bahsedildiği üzere bu çalışma kapsamında yer alan akış geometriklerindeki çukur kanat adım mesafesi 15 mm olarak alınmış olup, çalışmada üç farklı çaptaki (d=3 mm, 5 mm ve 7mm) çukur kanat yapısı incelenmiştir. Dolayısıyla elde edilen üç farklı çukur kanat adım oranının (P/d=5,0, 3,0 ve 2,14) PDK sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. GO=2,5, 2,0 ve 1,4 geometrilerinden elde edilen değerler incelendiğinde her üç geometride de P/d=2,14'ün PDK'sının en yüksek seviyede gerçekleştiği ve değerlerin Re ile artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar akış geometrisinden H<sub>2</sub>O geçtiği durumda elde edilen değerler olup, en yüksek PDK GO=2,5 ve d=7 mm geometrisinde gerçekleşmiştir. Sonuçlar detaylı bir şekilde incelendiğinde GO=2,5 akış geometrisindeki P/d=2,14'ten Re=2000 akış rejiminde elde edilen sonuçların DK'ya, P/d=5,0 ve 3,0'a göre sırasıyla %90,2, %83,9 ve %47,8 oranında artış sergilediği belirlenmiştir. Aynı akış rejimindeki benzer bir kıyaslama GO=2,0 ve 1,4 için yapıldığında; GO=2,0 geometrisinde P/d=2,14'ten elde edilen değerlerin sırasıyla %85,8, %80,7 ve %47,1 olduğu, GO=1,4 geometrisinde P/d=2,14'ten elde

edilen değerlerdeki artışın ise sırasıyla %84,3, %66,7, %31,9 oranında gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

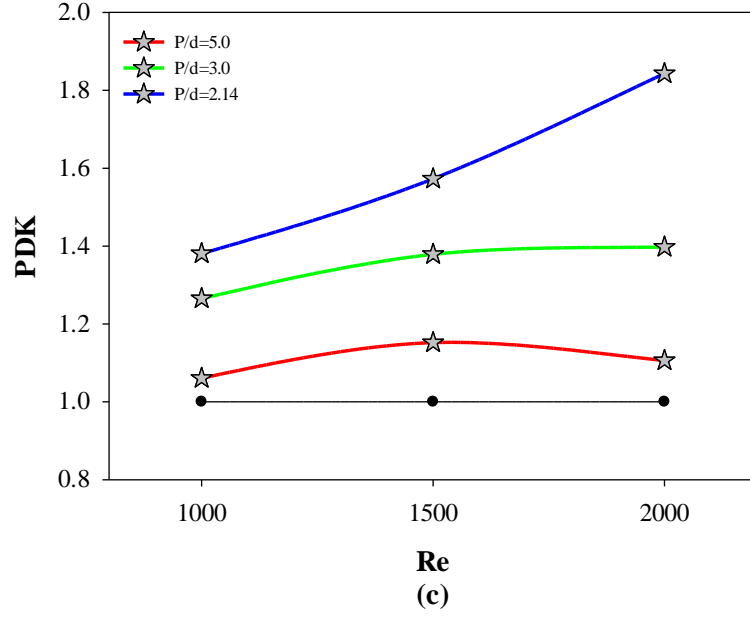


(a)



(b)



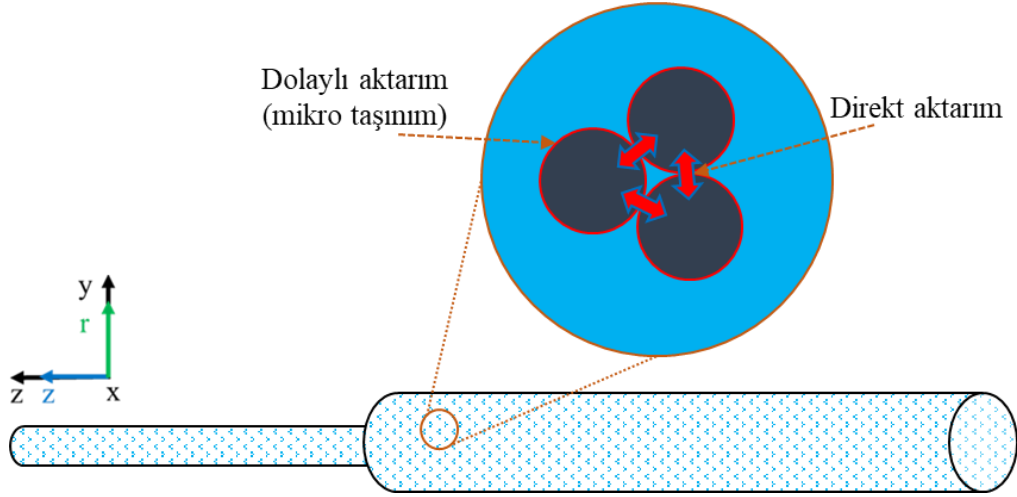


Şekil 4.4. İçerisinden H<sub>2</sub>O akan P/d=5,0, 3,0 ve 2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'nın PDK değerlerinin Re ile değişimi; a) GO=2,5 b) GO=2,0, c) GO=1,4.

#### 4.1.3. Nanoakışkan Konsantrasyonunun Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi

Yürütülen çalışma kapsamında sistemin ısı ve akış karakteristiğine etkiyen diğer faktör ise FNA'nın kullanımınıdır. Nanoakışkanların içerisinde ısı iletim katsayısını arttıran nanopartiküllerin olmasının yanı sıra, bu nanopartiküllerin akış içerisindeki davranışlarından dolayı meydana gelen Brownian hareketi ve termofez olgusudur. Brownian hareketi nanoakışkan içerisindeki nanopartiküllerin rastgele hareketini ve birbirine çarpma olayını tanımlayan terimdir [119]. Bu etkileşim sayesinde bir nanopartikül tarafından adsorbe edilen ısı değerine aktarılır ve nanopartiküller akışkan içerisinde akarken meydana gelen ısı transferi Şekil 4.5'te gösterilen iki farklı yöntem ile gerçekleşir. Bu yöntemlerden ilki, ısının nanopartiküller arasında transferi olan direkt aktarımdır. İkincisi ise nanopartikül ile nanopartikülü çevreleyen akışkan arasında meydana gelen dolaylı aktarımdır [120]. Nanopartiküllerin Brownian hareketi sayesinde ısıl sınır katman tahrip edilir ve sistemdeki ısı transfer performansının artması sağlanır [121]. Nanoakışkan kullanılmasıyla ısı transferinde meydana gelen artışı açıklayan diğer mekanizma ise termofez olgusudur. Soret etkisi olarak da bilinen bu olgu literatürde birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir

[122,123]. Termofez, sıcaklık gradyanı etkisi altındaki nanoakışkanda bulunan nanopartiküllerin Brownian hareketi ile oluşan zaman ortalamalı kuvvet olarak tanımlanabilir [124]. Bu kuvvet ile akışın sıcak bölgesindeki partiküller akışın soğuk tarafına doğru akma eğilimindedir ve sıcaklık gradyanı arttıkça bu kuvvetin değerinde de artış görülmektedir [125].

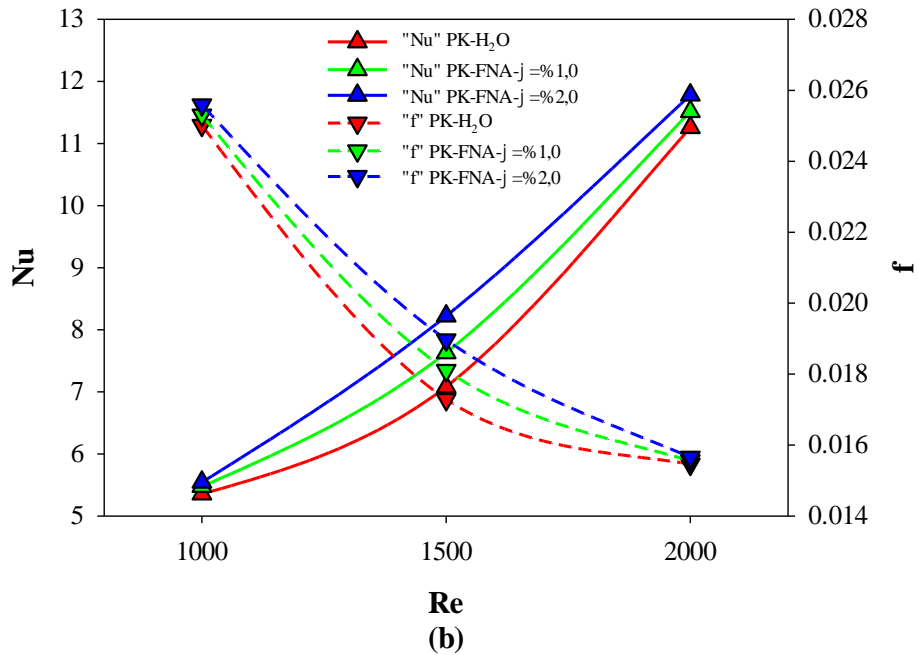
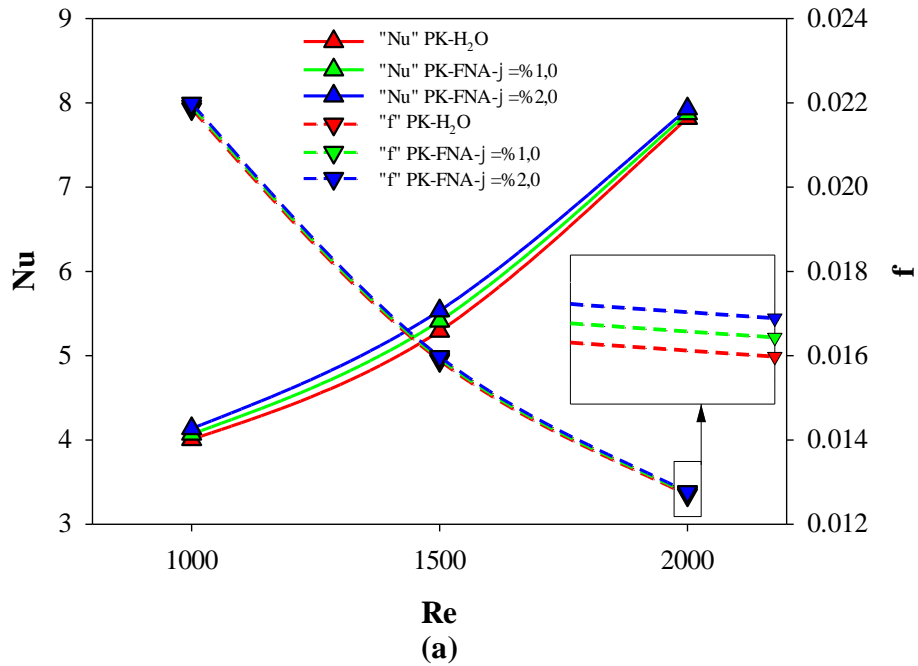


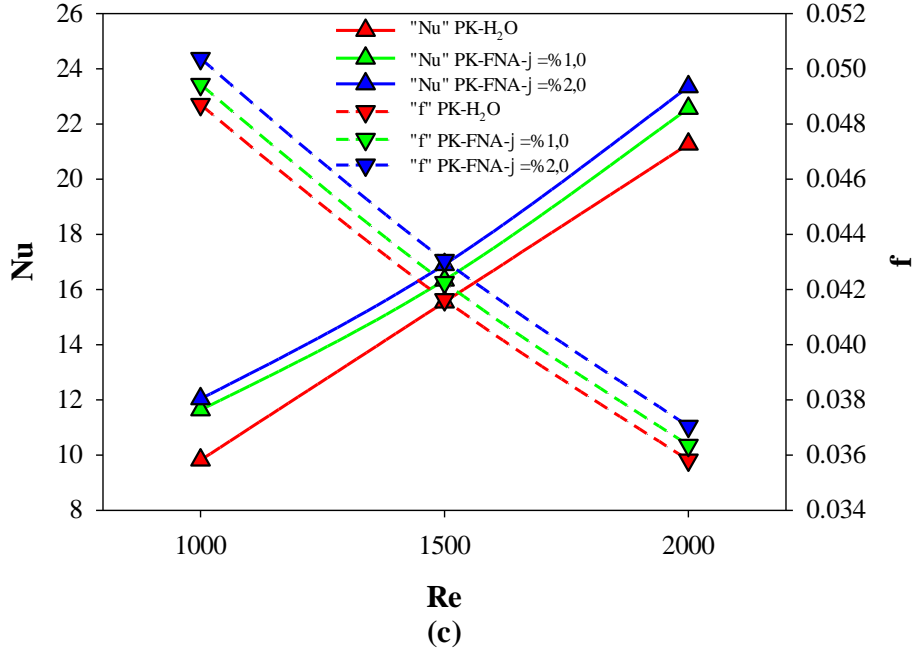
Şekil 4.5. Brownian hareketinin ısı transferine etki mekanizmasının şematik gösterimi.

Yukarıda verilen bilgilerde nanoakışkan içerisinde bulunan nanopartiküllerin ve konsantrasyonlarının herhangi bir sistemin termo-hidrolik performansı üzerine etkisi kısaca açıklanmıştır. Şekil 4.6'da ise bu çalışma kapsamında yer alan H<sub>2</sub>O ve farklı konsantrasyondaki FNA'nın değişken GO (2,5, 2,0 ve 1,4) ve P/d=2,14 çukur kanat adım oranındaki ısı ve akış karakteristiği incelenmiştir. P/d=2,14 adım oranı Şekil 4.4'te en yüksek PDK değerini sağladığı için seçilmiştir. Şekildeki ortalama Nu ve f sonuçların genel olarak bakıldığında, ortalama Nu ve f'in FNA konsantrasyonu arttıkça artış gösterdiği tespit edilmiştir.

H<sub>2</sub>O ve iki farklı konsantrasyona sahip ( $\phi$ =%1,0 ve %2,0) FNA'dan elde edilen ortalama Nu ve f sonuçları ayrıntılı bir şekilde incelendiğinde GO=2,5 geometrisinde Re=2000 akış rejiminde akan  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonundaki FNA'nın H<sub>2</sub>O ve  $\phi$ =%1,0 konsantrasyonundaki FNA'ya göre ortalama Nu değerinde sırasıyla %1,43 ve %0,71 oranında artış, ortalama f değerinde ise sırasıyla %0,61 ve %0,30 oranında artış gözlemlenmiştir. GO=2,0 geometrisi için kıyaslama yapıldığında ise  $\phi$ =%2,0

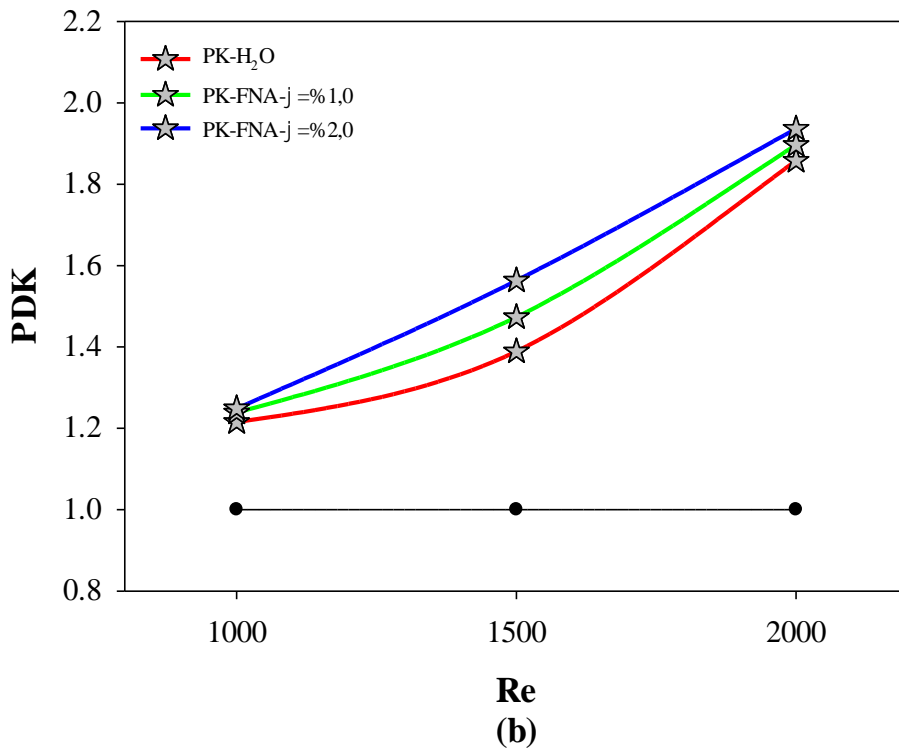
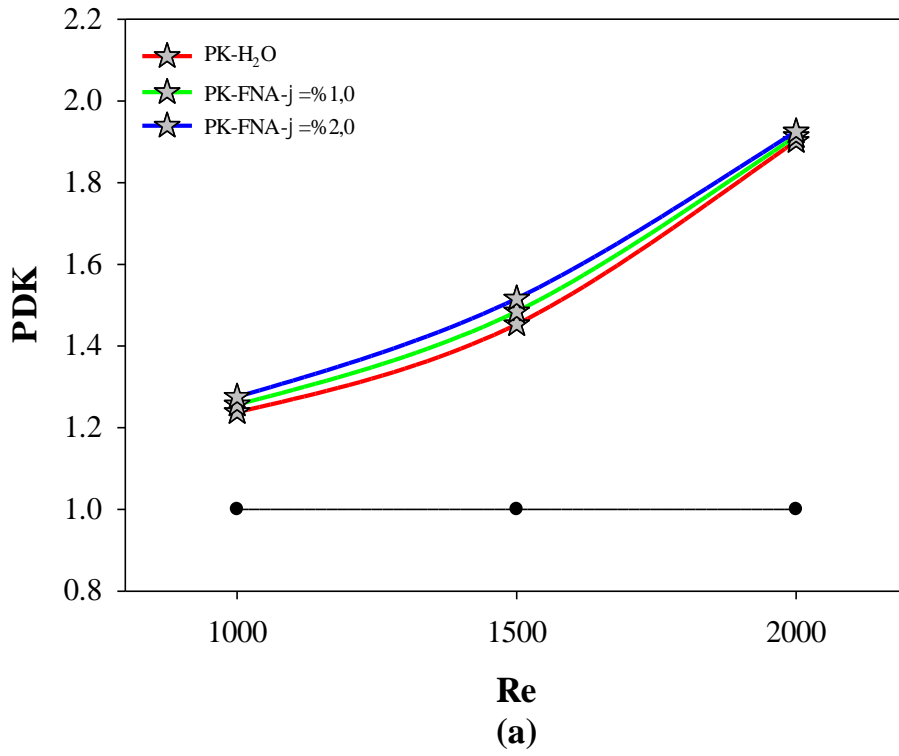
konsantrasyonundaki FNA'nın  $Re=2000$  akış rejimindeki ortalama  $Nu$  ve  $f$  değeri,  $H_2O$ 'ya göre sırasıyla %4,66 ve %1,26 oranında artış sergilemiş,  $\phi=1,0$  konsantrasyonundaki FNA'ya göre ise sırasıyla %2,30 ve %0,63 oranında artış göstermiştir.  $GO=1,4$  geometrisi için kıyaslama yapıldığında ise  $\phi=2,0$  konsantrasyonundaki FNA'nın  $Re=2000$  akış rejimindeki ortalama  $Nu$  ve  $f$  değeri,  $H_2O$ 'ya göre sırasıyla %9,77 ve %3,43 oranında artış sergilemiş,  $\phi=1,0$  konsantrasyonundaki FNA'ya göre ise sırasıyla %3,47 ve %1,90 oranında artış göstermiştir.

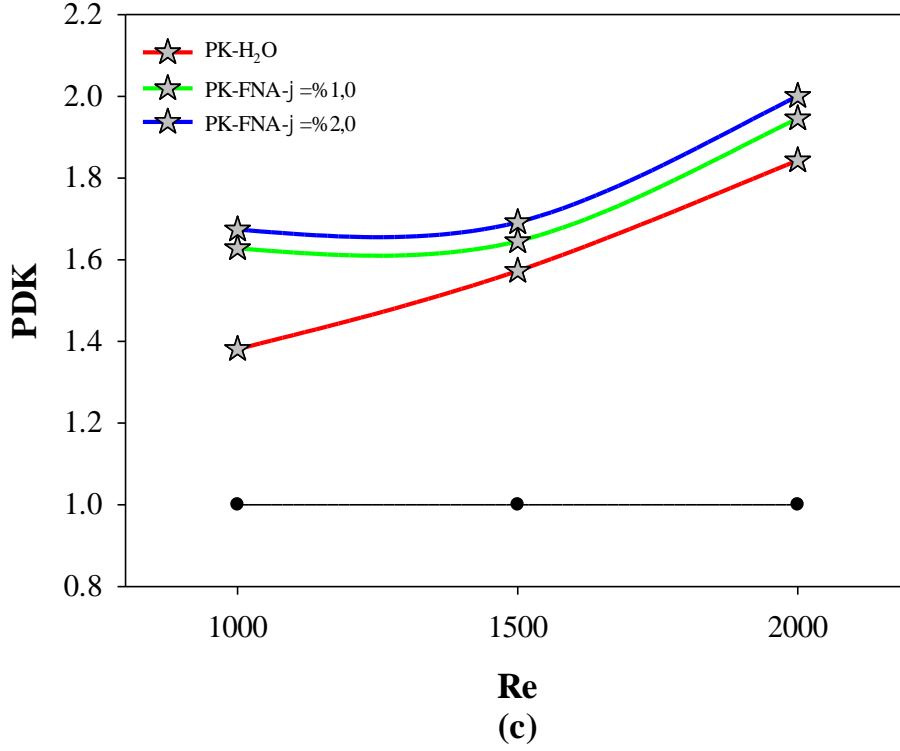




Şekil 4.6. İçerisinden H<sub>2</sub>O ile  $\phi$ =%1,0 ve %2,0 konsantrasyonlarında FNA akan P/d=2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'ya ait ortalama Nu ve f değerlerinin Re ile değişimi; a) GO=2,5 b) GO=2,0, c) GO=1,4.

FNA ve artan konsantrasyon oranının sistemdeki genel performansa etkini ölçmek amacıyla Şekil 4.7'te PDK ile değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan Re'nin artması, FNA kullanımı ve konsantrasyonunun artması durumunda PDK'nın artış eğiliminde olduğu görülmektedir. FNA kullanımının GO=2,5 geometrisindeki etkisi Re=2000 akış rejiminde incelendiğinde  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonundaki FNA'nın H<sub>2</sub>O ve  $\phi$ =%1,0 konsantrasyonundaki FNA'ya göre sırasıyla %1,2 ve %0,6 oranında artış sergilediği görülmektedir. Benzer kıyaslama aynı sıralama diğer GO'lar için yapıldığında GO=2,0 geometrisindeki artış oranlarının %4,2 ve %2,1, GO=1,4 geometrisindeki artış oranlarının ise %8,5 ve %2,5 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.4'te H<sub>2</sub>O kullanılması durumunda en yüksek PDK değerinin GO=2,5 geometrisinde gerçekleştiği belirtilmiştir. Ancak ısı transfer akışkanı olarak FNA kullanılması durumunda en yüksek PDK değerinin GO=1,4'te gerçekleştiği belirlenmiştir.



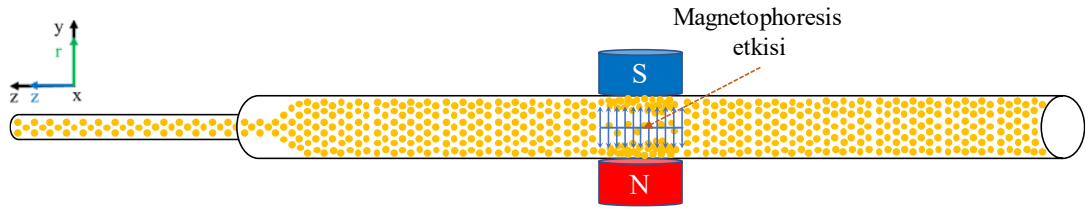


Şekil 4.7. İçerisinden H<sub>2</sub>O ile  $\phi$ =%1,0 ve %2,0 konsantrasyonlarında FNA akan  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranındaki PK'ya ait PDK değerlerinin Re ile değişimi; a) GO=2,5 b) GO=2,0, c) GO=1,4.

#### 4.1.4. Manyetik Alan Kuvvetinin Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi

Bu tez çalışması kapsamında akışın ısı ve akış karakteristiğini etkileyen olgulardan biri de aktif ısıl performans geliştirme yöntemleri içerisinde bulunan manyetik alan uygulaması olup, FNA'ya uygulanan manyetik alanın büyüklüğü arttıkça hem ortalama Nu değerinde hem de  $f$  değerinde artış gözlemlenmektedir. Bu durumun altında yatan en büyük etken manyetiklenebilen akışkana manyetik alanın uygulanması sonucu oluşan Lorentz kuvvetidir. Bu kuvvet manyetik alan altında indüklenen ve elektriksel alan oluşturan elektriksel iletkenliğe sahip akışkanlara etkileyen manyetik alan kuvvetidir. Lorentz kuvveti kısaca manyetik ve elektriksel alan arasındaki etkileşim olarak da tanımlanabilir [126]. Bu kuvvet akışkanın akış yönünün tersi yönde bir etki oluşturarak akışın kinetik enerjisinin azalmasına, bölgede akışa dik bir ikincil akış oluşmasına ve manyetik alanın etkilediği bölgede vorteks yoğunluğunun artmasına neden olur [78,127]. Akışta gerçekleşen ikincil akışlar çalışma akışkanı ve yüzeyine ısı uygulanan kanal arasında daha homojen bir

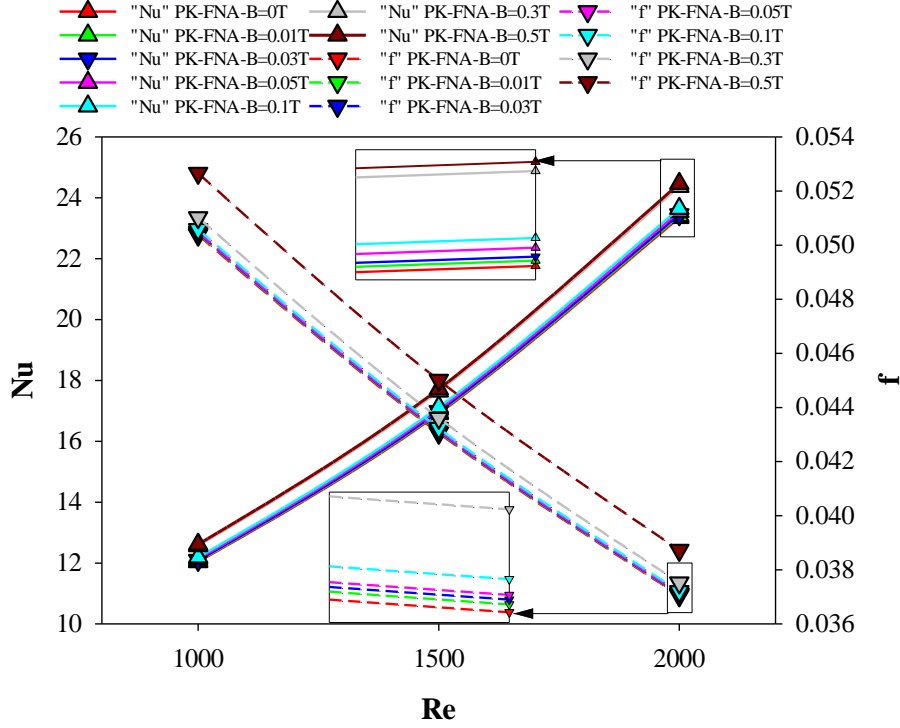
sıcaklık dağılımı meydana getirerek taşınımın gerçekleşen ısı transferinin artmasına katkıda bulunmaktadır. Diğer yandan ikincil akışlar akışı engelleyerek sistemdeki basınç kayıplarının artmasına da sebebiyet vermektedir. Gerçekleştirilen analizlerde ısı transfer karakteristiği olarak en yüksek ortalama Nu değeri, içerisinde  $\phi=2,0$  konsantrasyonunda FNA geçen,  $GO=1,4$  ve  $P/d=2,14$  geometrik karakteristiğe sahip dairesel kesitli kanal tarafından sağlanmıştır. Akışın termo-hidrolik performansını etkileyen manyetik alan kaynaklı diğer etki ise Magnetophoresis taşıma mekanizmasıdır. Magnetophoresis, manyetik alanın etkisi altındaki manyetiklenebilen nanopartiküllerin Şekil 4.8'deki gibi akışkan ile akarken kanal duvarına çekilerek yarı homojen davranıştan homojen olmayan davranış sergilemesi olarak tanımlanabilir [128].



Şekil 4.8. Manyetiklenebilen  $Fe_3O_4/H_2O$  FNA'daki magnetophoresis taşıma mekanizmasının temsili gösterimi.

Çalışma kapsamında  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanaldan akan  $\phi=2,0$  konsantrasyonundaki manyetiklenebilen FNA'ya kanalın çıkış hattı üzerindeki  $z=937,5$  mm noktasında altı farklı DC manyetik alan şiddeti ( $B=0,01T, 0,03T, 0,05T, 0,1T, 0,3T$  ve  $0,5T$ ) uygulanmış olup, akışkanın ısı ve akış karakteristiği üzerindeki etkisi Şekil 4.9'da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar genel olarak incelendiğinde DC manyetik alan şiddeti arttıkça FNA'nın ortalama Nu ve f değerlerinde artış gözlemlenmektedir. En yüksek ortalama Nu değeri  $Re=2000$  akış rejimindeki  $B_0=0,5T$  DC manyetik alan şiddetinde gerçekleşmiş olup,  $B=0T, 0,01T, 0,03T, 0,05T, 0,1T$  ve  $0,3T$ 'ye kıyasla sırasıyla %4,8, %4,5, %4,3, %3,9, %3,5 ve %0,4 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Ortalama Nu'ya benzer şekilde DC manyetik alanın etkisi ile ortalama f değerinin değişimde de benzer eğilim belirlenmiş olup, en yüksek ortalama f değeri  $Re=2000$  akış rejimindeki  $B_0=0,5T$  DC manyetik alan şiddetinde gerçekleşmiştir.  $B_0=0T, 0,01T, 0,03T, 0,05T, 0,1T$  ve  $0,3T$  DC manyetik alan şiddetleri ile

kıyaslandığında sırasıyla %4,5, %4,4, %4,4, %4,3, %4,1 ve %3,2 oranlarında artışa sebep olduğu belirlenmiştir.

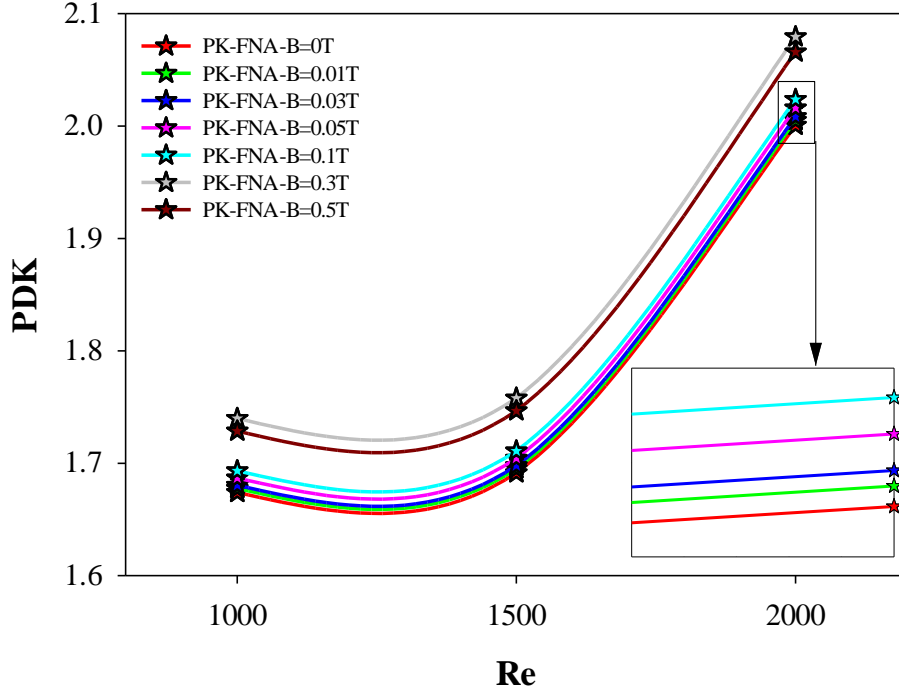


Şekil 4.9. İçerisinden  $\phi=2,0\%$  konsantrasyonunda FNA akan  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanala uygulanan farklı büyüklüklerdeki DC manyetik alan şiddetinin ortalama Nu ve f üzerindeki etkisinin Re ile değişimi.

DC manyetik alan şiddetinin PDK üzerindeki etkisi Şekil 4.10'da incelenmiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında PDK değerinin  $B=0,3T$  manyetik alan şiddetinin uygulanmasından sonra azalma eğiliminde olduğu sonucuna varılmış olup, manyetik alan şiddetinin daha fazla artırılmasının sistemin termo-hidrolik performansı üzerine olumsuz sonuçlar ortaya çıkaracağı belirlenmiştir. Bu sonuçlardan manyetik alan büyüklüğü  $B=0,5T$  değerine ulaştığında ortalama Nu değerinden elde edilen artışın ortalama f değerinde meydana gelen artışa göre daha düşük seviyede kalmasından dolayı PDK değerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu duruma benzer sonuçlar literatürde yer almakta olup, Ghofrani ve ark. [82] ile Yarahmadi ve ark. [129] tarafından yapılan çalışmalarda nanoakışkana manyetik alan uygulanmasının ısı transferi azalttığını gösteren sonuçlar ortaya konulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde her manyetik alan şiddeti için en yüksek PDK değerinin

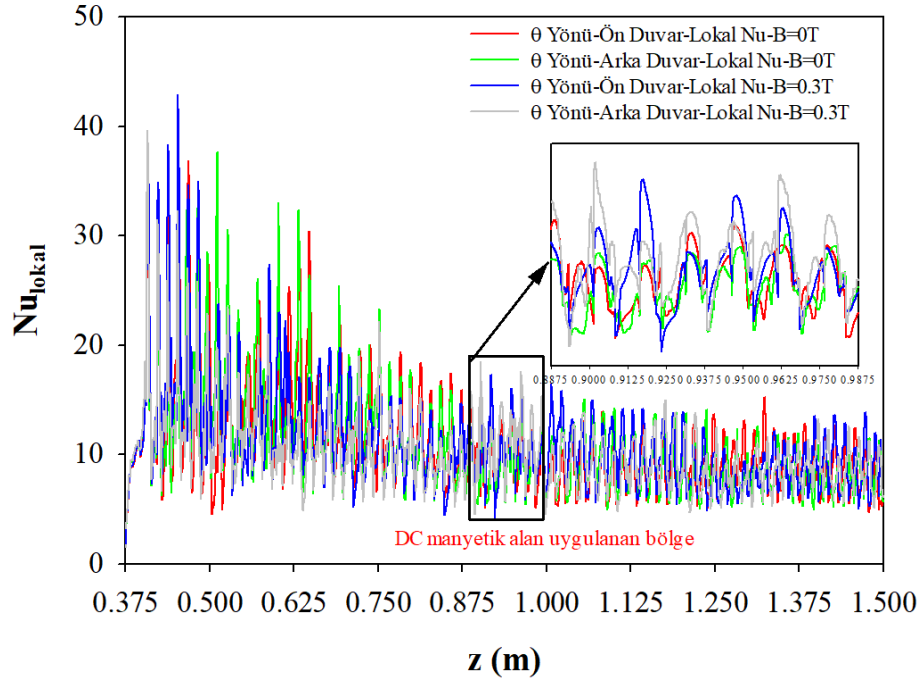


Re=2000 değerinde elde edildiği görülmektedir. Re=2000 akış rejimindeki B=0T, 0,01T, 0,03T, 0,05T, 0,1T ve 0,5T DC manyetik alan şiddeti ile kıyaslama yapıldığında B=0,3T DC manyetik alan şiddetinin sırasıyla %3,9, %3,7, %3,5, %3,1, %2,7 ve %0,7 oranında artış sergilediği belirlenmiştir.



şekil 4.10. İçerisinden  $\phi=2,0\%$  konsantrasyonunda FNA akan  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanala uygulanan farklı büyüklüklerdeki DC manyetik alan şiddetine ait PDK değerinin Re ile değişimi.

Manyetik alan şiddetinin ısı ve akış karakteristiğini daha net bir şekilde incelemek amacıyla sayısal akış hacmi üzerinde Nu değerinin ani genişleme noktasından sonraki lokal incelemeleri yapılmış olup, sonuçlar şekil 4.11’de grafiksel olarak verilmiştir. Yapılan incelemede en yüksek PDK değerini sağlayan akış şartları göz önüne alınmış olup, B=0T ile kıyaslamaları yapılmıştır. şekilde akış hacminin  $\theta$  yn n ve arka taraflarına bakan yüzeylerindeki lokal Nu değerlerinin değişimi verilmiştir. Elde edilen grafikten lokal Nu değerinin çukur kanatlar tarafından oluşturulan akış ayrılması ve geri akışlardan dolayı dalgalanma eğiliminde olmasının yanı sıra,  $z=887,5$  mm ve  $987,5$  mm aralığında  $B_0=0,3T$  DC manyetik alanı uygulandığı için lokal Nu değerinin artış gösterdiği ayrıca belirlenmiştir.

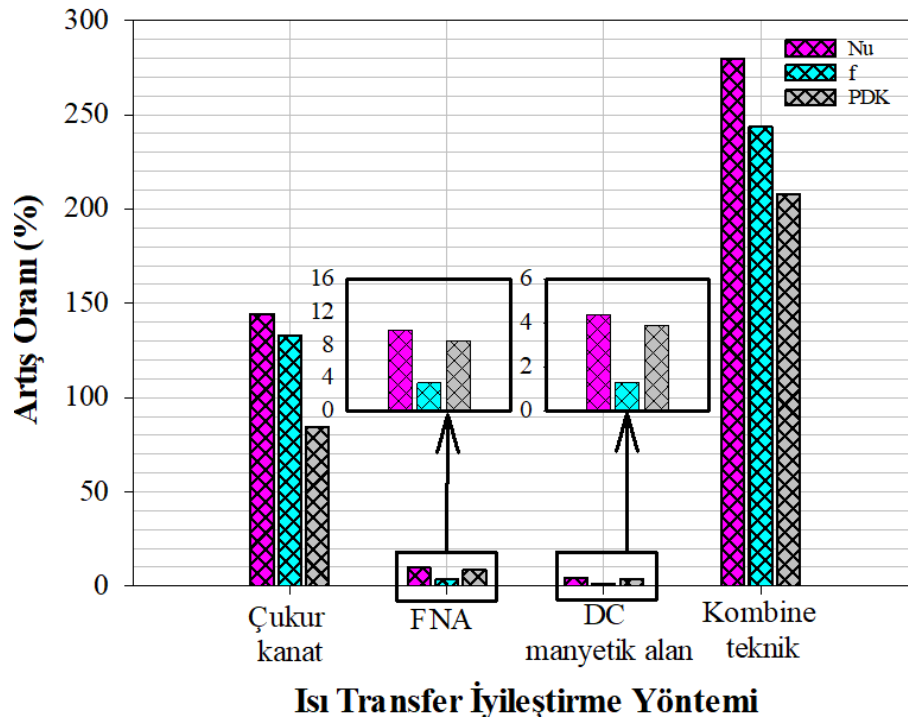


Şekil 4.11. B=0,3T DC manyetik alan şiddetinin lokal Nu değeri üzerindeki etkisi.

#### 4.1.5. Isı Transfer İyileştirme Yöntemlerinin Genel Sonuçları

Yukarıda verilen sonuçlardan en iyi PDK değerinin  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kesitli kanaldan akan ve  $B=0,3T$  DC manyetik alan şiddetine etkisi altındaki  $\phi=2,0$  konsantrasyonuna sahip FNA'da gerçekleştiği sonucunda varılmıştır. En iyi sonuç elde edilirken çukur kanat geometrisinin, FNA konsantrasyon oranının ve manyetik alan şiddetinin ortalama Nu, ortalama  $f$  ve PDK üzerindeki etkisi Şekil 4.12 yardımıyla özetlenmiştir. Şekil incelendiğinde  $GO=1,4$  geometrisine sahip kanal yapısı olarak DK yerine yine  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur adım oranına sahip PK yapısının kullanılması durumunda ortalama Nu'da %144,2, ortalama  $f$ 'te %132,6 ve PDK'da %84,3 oranında artış gerçekleşmektedir. Şekil FNA yönünden incelendiğinde  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur adım oranına sahip PK yapısından  $H_2O$  yerine  $\phi=2,0$  konsantrasyonuna sahip FNA akması durumunda ortalama Nu'da %9,77, ortalama  $f$ 'te %3,43 ve PDK'da %8,5 oranında artış meydana gelmektedir. Diğer yandan manyetiklenebilen FNA  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur adım oranına sahip PK yapısından geçerken  $B=0,3T$  DC manyetik alan şiddetine maruz kaldığında ise ortalama Nu'da %4,4, ortalama  $f$ 'te %1,3 ve

PDK'da %3,9 oranında artış gözlemlenmiştir. Sistemde kombine tekniğin kullanılması durumunda ise ortalama Nu, f ve PDK değerlerinden sırasıyla %279,5, %243,6 ve %207,9 oranında artış meydana geleceği belirlenmiştir. Şekilde verilen sonuçlardan öne çıkan diğer bir husus ise çukur kanat yapısındaki ortalama f'te meydana gelen artışın PDK'da meydana gelen artıştan daha fazla olmasıdır. Diğer tekniklerde bu durum tam tersi bir sonuç sergilemektedir ve ısı transferi iyileştirme çalışmalarında düşük pompalama gücü istenilen uygulamalarında FNA ile manyetik alan kullanımının daha önce çıktığı sonucuna varılabilir.



Şekil 4.12. Isı transferi iyileştirme yöntemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

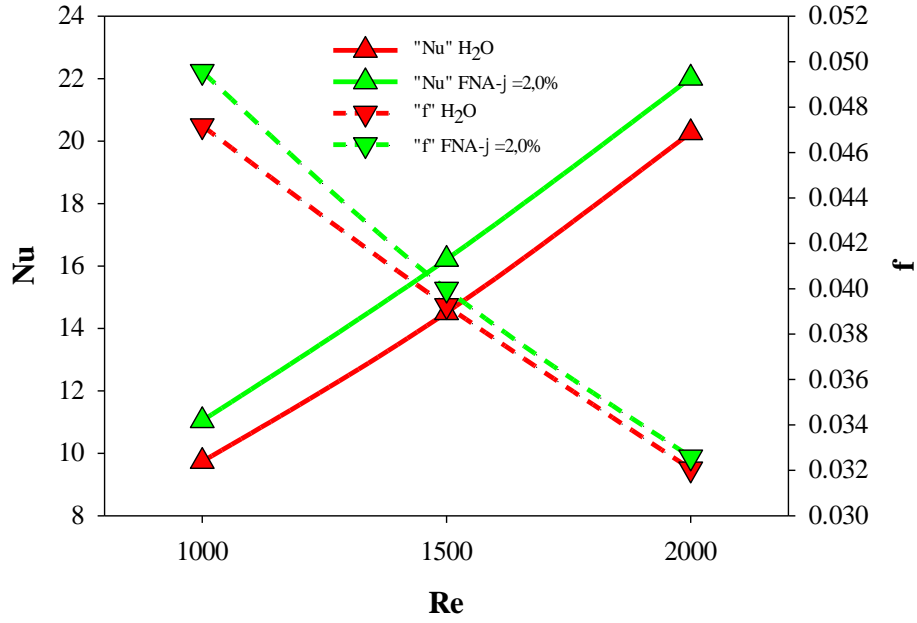
#### 4.2. DENEYSEL ÇALIŞMA BULGULARI

Tezin bu bölümünde sayısal çalışma parametrelerine bağlı olarak en iyi PDK'yı sağlayan geometrinin deney düzeneğinin analiz sonuçları verilmiştir. Buna göre  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kesitli kanaldan akan su ve  $\phi=2,0$  konsantrasyonuna sahip FNA kapalı çevrim akışında deneyler yürütülmüştür. Ayrıca FNA kullanılan deneysel durumlarda akışkan kanalın 937,5 mm noktasında  $B=0T, 0,01T, 0,03T, 0,1T, 0,3T$

ve 0,5T şiddetinde DC manyetik alan uygulanmıştır. Deneylelerden elde edilen verilerin doğruluğundan emin olmak amacıyla her bir deneyler üç kez tekrarlanmıştır. Çizelge 3.2’de gösterilen çalışma özeti dikkate alınarak ısı transferi, akış davranışı ve manyetik alan etkisi incelemek için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda toplam 72 deneysel veri elde edilmiş ve sonuçlar yardımcı denklemler ile bilimsel ifadelerle dönüştürmek için hesaplanmıştır.

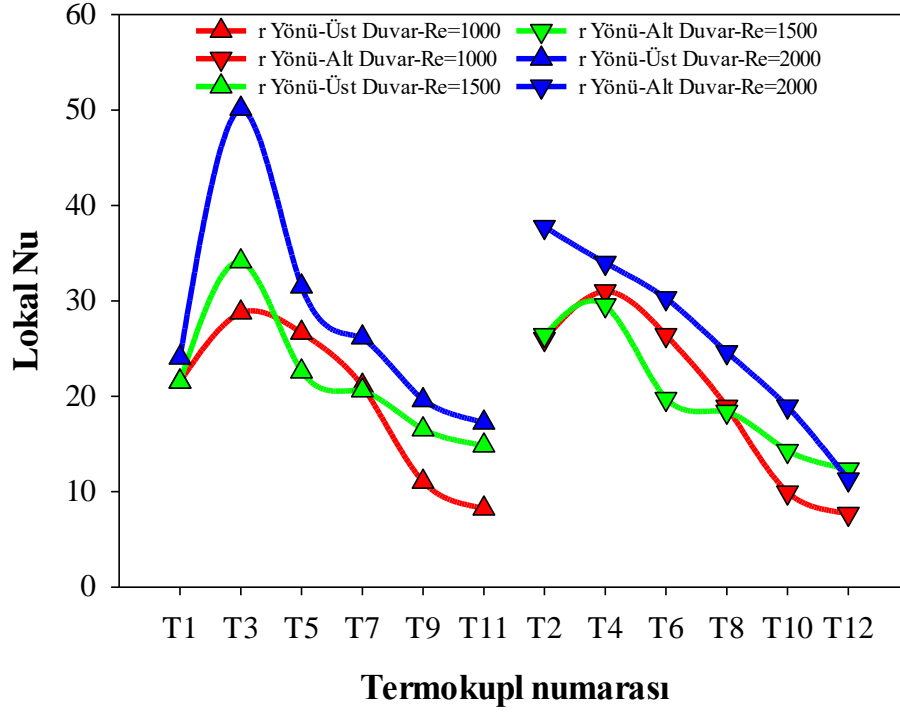
#### **4.2.1. Nanoakışkan Konsantrasyonunun Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi**

Şekil 4.13’te  $GO=1,4$  ve  $P/d=2,14$  adım oranındaki ani genişleyen kanal geometrisinden akan  $H_2O$  ve  $\phi=2,0\%$  konsantrasyonundaki FNA’nın ısı ve akış karakteristiği incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde her iki akışkanın ortalama  $Nu$  değerinin  $Re$  ile artış gösterdiği, ortalama  $f$  değerinin ise  $Re$  ile birlikte azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Akışkanların  $Re=1000, 1500$  ve  $2000$  akış rejimindeki farkları incelendiğinde  $\phi=2,0\%$  konsantrasyonundaki FNA’nın ortalama  $Nu$  değerinin  $H_2O$ ’ya göre sırasıyla  $13,42\%, 11,79\%$  ve  $8,62\%$  artış sergilediği görülmüştür. Ancak  $\phi=2,0\%$  konsantrasyonundaki FNA  $H_2O$ ’ya göre daha fazla sürtünme kaybına neden olmuş ve bu artışlar  $Re=1000, 1500$  ve  $2000$  için sırasıyla  $5,06\%, 1,85\%$  ve  $1,64\%$  olarak gerçekleşmiştir.



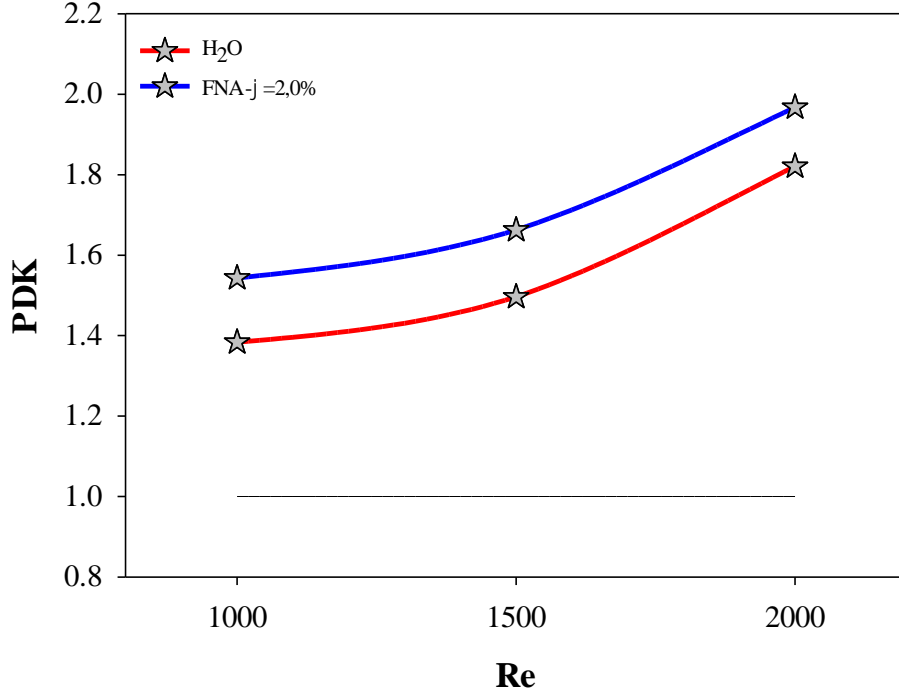
Şekil 4.13. İçerisinden H<sub>2</sub>O ile  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonundaki FNA akan GO=1,4 ve P/d=2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'ya ait ortalama Nu ve f değerlerinin Re ile değişimi.

İçerisinden farklı akış rejimlerinde  $\phi$ =%2,0 konsantrasyonundaki FNA geçen deney setindeki kanalın üzerine ani genişleme noktasından itibaren r yönündeki alt ve üst duvarlara yer yerleştirilen termokupllar sayesinde lokal Nu değerinin karşılaştırması Şekil 4.14'te yapılmıştır. Şekilden Re değeri arttıkça üst duvardaki lokal Nu değerlerinin alt duvardakilere göre daha fazla taşınım ile ısı transferi sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuç Şekil 4.2 (a) ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca üst duvardaki değişimlerden akışın yeniden birleşme noktasının yaklaşık olarak T3 termokupl bölgesine denk geldiği de görülmektedir.



Şekil 4.14. Farklı akış rejimine sahip  $\phi=2,0$  konsantrasyonundaki FNA'nın  $GO=1,4$  ve  $P/d=2,14$  olan PK'daki lokal Nu değişimi.

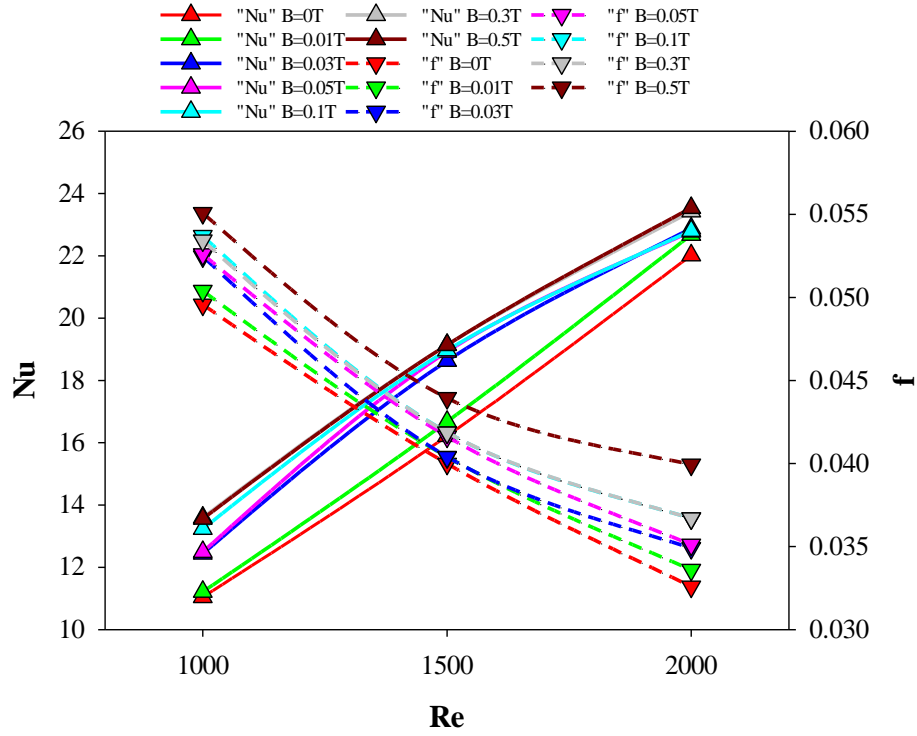
Çukur kanat yapısına sahip ani genişleyen dairesel kesitli kanal geometrisinde deneysel olarak test edilen  $H_2O$  ve FNA ve artan konsantrasyon oranının sistemdeki genel performansa etkini ölçmek amacıyla Şekil 4.15'te PDK ile değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan Re'nin artması, FNA kullanımı durumunda PDK'nın artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Her bir akış rejim değeri için performans artış oranları incelendiğinde  $\phi=2,0$  konsantrasyonundaki FNA'nın  $H_2O$ 'ya göre Re=1000'de %11,57, Re=1500'de %11,10 ve Re=2000'de %8,04 artış gösterdiği belirlenmiştir



Şekil 4.15. İçerisinden H<sub>2</sub>O ile  $\phi=2,0$  konsantrasyonundaki FNA akan GO=1,4 ve P/d=2,14 çukur kanat adım oranındaki PK'ya ait PDK'nın Re ile değişimi.

#### 4.2.2. Manyetik Alan Kuvvetinin Termo-Hidrolik ve Genel Performansa Etkisi

Ani genişleyen dairesel kanaldan akan manyetiklenebilen  $\phi=2,0$  konsantrasyonundaki FNA'ya kanalın çıkış hattı üzerindeki  $z=937,5$  mm noktasından altı farklı DC manyetik alan şiddeti ( $B=0,01T, 0,03T, 0,05T, 0,1T, 0,3T$  ve  $0,5T$ ) uygulanmış olup, akışkanın ısı ve akış karakteristiği üzerindeki etkisi Şekil 4.16'da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar genel olarak incelendiğinde DC manyetik alan şiddeti arttıkça FNA'nın ortalama Nu ve f değerlerinde artış gözlemlenmektedir. En yüksek ortalama Nu değeri  $Re=2000$  akış rejimindeki  $B=0,5T$  DC manyetik alan şiddetinde gerçekleşmiş olup,  $B=0T, 0,01T, 0,03T, 0,05T, 0,1T$  ve  $0,3T$ 'ye kıyasla sırasıyla %6,5, %3,7, %2,8, %3,2, %3,1 ve %0,5 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. Ortalama Nu'ya benzer şekilde DC manyetik alanın etkisi ile ortalama f değerinin değişimde de benzer eğilim belirlenmiş olup, en yüksek ortalama f değeri  $Re=2000$  akış rejimindeki  $B=0,5T$  DC manyetik alan şiddetinde gerçekleşmiştir.  $B=0T, 0,01T, 0,03T, 0,05T, 0,1T$  ve  $0,3T$  DC manyetik alan şiddetleri ile kıyaslandığında sırasıyla %18,4, %15,9, %12,6, %12,1, %8,1 ve %8,1 oranlarında artışa sebep olduğu belirlenmiştir.

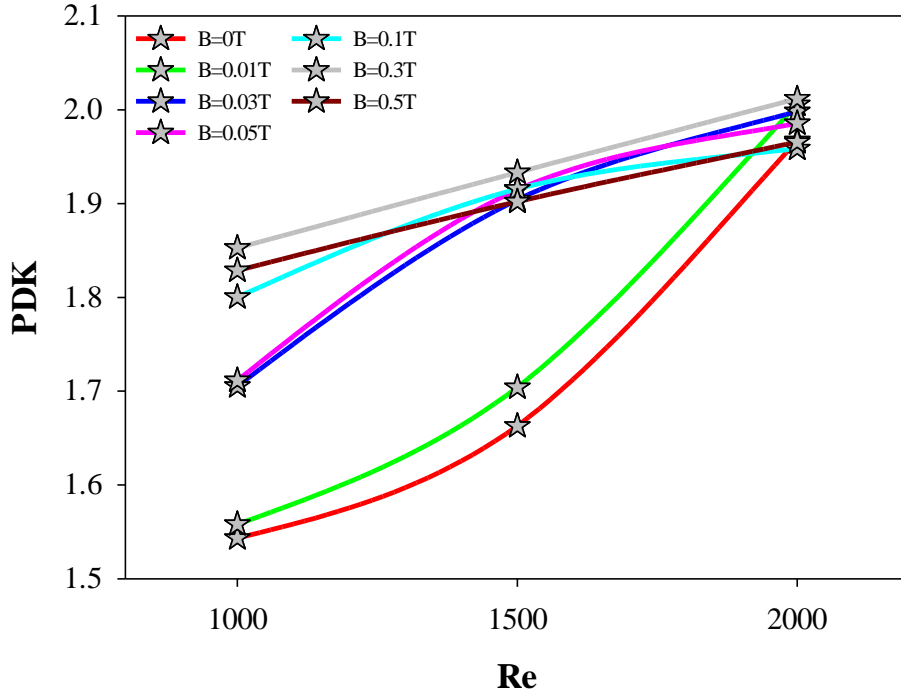


Şekil 4.16. İçerisinden  $\phi=2,0\%$  konsantrasyonunda FNA akan  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanala uygulanan farklı büyüklüklerdeki DC manyetik alan şiddetinin ortalama Nu ve f üzerindeki etkisinin Re ile değişimi.

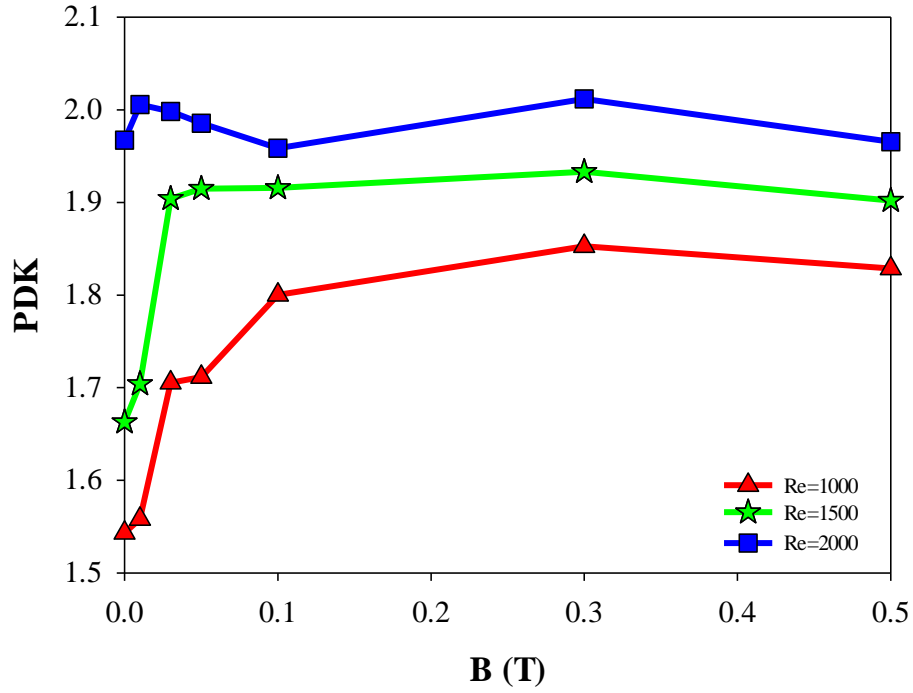
DC manyetik alan şiddetinin PDK üzerindeki etkisi Re fonksiyonu olarak Şekil 4.17'de, B fonksiyonu olarak ise Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan Re değeri arttıkça PDK'nın da artış eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Manyetik alan şiddetinin PDK etkisi üzerindeki etkisi incelendiğinde ise tüm manyetik alan şiddetlerinin manyetik alan uygulanmayan duruma göre daha yüksek performans sergilediği ancak  $B=0,5T$  değerinde manyetik alan şiddeti uygulandığında PDK'nın düşme eğilimine girdiği belirlenmiştir. Bu sonuç sayısal ve literatürdeki sonuçlar ile tutarlılık göstermektedir. Manyetik alan şiddetinin aşırı derecede yükseltilmesi durumunda performansta meydana gelen düşüşün nedeni ortalama Nu değerinden elde edilen artışın ortalama f değerinde meydana gelen artışa göre daha düşük seviyede kalması ile açıklanabilir. Sonuçlardan her manyetik alan şiddeti için en yüksek PDK değerinin  $Re=2000$  değerinde elde edildiği açıkça görülmektedir.  $Re=2000$  akış rejimindeki  $B=0T, 0,01T, 0,03T, 0,05T, 0,1T$  ve  $0,5T$  DC manyetik alan şiddeti ile kıyaslama yapıldığında  $B=0,3T$  DC manyetik alan



şiddetinin sırasıyla %2,26, %0,31, %0,68, %1,33, %2,72 ve %2,35 oranında artış sergilediği belirlenmiştir. Akış rejimlerinin manyetik alan şartları altında performansa etkisi incelendiğinde ise  $B=0,3T$  ve  $Re=2000$  şartlarında elde edilen PDK'nın  $Re=1000$  ve  $1500$ 'e göre sırasıyla %8,59 ve %4,07 oranında artış sağladığı görülmüştür. Buradan akış rejiminin performansa etkisi manyetik alan şiddeti ile kıyaslandığından daha fazla etkin olduğu sonucuna varılabilir.



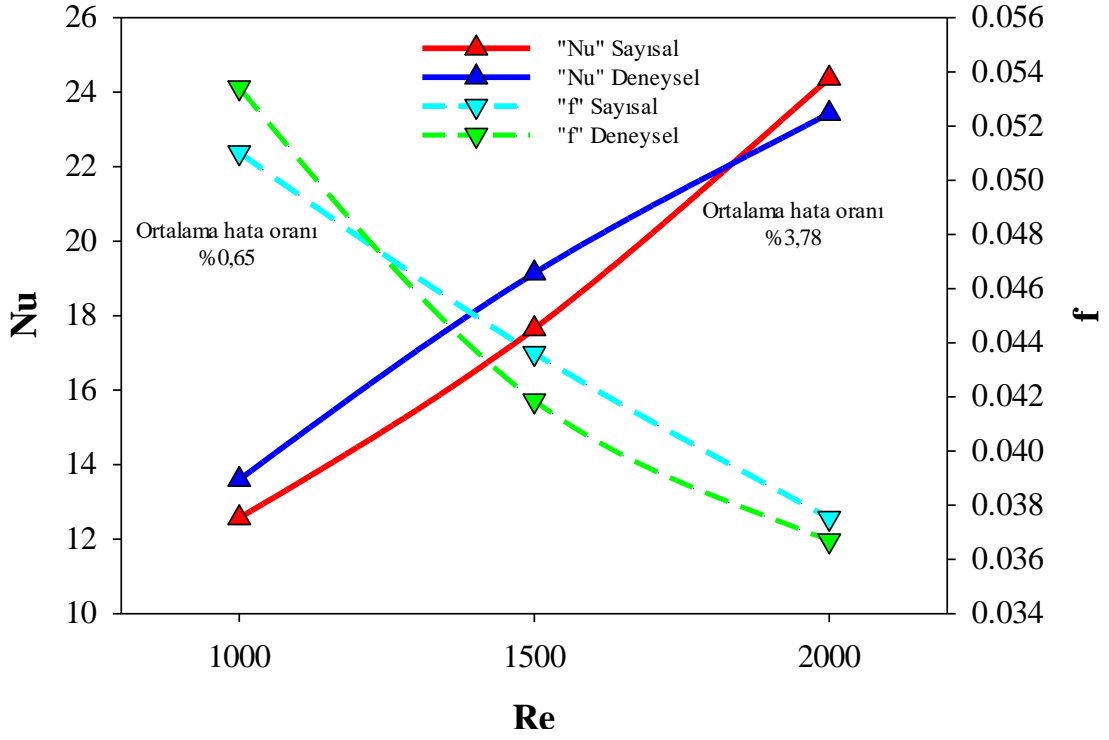
Şekil 4.17. İçerisinden  $\varphi=2,0\%$  konsantrasyonunda FNA akan  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanala uygulanan farklı büyüklüklerdeki DC manyetik alan şiddetinin PDK üzerindeki etkisinin  $Re$  ile değişimi.



Şekil 4.18. İçerisinden  $\phi=2,0\%$  konsantrasyonunda FNA akan  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanaldaki farklı akış rejim şartlarının PDK üzerindeki etkisinin DC manyetik alan şiddetinin ile değişimi.

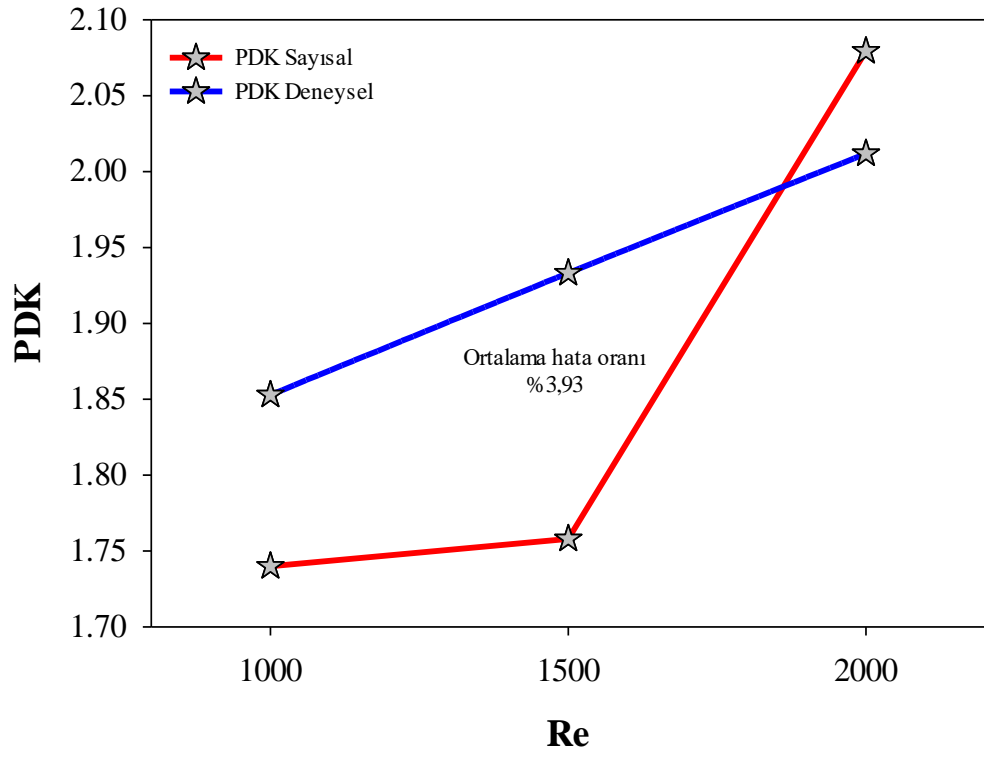
### 4.3. SAYISAL VE DENEYSEL ÇALIŞMA BULGULARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Tezin bu bölümünde, deney düzeneğinde farklı sınır şartlar altında ısı ve akış karakteristik analizi yapılan  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanalın deneysel sonuçları ile sayısal sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.19’da iki farklı yöntemden elde edilen ortalama  $Nu$  ve  $f$  değerleri kıyaslanmıştır. Ulaşılan sonuçlar arasında hata oranlarının kabul edilebilir seviyenin altında olduğu görülerek ortalama  $Nu$ ’daki ortalama hata oranının  $\%3,78$  olarak gerçekleştiği görülmüştür. Ortalama  $f$ ’teki ortalama hata oranının ise  $\%0,65$  olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Sundar vd. [130] tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen hata oranlarına (ortalama  $Nu$  için:  $\%6,72$ ; ortalama  $f$  için:  $\%4,07$ ) benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.19. Deneysel ve sayısal sonuçlardan elde edilen ortalama Nu ve  $f$ 'lerin kıyaslanması.

Şekil 4.20'de,  $GO=1,4$  geometrisine ve  $P/d=2,14$  çukur kanat adım oranına sahip ani genişleyen dairesel kanalında yürütülen deneysel ve sayısal sonuçlardan hesaplanan PDK değerlerinin kıyaslanması yapılmıştır. Elde edilen PDK sonuçları arasında ortalama hata oranının kabul edilebilir seviyenin altında olduğu ve %3,93 oranında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu sonuç, Bennia ve Bouaziz [131] tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen hata oranına (%2,01) benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.20. Deneysel ve sayısal sonuçlardan elde edilen PDK'ların kıyaslanması.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR

Ani genişleyen dairesel kesitli kanal içerisindeki zorlanmış laminar akış şartlarında ( $1000 \leq Re \leq 2000$ ) hem sayısal hem de deneysel olarak gerçekleştirilen analizlerde farklı giriş kanal çaplarının, çukur kanat çaplarının, FNA hacimsel konsantrasyonlarının ve manyetik alan şiddetlerinin ısı transferi, akış karakteristiği ve sistem performansı üzerindeki etkilerine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Ani genişleyen dairesel kesitli kanalın giriş ve çıkış kanallarına ait boylamsal ölçüler  $L_1=375$  mm ve  $L_2=1125$  mm olarak belirlenmiştir. Çalışmalarda  $D_1=8, 10$  ve  $14$  mm'lik giriş kanal çapları,  $d=3, 5$  ve  $7$  mm'lik çukur kanat çapları,  $\phi=0,0, 1,0$  ve  $2,0$  FNA konsantrasyonları ve  $B=0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,3$  ve  $0,5T$  DC manyetik alan şiddetleri kullanılmıştır. Kanallar arasındaki mesafenin  $P=15$  mm olduğu göz önüne alınarak üç farklı adım oranında ( $P/d=5,0, 3,0$  ve  $2,14$ ) incelemeler yapılmıştır. Sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen başlıca bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Ortalama  $Nu$  ve  $f$  sonuçlarında, ortalama  $Nu$ 'nun  $Re$  arttıkça artış gösterdiği, ortalama  $f$ 'in ise  $Re$  arttıkça azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.
- $P/d$ 'nin ısı transferi üzerindeki etkisi incelendiğinde tüm  $GO$ 'lardaki ortalama  $Nu$ 'nun  $P/d$  azaldıkça artış gösterdiği ve en yüksek ortalama  $Nu$ 'nun  $P/d=2,14$ 'te gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca  $DK$  ile kıyaslama yapıldığında,  $P/d=2,14$  geometrisindeki  $GO=2,5, 2,0$  ve  $1,4$ 'ten elde edilen ortalama  $Nu$  değerlerinin  $Re=2000$ 'de sırasıyla  $96,0, 103,8$  ve  $144,2$  oranlarında artış gösterdiği hesaplanmıştır.

- Diğer yandan çukur kanat yapısının kullanılması durumunda sistemde gerçekleşen  $f$ 'te artış meydana geldiği ve  $P/d$  azaldıkça bu değer artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Elde edilen oransal sonuçlara göre  $P/d=2,14$ 'ün  $DK$ 'ya göre artış oranları  $GO=2,5, 2,0$  ve  $1,4$  için sırasıyla %9,4 %32,1 ve %132,6 olarak gerçekleşmiştir.
- $P/d=2,14$  kanal geometrisinin  $PDK$  üzerindeki etkisine yönelik karşılaştırma yapıldığında  $GO=2,5, 2,0$  ve  $1,4$ 'e ait  $PDK$ 'ların  $DK$ 'ya göre sırasıyla %90,2, %85,8 ve %84,3 olarak gerçekleştiği kaydedilmiştir.
- FNA ve konsantrasyonunun ısı ve akış karakteristiği üzerindeki etkisi incelendiğinde nanoakışkan kullanımının sistem üzerinde pozitif etkilere neden olduğu tespit edilmiştir.
- $Re=2000$ 'de  $P/d=2,14$  kanat geometrisine sahip  $GO=2,5, 2,0$  ve  $1,4$ 'ten akan  $\phi=0,02$  konsantrasyonundaki FNA'nın  $H_2O$ 'ya göre ortalama  $Nu$ 'yu sırasıyla %1,43, %4,66 ve %9,77 oranlarında artırdığı hesaplanmıştır. Ayrıca FNA kullanımının sistemdeki ortalama  $f$  üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama  $Nu$ 'ya ile aynı karşılaştırma parametrelerine bağlı olarak ortalama  $f$ 'te sırasıyla %0,61, %1,26 ve %3,43 oranlarında artışların meydana geldiği belirlenmiştir.
- Çukur kanat ve FNA kullanımının kombinasyonu dikkate alınarak yapılan performans değerlendirmesinde en yüksek  $PDK$ 'nın  $P/d=2,14$  kanat geometrisine sahip  $GO=1,4$ 'te meydana geldiği tespit edilmiştir.  $Re=2000$ 'de ve  $\phi=0,02$  konsantrasyonundaki FNA'nın  $GO=2,5, 2,0$  ve  $1,4$  akış geometrilerinde kullanılması durumunda  $PDK$ 'nın sırasıyla %1,2, %4,2 ve %8,5 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.
- Ani genişleyen dairesel kesitli kanaldan akan FNA'ya DC manyetik alan uygulandığında ortalama  $Nu$  ve  $f$ 'i  $B$  arttıkça artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir.
- $GO=1,4$  ve  $P/d=2,14$  akış geometrisinde  $Re=2000$ 'de akan  $\phi=0,02$  konsantrasyonundaki FNA'nın  $B=0,5T$ 'de en yüksek ortalama  $Nu$  elde edilmiştir ve  $B=0T$  ile kıyaslandığında artışın %4,8 oranında gerçekleştiği hesaplanmıştır. Aynı akış geometrisi, akışkan ve karşılaştırma parametreleri dahilinde sistemdeki ortalama  $f$ 'in %4,5 oranında arttığı tespit edilmiştir.

- $GO=1,4$  ve  $P/d=2,14$  akış geometrisinde en yüksek ortalama  $Nu$   $B=0,5T$  sınır şartında elde edilmesine rağmen en yüksek PDK'nın  $B=0,3T$ 'de meydana gelmiştir ve artış oranının  $B=0T$ 'ye kıyasla %3,9 olduğu hesaplanmıştır.
- $GO=1,4$  ve  $P/d=2,14$  akış geometrisinde akan  $\phi=2,0$  konsantrasyonundaki FNA'ya  $B=0,3T$  şiddetindeki DC manyetik alan uygulanması durumunda ortalama  $Nu$  ve PDK sonuçları  $GO=1,4$  akış geometrisinde  $H_2O$  akan DK ile kıyaslandığında meydana gelen artış oranları %279,5 ve %207,9 olarak hesaplanmıştır.
- En yüksek PDK'nın sağlandığı parametrelerden elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında ortalama  $Nu$ , ortalama  $f$  ve PDK değerleri arasındaki farkların sırasıyla %3,78, %0,65 ve %3,93 oranlarında olduğu belirlenmiştir.

Yürütülen sayısal ve deneysel çalışma sayesinde ani genişleyen dairesel kesitli kanalda pasif ve aktif ısı transfer iyileştirme yöntemlerinin kullanılabilirliği sistemin termo-hidrolik ve genel performansları ele alınarak incelenmiştir. Ani genişleyen kanallarda yeniden birleşme noktasına kadar mesafede ikincil akışların gerçekleşmesinden dolayı ısı transferinin düşük seviyede kalması bu akış geometrisinin kullanıldığı ısıtma uygulamaları, soğutma uygulamaları ve yüksek performanslı ısı değiştiriciler gibi sistemlerin performansını önemli derecede etkilemektedir.

Kanatçık, nanoakışkan akışı ve manyetik alan etkisini bir arada inceleyecek olan araştırmacıların, öncelikle sayısal analiz yaparak optimum performansı sağlayacak geometri, nanoakışkan türü ve boyutu, manyetik alan tipi ve şiddeti ile akış koşullarını belirlemeleri, ardından deneysel çalışmalara başlamaları gerek maliyet gerek performans ve zaman açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürde ani genişleyen kanal üzerindeki ısı transferi iyileştirme çalışmalarının sınırlı olması araştırmacıları farklı tekniklerin uygulanmasına yönelik motivasyonu artırabilecektir. Özellikle ani genişleyen kanalın yeniden birleşme noktasına kadar olan ikincil akış bölgesindeki akış karakteristiğinin farklı akım tipine ve şiddetine sahip manyetik alan uygulanması, farklı ani genişleyen kanal açısı ile sistem tasarımı

yapılarak bu noktadaki Coanda etkisinin incelenmesi, türbülanslı akış rejiminin analizi, yüksek elektriksel iletkenliğe sahip nanopartiküllerin kullanımı, farklı çukur kanat tipi ve dizilimi üzerinde araştırmalar yapılarak bu akış geometrisi üzerindeki bilimsel araştırmalar çeşitlik kazanabilir. Yürütülen sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar uluslararası makale ve bildiri olarak yayımlanmış (EK AÇIKLAMALAR C.) ve ilgili literatüre kazandırılmıştır. Çalışma sonucu kazanılan tecrübeler ve yapılan izlenimler neticesinde gelecekteki çalışmalara ilişkin perspektifler Şekil 5.1 ile özetlenmiş olup, bu kapsamda yapılan ve dahil olduğum çalışmalar EK AÇIKLAMALAR C’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Ani genişleyen dairesel kesitli kanallardaki ısı transfer performansını artırmaya yönelik uygulanabilecek çalışmalar.



## KAYNAKLAR

1. Konieczny, M. and Łukasz Felkowski, "Thermal - strength analysis of a cross - fl ow heat exchanger and its design improvement", *Open Engineering*, 11: 1069–1075 (2021).
2. Bejan, A. and Kraus, A. D., "Heat Transfer Handbook, Volume 1", *John Wiley & Sons, Inc.*, 1479 (2003).
3. Chudnovsky, Y. and Kozlov, A., "Development and Field Trial of Dimpled-Tube Technology for Chemical Industry Process Heaters", *U.S. Department Of Energy Office Of Scientific And Technical Information*, (September): (2006).
4. García, A., Solano, J. P., Vicente, P. G., and Viedma, A., "The influence of artificial roughness shape on heat transfer enhancement: Corrugated tubes, dimpled tubes and wire coils", *Applied Thermal Engineering*, 35 (1): 196–201 (2012).
5. Kumar, A., Maithani, R., Amar, &, and Suri, R. S., "Numerical and experimental investigation of enhancement of heat transfer in dimpled rib heat exchanger tube", *Heat Mass Transfer*, 53: 1501–1516 (2017).
6. Bahiraei, M., Naseri, M., and Monavari, A., "Thermal-hydraulic performance of a nanofluid in a shell-and-tube heat exchanger equipped with new trapezoidal inclined baffles: Nanoparticle shape effect", *Powder Technology*, 395: 348–359 (2022).
7. Zhang, D., He, Z., Guan, J., Tang, S., and Shen, C., "Heat transfer and flow visualization of pulsating heat pipe with silica nanofluid: An experimental study", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 183: 122100 (2022).
8. Khetib, Y., Alzaed, A., Tahmasebi, A., Sharifpur, M., and Cheraghian, G., "Influence of using innovative turbulators on the exergy and energy efficacy of flat plate solar collector with DWCNTs-TiO<sub>2</sub>/water nanofluid", *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 51: 101855 (2022).
9. Mustafa, J., Alqaed, S., and Sharifpur, M., "Evaluation of energy efficiency, visualized energy, and production of environmental pollutants of a solar flat plate collector containing hybrid nanofluid", *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 53: 102399 (2022).

10. Hamed, H. H., Awad E. Mohammed, Khalefa, R. A., Omar Abed Habeeb, and Abdulqader, M. A., "The Effect of Using Compound Techniques (Passive and Active) on the Double Pipe Heat Exchanger Performance", *Egyptian Journal Of Chemistry*, 64 (6): 2797–2802 (2021).
11. Zhang, X. and Zhang, Y., "Experimental study on enhanced heat transfer and flow performance of magnetic nanofluids under alternating magnetic field", *International Journal Of Thermal Sciences*, 164: 106897 (2021).
12. Gürdal, M., Pazarlıoğlu, H. K., Tekir, M., Arslan, K., and Gedik, E., "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 (2022).
13. Shah, R. K., Drave, J. K., and Khandekar, S., "Thermal Transport in Laminar Convective Flow of Ferrofluids in the Presence of External Magnetic Field", *J. Heat Transfer*, 143: (2021).
14. Zhai, X., Qi, C., Yang, Y., and Wang, J., "Thermo-hydraulic performance of nanofluids under adjustable magnetic field", *Applied Thermal Engineering*, 186: 116491 (2021).
15. Chen, J., Li, H., and Wang, D., "Investigation on transient response of the direct expansion solar assisted ejector-compression heat pump cycle for water heater", *Applied Thermal Engineering*, 213: 118700 (2022).
16. A, R. and Chakraborty, S., "Estimation of the thermohydraulic performance of a microchannel heat sink with gradual and sudden variation of the flow passage", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 190: 122776 (2022).
17. Li, W., Chen, X., Cai, W., and Musa, O., "Numerical Investigation of the Effect of Sudden Expansion Ratio of Solid Fuel Ramjet Combustor with Swirling Turbulent Reacting Flow", (2019).
18. Ma, D. D., Xia, G. D., Zong, L. X., Jia, Y. T., Tang, Y. X., and Zhi, R. P., "Experimental investigation of flow boiling heat transfer performance in zigzag microchannel heat sink for electronic cooling devices", *International Journal Of Thermal Sciences*, 145: 106003 (2019).
19. Zhao, S., Hu, R., Nie, Y., Sheng, L., He, W., Zhu, N., Li, Y., Ji, D., and Guo, K., "Intensification of mixing efficiency and reduction of pressure drop in a millimeter scale T-junction mixer optimized by an elliptical array hole structure", *Chemical Engineering And Processing - Process Intensification*, 178: 109034 (2022).
20. Alrashed, A. A. A. A., Akbari, O. A., Heydari, A., Toghraie, D., Zarringhalam, M., Shabani, G. A. S., Seifi, A. R., and Goodarzi, M., "The numerical modeling of water/FMWCNT nanofluid flow and heat transfer in a

- backward-facing contracting channel", *Physica B: Condensed Matter*, 537: 176–183 (2018).
21. Yazdani, S. and Lakzian, E., "Numerical simulation and passive control of condensing flow through turbine blade by NVD Method Using Eulerian–Lagrangian Model", *Computers & Mathematics With Applications*, 80 (1): 140–160 (2020).
  22. Kenneth R. Cramer, "On Laminar Separation Bubbles", *Journal Of The Aeronautical Science*, 25 (143–144): (1958).
  23. Nouri, D., Pasandideh-Fard, M., Javad Oboodi, M., Mahian, O., and Sahin, A. Z., "Entropy generation analysis of nanofluid flow over a spherical heat source inside a channel with sudden expansion and contraction", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 116: 1036–1043 (2018).
  24. Choi, H. H., Nguyen, V. T., and Nguyen, J., "Numerical Investigation of Backward Facing Step Flow over Various Step Angles", *Procedia Engineering*, 154: 420–425 (2016).
  25. Kanna, P. R., Taler, J., Anbumalar, V., Santhosh Kumar, A. V., Pushparaj, A., and Christopher, D. S., "Conjugate heat transfer from sudden expansion using nanofluid", *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 67 (1): 75–99 (2015).
  26. Lobanov, P. D. and Pakhomov, M. A., "Experimental and numerical study of heat transfer enhancement in a turbulent bubbly flow in a sudden pipe expansion", *Journal Of Engineering Thermophysics*, 26 (3): 377–390 (2017).
  27. Afshin Goharzadeh and Rodgers, P., "Experimental Measurement of Laminar Axisymmetric Flow Through Confined Annular Geometries With Sudden Inward Expansion", *J. Fluids Eng.*, 131: (2009).
  28. Tihon, J., Pěnkavová, V., Havlica, J., and Šimčík, M., "The transitional backward-facing step flow in a water channel with variable expansion geometry", *Experimental Thermal And Fluid Science*, 40: 112–125 (2012).
  29. Mohammed, H. A., Al-aswadi, A. A., Abu-Mulaweh, H. I., and Shuaib, N. H., "Influence of nanofluids on mixed convective heat transfer over a horizontal backward-facing step", *Heat Transfer*, 40: 237–307 (2011).
  30. Abu-Nada, E., "Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step", *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 29 (1): 242–249 (2008).
  31. Mehrez, Z., Afif, •, and Cefsi, E., "Forced convection magnetohydrodynamic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu/water hybrid nanofluid flow over a backward-facing step", .

32. Kherbeet, A. S., Mohammed, H. A., and Salman, B. H., "The effect of nanofluids flow on mixed convection heat transfer over microscale backward-facing step", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 55 (21–22): 5870–5881 (2012).
33. Bearman, P. W. and Harvey, J. K., "Control of circular cylinder flow by the use of dimples", *AIAA Journal*, 31 (10): 1753–1756 (1993).
34. Zhang, L., Xiong, W., Zheng, J., Liang, Z., and Xie, S., "Numerical analysis of heat transfer enhancement and flow characteristics inside cross-combined ellipsoidal dimple tubes", *Case Studies In Thermal Engineering*, 25: 100937 (2021).
35. Pazarlıoğlu, H. K., Gürdal, M., Arslan, K., and Gedik, E., "Numerical Investigation on Heat Transfer and Flow Behaviours of NiO/H<sub>2</sub>O Nanofluid Flowing in Dimpled Tube Numerical Investigation on Heat Transfer and Flow Behaviours of NiO / H<sub>2</sub> O Nanofluid Flowing in Dimpled Tube", *3rd European Symposium On Nanofluids*, (September): 2–6 (2021).
36. Ramadhan, A. and Obaidi, A., "Study the influence of concavity shapes on augmentation of heat transfer performance, pressure field, and fluid pattern in three-dimensional pipe", *Heat Transfer*, (January): 4354–4381 (2021).
37. Liao, W., Liu, X., Li, G., and Chen, T., "Evaluation of thermal-hydraulic performance of dimpled tube from the perspective of skewness and kurtosis", *International Journal Of Thermal Sciences*, 156: 106469 (2020).
38. Dagdevir, T., Uyanik, M., and Ozceyhan, V., "The experimental thermal and hydraulic performance analyses for the location of perforations and dimples on the twisted tapes in twisted tape inserted tube", *International Journal Of Thermal Sciences*, 167: 107033 (2021).
39. Cheraghi, M. H., Ameri, M., and Shahabadi, M., "Numerical study on the heat transfer enhancement and pressure drop inside deep dimpled tubes", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 147: 118845 (2020).
40. Eiamsa-ard, S., Wongcharee, K., Kunnarak, K., Kumar, M., and Chuwattabakul, V., "Heat transfer enhancement of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid flow in dimpled tube with twisted tape insert", 55: 2987–3001 (2019).
41. Manoram, R. B., Sathiya Moorthy, · R, and Ragunathan, · R, "Investigation on influence of dimpled surfaces on heat transfer enhancement and friction factor in solar water heater", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 145: 541–558 (2021).
42. Aroonrat, K. and Wongwises, S., "Experimental investigation of condensation heat transfer and pressure drop of R-134a flowing inside dimpled tubes with different dimpled depths", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 128: 783–793 (2019).

43. Firoozi, A. O., Majidi, S., and Ameri, M., "A numerical assessment on heat transfer and flow characteristics of nanofluid in tubes enhanced with a variety of dimple configurations", *Thermal Science And Engineering Progress*, 19: 100578 (2020).
44. Choi, S. U. S. and J. A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *American Society Of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED*, 231: 99–105 (1995).
45. Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., and Hishinuma, N., "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles. Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Ultra-Fine Particles.", *Netsu Bussei*, 7 (4): 227–233 (1993).
46. Choon Pak, B. and Cho, Y. I., "EXPERIMENTAL HEAT TRANSFER An International Journal HYDRODYNAMIC AND HEAT TRANSFER STUDY OF DISPERSED FLUIDS WITH SUBMICRON METALLIC OXIDE PARTICLES", (2007).
47. Kalbande, V. P., Walke, P. V., and Rambhad, K., "Performance of oil-based thermal storage system with parabolic trough solar collector using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and soybean oil nanofluid", *International Journal Of Energy Research*, 45 (10): 15338–15359 (2021).
48. Sidik, N. A. C., Yazid, M. N. A. W. M., and Mamat, R., "A review on the application of nanofluids in vehicle engine cooling system", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 68: 85–90 (2015).
49. Garud, K. S., Seong-Guk Hwang, Jeong-Woo Han, and Moo-Yeon Lee, "Review on Performance Enhancement of Photovoltaic/Thermal–Thermoelectric Generator Systems with Nanofluid Cooling", *Symmerty*, 14 (1): 2–22 (2022).
50. Lekbir, A., Hassani, S., Mekhilef, S., Saidur, R., Ab Ghani, M. R., and Gan, C. K., "Energy performance investigation of nanofluid-based concentrated photovoltaic / thermal-thermoelectric generator hybrid system", *International Journal Of Energy Research*, 45 (6): 9039–9057 (2021).
51. Abbas, F., Ali, H. M., Shah, T. R., Babar, H., Janjua, M. M., Sajjad, U., and Amer, M., "Nanofluid: Potential evaluation in automotive radiator", *Journal Of Molecular Liquids*, 297: 112014 (2020).
52. Kumar, A. and Subudhi, S., "Preparation, characterization and heat transfer analysis of nanofluids used for engine cooling", *Applied Thermal Engineering*, 160: 114092 (2019).
53. Du, R., Jiang, D. D., Wang, Y., and Wei Shah, K., "An experimental investigation of CuO/water nanofluid heat transfer in geothermal heat exchanger", *Energy And Buildings*, 227: 110402 (2020).

54. Fares, M., AL-Mayyahi, M., and AL-Saad, M., "Heat transfer analysis of a shell and tube heat exchanger operated with graphene nanofluids", *Case Studies In Thermal Engineering*, 18: 100584 (2020).
55. Rahmani, M., Shahabi Nejad, A., Fallah Barzoki, M., Kasaeian, A., and Sameti, M., "Simulation of solar absorption refrigeration cycle with CuO nanofluid for summer cooling of a residential building", *Thermal Science And Engineering Progress*, 34: 101419 (2022).
56. Karakoyun, Y., Acikgoz, O., Kucukyildirim, B. O., Yumurtaci, Z., and Dalkilic, A. S., "An experimental investigation on the effect of use of nanofluids in radiant floor heating systems", *Energy And Buildings*, 252: 111406 (2021).
57. Rahnama, Z. and Ansarifar, G. R., "Nanofluid application for heat transfer, safety, and natural circulation enhancement in the NuScale nuclear reactor as a small modular reactor using computational fluid dynamic (CFD) modeling via neutronic and thermal-hydraulics coupling", *Progress In Nuclear Energy*, 138: 103796 (2021).
58. Kianpour, R. and Ansarifar, G. R., "Assessment of the nano-fluid effects on the thermal reactivity feedback coefficients in the VVER-1000 nuclear reactor with nano-fluid as a coolant using thermal hydraulic and neutronics analysis", *Annals Of Nuclear Energy*, 133: 623–636 (2019).
59. Shang, Y., Balali Dehkordi, R., Chupradit, S., Toghraie, D., Sevbitov, A., Hekmatifar, M., Suksatan, W., and Sabetvand, R., "The computational study of microchannel thickness effects on H<sub>2</sub>O/CuO nanofluid flow with molecular dynamics simulations", *Journal Of Molecular Liquids*, 345: 118240 (2022).
60. Wang, J., Xu, Y. P., Qahiti, R., Jafaryar, M., Alazwari, M. A., Abu-Hamdeh, N. H., Issakhov, A., and Selim, M. M., "Simulation of hybrid nanofluid flow within a microchannel heat sink considering porous media analyzing CPU stability", *Journal Of Petroleum Science And Engineering*, 208: 109734 (2022).
61. He, W., Toghraie, D., Lotfipour, A., Pourfattah, F., Karimipour, A., and Afrand, M., "Effect of twisted-tape inserts and nanofluid on flow field and heat transfer characteristics in a tube", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 110: 104440 (2020).
62. Sajid, M. U., Ali, H. M., Sufyan, A., Rashid, D., Zahid, S. U., and Rehman, W. U., "Experimental investigation of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid flow and heat transfer inside wavy mini-channel heat sinks", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 137 (4): 1279–1294 (2019).
63. Osman, S., Sharifpur, M., and Meyer, J. P., "Experimental investigation of convection heat transfer in the transition flow regime of aluminium oxide-water nanofluids in a rectangular channel", *International Journal Of Heat*

- And Mass Transfer*, 133: 895–902 (2019).
64. Klazly, M. and Bogнар, G., "Heat transfer enhancement for nanofluid flows over a microscale backward-facing step", *Alexandria Engineering Journal*, 61 (10): 8161–8176 (2022).
  65. Gürdal, M., Pazarlıoğlu, H. K., Tekir, M., Arslan, K., Gedik, E., and Taşkesen, E., "Experimental investigation on thermo hydraulic performance of ferronanofluid flow in a dimpled tube under magnetic field effect", *Experimental Heat Transfer*, 00 (00): 1–19 (2022).
  66. Darzi, A. A. R., Farhadi, M., and Sedighi, K., "Heat transfer and flow characteristics of AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nanofluid in a double tube heat exchanger", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 47: 105–112 (2013).
  67. Khoshvaght-Aliabadi, M., "Influence of different design parameters and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid flow on heat transfer and flow characteristics of sinusoidal-corrugated channels", *Energy Conversion And Management*, 88: 96–105 (2014).
  68. Fazeli, I., Sarmasti Emami, M. R., and Rashidi, A., "Investigation and optimization of the behavior of heat transfer and flow of MWCNT-CuO hybrid nanofluid in a brazed plate heat exchanger using response surface methodology", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 122: 105175 (2021).
  69. Yang, D., Sun, B., Li, H., and Fan, X., "Experimental study on the heat transfer and flow characteristics of nanorefrigerants inside a corrugated tube", *International Journal Of Refrigeration*, 56: 213–223 (2015).
  70. Wang, W., Zhang, B., Cui, L., Zheng, H., Klemeš, J. J., and Wang, J., "Numerical study on heat transfer and flow characteristics of nanofluids in a circular tube with trapezoid ribs", *Open Physics*, 19 (1): 224–233 (2021).
  71. Hartmann, J., "Hg-DYNAMICS I: Theory of the Laminar Conductive Liquid in a Homogeneous Magnetic Field", *Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab. Matematisk-Fysiske Meddelelser*, 15 (6): 1–28 (1937).
  72. Mousavi, S. V., Sheikholeslami, M., Gorji bandpy, M., and Barzegar Gerdroodbary, M., "The Influence of magnetic field on heat transfer of magnetic nanofluid in a sinusoidal double pipe heat exchanger", *Chemical Engineering Research And Design*, 113: 112–124 (2016).
  73. Rahman, M. M., Mojumder, S., Saha, S., Mekhilef, S., and Saidur, R., "Augmentation of natural convection heat transfer in triangular shape solar collector by utilizing water based nanofluids having a corrugated bottom wall", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 50: 117–127 (2014).

74. Sheikholeslami, M., Abelman, S., and Ganji, D. D., "Numerical simulation of MHD nanofluid flow and heat transfer considering viscous dissipation", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 79: 212–222 (2014).
75. Dharmendar Reddy, Y., Mebarek-Oudina, F., and Shankar Goud, B., "Radiation, Velocity and Thermal Slips Effect Toward MHD Boundary Layer Flow Through Heat and Mass Transport of Williamson Nanofluid with Porous Medium", *Arabian Journal For Science And Engineering*, (2022).
76. Uddin, I., Khan, M. A., Ullah, S., Islam, S., Israr, M., and Hussain, F., "Characteristics of buoyancy force on stagnation point flow with magneto-nanoparticles and zero mass flux condition", *Results In Physics*, 8: 160–168 (2018).
77. Arjun, K. S. and Rakesh, K., "Heat transfer in magnetohydrodynamic nanofluid flow past a circular cylinder", *Physics Of Fluids*, 32 (4): (2020).
78. Sheikholeslami, M., Nimafar, M., and Ganji, D. D., "Nanofluid heat transfer between two pipes considering Brownian motion using AGM", *Alexandria Engineering Journal*, 56 (2): 277–283 (2017).
79. M. Hadavand and A. C. M. Sousa, "Lattice Boltzmann Simulation of Three-Dimensional Thermomagnetic Convection in a Micro-Channel", *AIP Conference Proceedings*, 503: (2011).
80. Ghasemian, M., Najafian Ashrafi, Z., Goharkhah, M., and Ashjaee, M., "Heat transfer characteristics of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ferrofluid flowing in a mini channel under constant and alternating magnetic fields", *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, 381: 158–167 (2015).
81. Motozawa, M., Chang, J., Sawada, T., and Kawaguchi, Y., "Effect of magnetic field on heat transfer in rectangular duct flow of a magnetic fluid", *Physics Procedia*, 9: 190–193 (2010).
82. Ghofrani, A., Dibaei, M. H., Hakim Sima, A., and Shafii, M. B., "Experimental investigation on laminar forced convection heat transfer of ferrofluids under an alternating magnetic field", *Experimental Thermal And Fluid Science*, 49: 193–200 (2013).
83. Zhang, X. and Zhang, Y., "Heat transfer and flow characteristics of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-water nanofluids under magnetic excitation", *International Journal Of Thermal Sciences*, 163: 106826 (2021).
84. Heidary, H., Hosseini, R., Pirmohammadi, M., and Kermani, M. J., "Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel", *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, 374: 11–17 (2015).
85. Sheikholeslami, M. and Ganji, D. D., "Magnetohydrodynamic flow in a



- permeable channel filled with nanouid", *Scientia Iranica*, 21 (1): 203–212 (2014).
86. Gürsoy, E., Kadir Pazarlıoğlu, H., Dağdeviren, A., Gürdal, M., Gedik, E., Arslan, K., and Kurt, H., "Energy analysis of magnetite nanofluid flowing in newly designed sudden expansion tube retrofitted with dimpled fin", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 199: 123446 (2022).
  87. Hussain, S. and Ahmed, S. E., "Unsteady MHD forced convection over a backward facing step including a rotating cylinder utilizing Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-water ferrofluid", *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, 484 (April): 356–366 (2019).
  88. Jafari, H. and Goharkhah, M., "Application of electromagnets for forced convective heat transfer enhancement of magnetic fluids", *International Journal Of Thermal Sciences*, 157: 106495 (2020).
  89. Bahiraei, M. and Hangi, M., "Investigating the efficacy of magnetic nanofluid as a coolant in double-pipe heat exchanger in the presence of magnetic field", *Energy Conversion And Management*, 76: 1125–1133 (2013).
  90. Wen, D. and Ding, Y., "Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications", *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 26 (6): 855–864 (2005).
  91. Rimbault, B., Nguyen, C. T., and Galanis, N., "Experimental investigation of CuO–water nanofluid flow and heat transfer inside a microchannel heat sink", *International Journal Of Thermal Sciences*, 84: 275–292 (2014).
  92. Tekir, M., Taskesen, E., Gedik, E., Arslan, K., and Aksu, B., "Effect of constant magnetic field on Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Cu/water hybrid nanofluid flow in a circular pipe", *Heat And Mass Transfer*, 1: 3 (2022).
  93. Goharkhah, M., Salarian, A., Ashjaee, M., and Shahabadi, M., "Convective heat transfer characteristics of magnetite nanofluid under the influence of constant and alternating magnetic field", *Powder Technology*, 274: 258–267 (2015).
  94. Lei, J., Luo, Z., Qing, S., Huang, X., and Li, F., "Effect of surfactants on the stability, rheological properties, and thermal conductivity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluids", *Powder Technology*, 399: 117197 (2022).
  95. Hajnorouzi, A. and Modaresi, N., "Direct sono electrochemical method for synthesizing Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles", *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, 505: 166732 (2020).
  96. Ali, N., Teixeira, J. A., and Addali, A., "Aluminium nanofluids stability: A comparison between the conventional two-step fabrication approach and the controlled sonication bath temperature method", *Journal Of Nanomaterials*,

- 2019: 1–9 (2019).
97. Çengel, Y. A. and Ghajar, A. J., "Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications", Heat and Mass Transfer, 1208 (2015).
  98. Jiji, L. M., "Heat Convection", Second Edi. Ed., *Springer*, New York, 552 (2009).
  99. Favre-marinet, M. and Tardu, S., "Convective Heat Transfer", *John Wiley & Sons, Inc.*, (2009).
  100. Sharifi, S., Aligoodarz, M. R., and Rahbari, A., "Thermohydraulic performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid during single-phase flow and two-phase subcooled flow boiling", *International Journal Of Thermal Sciences*, 179 (September 2021): 107605 (2022).
  101. Fattahi, A. and Karimi, N., "Numerical simulation of the effects of superhydrophobic coating in an oval cross-sectional solar collector with a wavy absorber filled with water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ternary hybrid nanofluid", *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 50 (December 2021): 101881 (2022).
  102. Ambreen, T., Saleem, A., and Park, C. W., "Thermal efficiency of eco-friendly MXene based nanofluid for performance enhancement of a pin-fin heat sink: Experimental and numerical analyses", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 186: 122451 (2022).
  103. UrRehman, T., Hafiz, ·, and Ali, M., "Thermal performance analysis of metallic foam-based heat sinks embedded with RT-54HC paraffin: an experimental investigation for electronic cooling", *Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry*, 140: 979–990 (2020).
  104. Bagre, N., Ashok, ·, Parekh, D., and Patel, V. K., "Experimental study of temperature separation in a vortex tube based on various shape of cold orifice vortex generator", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 44 (3): 434 (2022).
  105. Sabiha, M. A., Saidur, R., Hassani, S., Said, Z., and Mekhilef, S., "Energy performance of an evacuated tube solar collector using single walled carbon nanotubes nanofluids", *Energy Conversion And Management*, 105: 1377–1388 (2015).
  106. Tu, J., Yeoh, G.-H., and Liu, C., "Computational Fluid Dyanmics", *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1689–1699 (2013).
  107. Karikalán, L., Baskar, S., Poyyamozhi, N., and Negash, K., "Experimental Analysis of Heat Transfer by Using Nanofluid and Impact of Thermophysical Properties", *Journal Of Nanomaterials*, 8 (2022).

108. Ataei, M., Farhad, &, Moghanlou, S., Noorzadeh, S., Vajdi, M., Mehdi, &, and Asl, S., "Heat transfer and flow characteristics of hybrid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>-water nanofluid in a minichannel heat sink", *Heat And Mass Transfer*, 56: 2757–2767 (2020).
109. Wen, T., Zhu, G., and Lu, L., "Experimental and artificial neural network based study on the heat transfer and flow performance of ZnO-EG/water nanofluid in a mini-channel with serrated fins", *International Journal Of Thermal Sciences*, 170: 107149 (2021).
110. Shahsavari, A., Moradi, K., Yıldız, Ç., Farhadi, P., and Arıcı, M., "Effect of nanoparticle shape on cooling performance of boehmite-alumina nanofluid in a helical heat sink for laminar and turbulent flow regimes", *International Journal Of Mechanical Sciences*, 217: 107045 (2022).
111. Saghir, M. Z., Ahadi, A., Yousefi, T., and Farahbakhsh, B., "Two-phase and single phase models of flow of nanofluid in a square cavity: Comparison with experimental results", *International Journal Of Thermal Sciences*, 100: 372–380 (2016).
112. Akbari, M., Galanis, N., and Behzadmehr, A., "Comparative assessment of single and two-phase models for numerical studies of nanofluid turbulent forced convection", *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 37: 136–146 (2012).
113. Albojamal, A. and Vafai, K., "Analysis of single phase, discrete and mixture models, in predicting nanofluid transport", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 114: 225–237 (2017).
114. Moallemi, N. and Brinkerhoff, J. R., "Numerical analysis of laminar and transitional flow in a planar sudden expansion", *Computers And Fluids*, 140: 209–221 (2016).
115. Guo, Z. Y., Li, D. Y., and Wang, B. X., "A novel concept for convective heat transfer enhancement", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 41 (14): 2221–2225 (1998).
116. Li, F., Ma, Q., Xin, G., Zhang, J., and Wang, X., "Heat transfer and flow characteristics of microchannels with solid and porous ribs", *Applied Thermal Engineering*, 178: 115639 (2020).
117. Gürsoy, E., Pazarlıoğlu, H. K., Gürdal, M., Gedik, E., and Arslan, K., "Entropy generation of ferronanofluid flow in industrially designed bended dimpled tube", *Thermal Science And Engineering Progress*, 37: 101620 (2023).
118. Xie, S., Liang, Z., Zhang, L., and Wang, Y., "A numerical study on heat transfer enhancement and flow structure in enhanced tube with cross ellipsoidal dimples", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*,

- 125: 434–444 (2018).
119. Rasheed, H. U., Khan, W., Khan, I., Alshammari, N., Hamadneh, N., and others, "Numerical computation of 3D Brownian motion of thin film nanofluid flow of convective heat transfer over a stretchable rotating surface", *Scientific Reports*, 12 (1): 1–14 (2022).
  120. Nkurikiyimfura, I., Wang, Y., and Pan, Z., "Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids—A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 21: 548–561 (2013).
  121. Piñeiro, M. M., Apmann, K., Fulmer, R., Scherer, B., Good, S., Wohld, J., and Vafaei, S., "Nanofluid Heat Transfer: Enhancement of the Heat Transfer Coefficient inside Microchannels", *Nanomaterials*, (2022).
  122. di Schio, E., Celli, M., and Barletta, A., "Effects of Brownian diffusion and thermophoresis on the laminar forced convection of a nanofluid in a channel", *Journal Of Heat Transfer*, 136 (2): (2014).
  123. Wang, R., Chen, T., Qi, J., Du, J., Pan, G., and Huang, L., "Investigation on the heat transfer enhancement by nanofluid under electric field considering electrophoretic and thermophoretic effect", *Case Studies In Thermal Engineering*, 28: 101498 (2021).
  124. Michaelides, E. E., "Brownian movement and thermophoresis of nanoparticles in liquids", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 81: 179–187 (2015).
  125. Yin, Z.-Q., Li, X.-F., Bao, F.-B., Tu, C.-X., Gao, X.-Y., and others, "Thermophoresis and Brownian motion effects on nanoparticle deposition inside a 90 square bend tube", *Aerosol And Air Quality Research*, 18 (7): 1746–1755 (2018).
  126. Ghalambaz, M., Sabour, M., Sazgara, S., Pop, I., and Trâmbițaș, R., "Insight into the dynamics of ferrohydrodynamic (FHD) and magnetohydrodynamic (MHD) nanofluids inside a hexagonal cavity in the presence of a non-uniform magnetic field", *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, 497: 166024 (2020).
  127. Sheikholeslami, M. and Ganji, D. D., "Ferrohydrodynamic and magnetohydrodynamic effects on ferrofluid flow and convective heat transfer", *Energy*, 75: 400–410 (2014).
  128. Soltanipour, H., "Two-phase simulation of magnetic field effect on the ferrofluid forced convection in a pipe considering Brownian diffusion, thermophoresis, and magnetophoresis", *The European Physical Journal Plus*, 135 (9): 1–23 (2020).
  129. Yarahmadi, M., Moazami Goudarzi, H., and Shafii, M. B., "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 (2015).

130. Syam Sundar, L., Ravi Kumar, N. T., Naik, M. T., and Sharma, K. V., "Effect of full length twisted tape inserts on heat transfer and friction factor enhancement with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanofluid inside a plain tube: An experimental study", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 55 (11–12): 2761–2768 (2012).
131. Bennis, A. and Bouaziz, M. N., "CFD modeling of turbulent forced convective heat transfer and friction factor in a tube for Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanofluid in the presence of a magnetic field", *Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers*, 78: 127–136 (2017).

**EK AÇIKLAMALAR A.**

**FERRRONANOAKŞIKANIN LABORATUVAR SONUÇLARI VE  
ELEMENTER ANALİZİ**




---

**NANOGRAFI NANOTECHNOLOGY**
**TECHNICAL DATA SHEET**
**PRODUCT INFORMATION**


---

Product Group	Nanopowder, Dispersion
Trade Name	Iron (II,III) Oxide
Product Number	NG09DNP01044
CAS Number (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	1317-61-9

**PRODUCT PROPERTIES**


---

Iron (II,III) Oxide	Value	Units
Average Diameter	20	nm
Purity	99.5+	%
BET	81.98	m <sup>2</sup> /g
pH	7-8	
Morphology	Spherical	
Color	Dark Brown (Black)	
Density	5172	kg/m <sup>3</sup>
Specific Heat Capacity	663	J/(kg.K)
Thermal Conductivity	9.6	W/(m.K)
Viscosity	1.35	

**Element Analysis**


---

Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Cr	Co	Na	Mn	Ni	Mg	Al
99.5+%	2 ppm	35 ppm	55 ppm	39 ppm	16 ppm	2 ppm	4.78 ppm

**PRODUCT DETAILS**


---

**Application Areas**

- Electromagnetic-wave absorption
- Electromagnetorheological fluids
- Magnetic cell separation
- High-density magnetic recording
- Magnetic coatings
- Magneto-optical devices
- Semiconductors
- Toners for copies and laser printers
- Microwave devices
- Removal of actinides from waste water

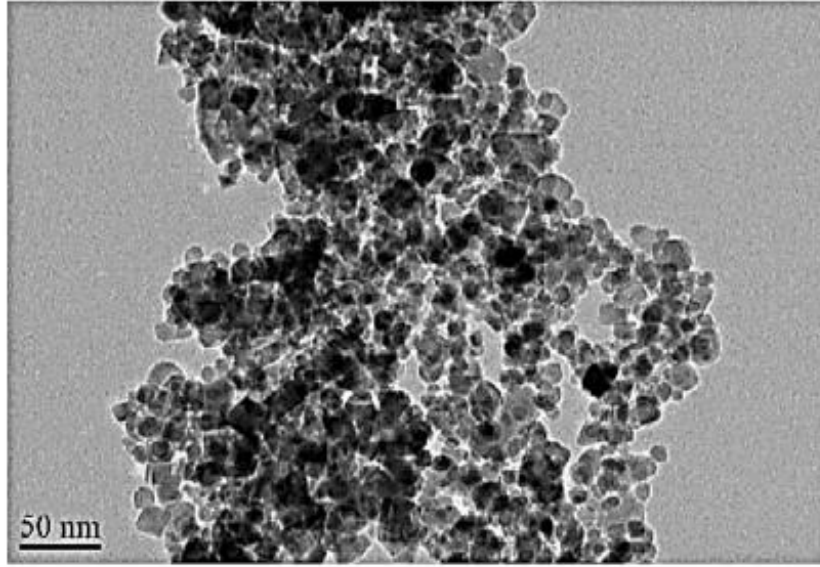
DISCLAIMER Users of this product should review the information in specific context of the planned use. To the maximum extent permitted by law, Nanografi Nanotechnology will not be responsible for damages of any nature resulting from the use or reliance upon the information contained in this data sheet. No express or implied warranties are given other than those implied mandatory by law.

Şekil Ek A.1. Temin edilen nanopartikülün teknik bilgileri.

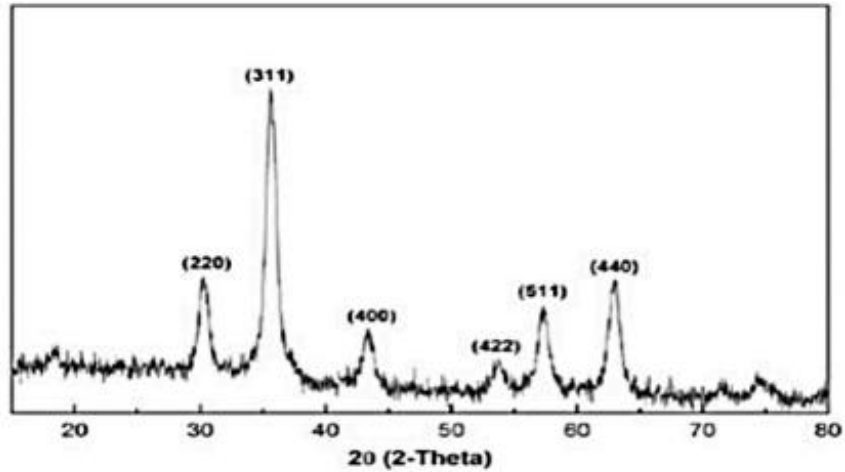
## NANOGRAFI NANOTECHNOLOGY

- Magnetic resonance imaging contrast enhancement
- Magnetic detectors
- Color imaging

### SEM Image of Product



### XRD Analysis of Product



DISCLAIMER Users of this product should review the information in specific context of the planned use. To the maximum extent permitted by law, Nanografi Nanotechnology will not be responsible for damages of any nature resulting from the use or reliance upon the information contained in this data sheet. No express or implied warranties are given other than those implied mandatory by law.

Şekil Ek A.2. Temin edilen nanopartikülün ayrıntılı SEM ve XRD görüntüleri.



**EK AÇIKLAMALAR B.**

**BELİRSİZLİK ANALİZİ**

Çizelge Ek B.1. Belirsizlik analizinin detaylı sonuçları.

Ekipman	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Parametresi	Toplam Belirsizlik	Ölçülen Değer		Belirsizlik Oranı (%)	
				Min.	Max.	Min.	Max.
1. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 1 (T <sub>1</sub> )	$U = \sqrt{\sum_{i=1}^R \left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)^2 \cdot \frac{1}{(N-1)} \sum \left(X_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum X_i\right)^2\right)}$ =0,139627	(T <sub>x</sub> /°C) 25,4	(T <sub>x</sub> /°C) 27,7	(U <sub>x</sub> /T <sub>x</sub> ) 0,504	(U <sub>x</sub> /T <sub>x</sub> ) 0,550
2. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 2 (T <sub>2</sub> )	0,129331	25,6	27,6	0,469	0,505
3. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 3 (T <sub>3</sub> )	0,131315	25,7	27,8	0,472	0,511
4. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 4 (T <sub>4</sub> )	0,134235	25,7	27,8	0,483	0,522
5. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 5 (T <sub>5</sub> )	0,149937	25,1	27,7	0,541	0,597
6. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 6 (T <sub>6</sub> )	0,142577	25,3	27,8	0,513	0,564
7. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 7 (T <sub>7</sub> )	0,131604	25,7	27,9	0,472	0,512
8. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 8 (T <sub>8</sub> )	0,134498	25,7	27,9	0,482	0,523
9. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 9 (T <sub>9</sub> )	0,145327	25,6	28,1	0,517	0,568
10. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 10 (T <sub>10</sub> )	0,156629	25,1	27,9	0,561	0,624
11. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 11 (T <sub>11</sub> )	0,138177	25,4	27,9	0,495	0,544
12. T tip termokupl	-40/+200°C	Duvar sıcaklığı 12 (T <sub>12</sub> )	0,132580	25,8	27,9	0,475	0,514

Çizelge Ek B.1. (devam ediyor).

13. T tip termokupl	-40/+200°C	Giriş sıcaklığı (T <sub>13</sub> )	0,032542	17,2	17,7	0,184	0,189
14. T tip termokupl	-40/+200°C	Çıkış sıcaklığı 1 (T <sub>14</sub> )	0,030379	18,0	19,6	0,155	0,169
15. T tip termokupl	-40/+200°C	Çıkış sıcaklığı 2 (T <sub>15</sub> )	0,037680	17,3	22,5	0,167	0,218
16. T tip termokupl	-40/+200°C	İzolasyon sıcaklığı 1 (T <sub>16</sub> )	0,121146	26,4	28,1	0,431	0,459
17. T tip termokupl	-40/+200°C	İzolasyon sıcaklığı 2 (T <sub>17</sub> )	0,122599	26,4	28,1	0,436	0,464
18. T tip termokupl	-40/+200°C	Çıkış sıcaklığı 3 (T <sub>18</sub> )	0,032357	17,3	27,7	0,117	0,187
19. T tip termokupl	-40/+200°C	Rezervuar sıcaklığı (T <sub>19</sub> )	0,137000	26,0	27,7	0,495	0,527
20. T tip termokupl	-40/+200°C	Oda sıcaklığı 12 (T <sub>20</sub> )	0,142479	25,7	28,0	0,509	0,554
		Yığın sıcaklık	$T_b = \frac{T_{in} + \frac{1}{N} \sum T_{out,j}}{2} = \frac{T_{in} + (T_{out1} + T_{out2} + T_{out3})/3}{2}$ $U = \sum U_i = U_{in} + U_{out1} + U_{out2} + U_{out3}$ $= 0,132958$	17,37	20,48	0,649	0,766
		Duvar sıcaklığı	$T_w = \frac{1}{N} \sum T_{w,i} = \frac{T_{w1} + T_{w2} + T_{w3} + T_{w4} + T_{w5} + T_{w6}}{6}$ $U = \sum U_{w,i} = U_{w1} + U_{w2} + U_{w3} + U_{w4} + U_{w5} + U_{w6}$ $= 1,665838$	25,51	27,83	5,985	6,531

Çizelge Ek B.1. (devam ediyor).

Ekipman	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Parametresi	Toplam Belirsizlik	Ölçülen Değer		Belirsizlik Oranı (%)	
				Min.	Max.	Min.	Max.
HT201 Gaussmetre	0-2000 mT	Manyetik alan	$U = \sqrt{\sum_{i=1}^R \left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)^2 \cdot \frac{1}{(N-1)} \sum \left(X_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum X_i\right)^2\right)} = 0,002286$	(B <sub>x</sub> /T) 0,29	(B <sub>x</sub> /T) 0,35	(U <sub>x</sub> /B) 0,65	(U <sub>x</sub> /B) 0,79
Gentek GNT 605	0.055-6.0 lt/dk	Debi	$U = \sqrt{\sum_{i=1}^R \left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)^2 \cdot \frac{1}{(N-1)} \sum \left(X_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum X_i\right)^2\right)} = 0,001$	(V <sub>x</sub> /lt/dk) 0,065	(V <sub>x</sub> /lt/dk) 0,137	(U <sub>x</sub> /V) 0,061	(U <sub>x</sub> /V) 0,062
VFA VF-BFT210 / VF-UPI7-2200-23-210	0-6000 Pa	Fark basınç	$U = \sqrt{\sum_{i=1}^R \left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)^2 \cdot \frac{1}{(N-1)} \sum \left(X_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum X_i\right)^2\right)} = 0,001$	(ΔP/Pa) 0,68	(ΔP/Pa) 0,70	(U <sub>x</sub> / ΔP) 0,110	(U <sub>x</sub> / ΔP) 0,113
		Reynolds sayısı	$\frac{U_{Re}}{Re} = \left[ \left(\frac{\partial Re}{\partial \rho} \cdot \frac{U_{\rho}}{Re}\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial V} \cdot \frac{U_V}{Re}\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial D_H} \cdot \frac{U_{D_H}}{Re}\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \mu} \cdot \frac{U_{\mu}}{Re}\right)^2 \right]^{0.5}$	1000	2000	1,0	2,0
		Taşımla ısı transferi katsayısı	$\frac{U_h}{h} = \left[ \left(\frac{\partial h}{\partial q} \cdot \frac{U_q}{h}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_b} \cdot \frac{U_{T_b}}{h}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_w} \cdot \frac{U_{T_w}}{h}\right)^2 \right]^{0.5}$	(h/W/m <sup>2</sup> °C) 465,35	(h/W/m <sup>2</sup> °C) 927,24	(U <sub>x</sub> / h) 2,33	(U <sub>x</sub> / h) 2,88
		Nusselt sayısı	$\frac{U_h}{Nu} = \left[ \left(\frac{\partial Nu}{\partial h} \cdot \frac{U_h}{Nu}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial D_H} \cdot \frac{U_{D_H}}{Nu}\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial k} \cdot \frac{U_k}{Nu}\right)^2 \right]^{0.5}$	10,86	21,64	2,33	2,88
<b>Sistemin toplam belirsizliği</b>			$U_{total} = \sqrt{\sum (U_i^2)} = \sqrt{U_{Re}^2 + U_{Nu}^2}$			<b>2,33</b>	<b>2,88</b>

**EK AÇIKLAMALAR C.**

**TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAYIMLANAN ÇALIŞMALAR**

Çizelge Ek C.1. Tez çalışması kapsamında yayımlanan çalışmalar.

Sıra No	Makale/Bildiri Başlığı	Dergi/Sempozyum	Doi
1	The first and second law analyses of thermodynamics for CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O flow in a sudden expansion tube inserted elliptical dimpled fins	International Journal of Mechanical Sciences	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108144">https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108144</a>
2	Energy analysis of magnetite nanofluid flowing in newly designed sudden expansion tube retrofitted with dimpled fin	International Journal of Heat and Mass Transfer	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123446">https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123446</a>
3	Parametric analysis of different Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanoparticle shapes and expansion angles for sudden expanded tube regarding the first law of thermodynamics	International Journal of Thermal Sciences	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108759">https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108759</a>
4	Investigation of magneto-convection characteristics in a sudden expanding channel with convex surface geometry under thermally developing flow conditions	International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow	<a href="https://doi.org/10.1108/HFF-11-2023-0703">https://doi.org/10.1108/HFF-11-2023-0703</a>
5	Numerical simulation of sudden expansion tubes with Ag-MgO nanofluid and innovative fin structure: A thermo-fluidic analysis	International Journal of Heat and Fluid Flow	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109448">https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109448</a>
6	Farkli Nanopartikül Şekillerinin Entropi Üretimine Etkisinin Eliptik Çukur Kanat Yapısına Sahip Ani Genişlemeli Kanalda İncelenmesi	Uluslararası Katılımlı 24. İsi Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK'23)	-

Çizelge Ek C.1. (devam ediyor).

7	Effect of DC Magnetic Field Strength on Volumetric Entropy Generation in Sudden Expansion Tube with Dimpled Fin	Twentieth International Conference on Fluid Dynamics	-
8	Energy, Entropy, and Exergy Analyses of Sudden Expansion Tube with Convex Surface Using Ferrofluid	ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer (CHT-24)	-
9	Scrutinizing of Heat Transfer and Flow Mechanism in Circular Backward-facing Step Considering Ferrofluid Flow Under Magnetic Field Effect	International Conference of the Doctoral School	-

## ÖZGEÇMİŞ

Emrehan GÜRSOY ilk, orta ve lise eğitimini Ordu'da tamamladı. Lisans ve Yüksek Lisans Eğitimlerini ise Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde sırasıyla 2017 ve 2020 yıllarında tamamlayarak mezun olmuştur. 2020 yılında yine Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Eğitimine başlamıştır. 2017 yılından itibaren Kardemir Karabük Demir Çelik Sanayi ve Anonim Şirketine 6 yıl Hava Ayrıştırma Tesisleri İşletme Mühendisliği görevini yürütmüş ve günümüzde aynı şirkette Denetçi unvanı ile çalışma hayatına devam etmektedir.