



**GÖZYAŞI DESENLİ KANALLARDA ND-
FE₃O₄/SU-EG HİBRİT NANOAKIŞKANIN AKIŞ
VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Esra SABAN

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

**GÖZYAŞI DESENLİ KANALLARDA ND- Fe_3O_4 /SU-EG HİBRİT
NANOAKIŞKANIN AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Esra SABAN

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

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

**KARABÜK
Ocak 2024**

Esra SABAN tarafından hazırlanan “GÖZYAŞI DESENLİ KANALLARDA ND- FE_3O_4 /SU-EG HİBRİT NANOAKIŞKANIN AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans 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 Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 18/01/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet GÜRDAL (KÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans 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.”

Esra SABAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÖZYAŞI DESENİ KANALLARDA ND-Fe₃O₄/SU-EG HİBRİT NANOAKIŞKANIN AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Esra SABAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Engin GEDİK

Ocak 2024, 61 sayfa

Bu çalışmada, farklı boyutlarda gözyaşı damlası şeklindeki çukur kanat yapısına sahip dairesel kesitli kanaldan akan farklı hacimsel konsantrasyona (ϕ) sahip nanoelmas+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol hibrit nanoakışkanının akış ve ısı transferi karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada nanoelmas (ND) ve Fe₃O₄'ün baz akışkanlar içerisindeki hacimsel oranı $\phi = \%0,1$ ve $\%0,2$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca hibrit nanoakışkanın akış ve ısı karakteristiklerini detaylı bir şekilde inceleyebilmek için sadece suyun (H₂O), etilen glikolün (EG) ve $\%60$ Su+ $\%40$ Etilen Glikol karışımından oluşan baz akışkanlar ile kıyaslamaları yapılmıştır. Benzer şekilde gözyaşı damlası şeklindeki çukur kanatçıkların (PK1 ve PK2) etkisini incelemek için ise analizler dairesel kesitli düz kanal (DK) analizleri ile karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yürütülen analizlerde kanal yüzeyine $q'' = 600 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısı uygulanmış ve analizler laminer akış şartlarında ($500 \leq Re \leq 2000$) yapılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarına göre çalışmada incelenen bütün kanallar için taşınım ile olan

ısı transferi değeri Reynolds sayısı ile artış göstermiştir. Nanopartikül hacimsel konsantrasyon artışı da bu artışı desteklemiştir. DK kanalda baz akışkan suya göre en yüksek taşınım ile olan ısı transferi artışı %44,4 ile $\phi=0,2\text{ND}+\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Su}+\text{Etilen Glikol}$ hibrit nanoakışkanında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte nanopartikül hacimsel konsantrasyon artışı kanal içi basınç düşümü değerlerini de arttırmıştır. Çalışmada aynı zamanda ısı transfer artışı miktarının basınç düşümü artış miktarına oranı olarak tanımlanan Performans Değerlendirme Katsayısı (PDK) değerleri belirlenmiş olup en yüksek PDK değeri 4,26 ile PK2 kanalında %0,1 hacimsel konsantrasyonlu $\text{ND}+\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Su}+\text{Etilen Glikol}$ nanoakışkanda elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Nanoakışkan, Isı taşınımı, Gözyaşı desenli çukur kanatçık, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği.

Bilim Kodu : 92807

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF ND-Fe₃O₄/SU-EG HYBRID NANOFLUID IN TEARDROP SHAPED DIMPLED CHANNELS

Esra SABAN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Engin GEDİK

January 2024, 61 pages

In this study, the flow and heat transfer characteristics of nanodiamond + Fe₃O₄/Water + Ethylene Glycol hybrid nanofluid with different volumetric concentration (ϕ) flowing through a circular cross-section channel with a teardrop-shaped dimple fin structure of different sizes were numerically investigated. In the study, the volumetric ratio of nanodiamond (ND) and Fe₃O₄ in the base fluids was determined as $\phi=0.1$ and 0.2 . In addition, in order to examine the flow and thermal characteristics of the hybrid nanofluid in detail, comparisons were made with base fluids consisting of only water (H₂O), ethylene glycol (EG) and a mixture of 60% Water+ 40% Ethylene Glycol. Similarly, to examine the effect of teardrop-shaped dimple fins (PK1 and PK2), the analyzes were compared with circular cross-section smooth channel (DK) analyzes. In the analyzes carried out with the finite element method, a constant heat flux of $q'' = 600 \text{ W/m}^2$ was applied to the channel surface and the analyzes were carried out under laminar flow conditions ($500 \leq Re \leq 2000$). According to the numerical analysis results,

the convective heat transfer value for all channels examined in the study increased with the Reynolds number. The increase in nanoparticle volumetric concentration also supported this increase. In the DK channel, the highest convection heat transfer increase compared to the base fluid water was realized in the $\phi=0.2$ ND+Fe₃O₄/Water+Ethylene Glycol hybrid nanofluid with %44.4. However, the nanoparticle volumetric increase in concentration also increased the pressure drop values inside the channel. In the study, the Performance Evaluation Coefficient (PEC) values, defined as the ratio of the heat transfer increase amount to the pressure drop increase amount, were determined, and the highest PEC value was 4.26 in the PK2 channel with %0.1 volumetric concentration ND+Fe₃O₄/Water+Ethylene Glycol was obtained in nanofluid.

Key Words : Nanofluid, Heat convection, Teardrop dimple, Computational fluid dynamics

Science Code : 92807

TEŐEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Engin GEDİK'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalıőmamda yardımlarını esirgemeyen Yüksek Mühendis Emrehan GÜRSOY ve Arő. Gör. Abdullah DAĞDEVİREN arkadaşlarıma da teőekkür ederim.

Sevgili anneme, babama ve biricik kardeőime manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teőekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜRLER	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
BÖLÜM 3	15
NANOAKIŞKANLAR	15
3.1. NANOAKIŞKAN TÜRLERİ.....	19
3.1.1. Seramik Nanoakışkanlar.....	19
3.1.2. Saf Metalik Nanoakışkanlar	20
3.1.3. Karbon Tabanlı Nanoakışkanlar	20
3.1.3.1. Karbon Tabanlı Nanoakışkanların Sentezlenmesi	21
3.2. NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	23
3.2.1. Yoğunluk.....	23
3.2.2. Viskozite	24
3.2.3. Özgül Isı.....	25
3.2.4. Isıl İletkenlik.....	26
BÖLÜM 4	28
MATERYAL VE METOT.....	28

	<u>Sayfa</u>
4.1. SAYISAL YÖNTEM.....	28
4.1.1. Sonlu Hacimler Yöntemi	28
4.1.2. Modelleme ve Problem Çözümlemede Ansys Fluent Programı.....	29
4.1.3. Korunum Denklemleri	30
4.2. PROBLEM GEOMETRİSİ.....	31
4.3. SAYISAL AĞ YAPISININ OLUŞTURULMASI.....	32
4.4. NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	33
4.5. AKIŞ ALGORİTMASI.....	36
BÖLÜM 5	38
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	38
5.1. DK KANALINDA $Nu-f$ VE PDK DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ.....	39
5.2. PK1 KANALINDA $Nu-f$ VE PDK DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ	42
5.3. PK2 KANALINDA $Nu-f$ VE PDK DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ	45
5.4. GÖZYAŞI DAMLASI ŞEKLİNDEKİ KANATÇIKLARIN ISI, AKIŞ, SICAKLIK VE HIZ KARAKTERİSTİĞİNE ETKİSİ	48
5.5. FARKLI BAZ AKIŞKAN VE $ND+Fe_3O_4$ NANOPARTİKÜLLERİNİN ISI VE AKIŞ KARAKTERİSTİĞİNE ETKİSİ	50
BÖLÜM 6	53
SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1.	Organik ve inorganik bazı nanopartiküller.	17
Şekil 3.2.	Nanopartikül şekilleri.	17
Şekil 3.3.	Bazı baz akışkan ve nanopartiküllerin ısı iletkenliği [50].	20
Şekil 4.1.	Yakınsama (Residual) eğrileri.	31
Şekil 4.2.	Sayısal analizlere ait akış kanalları.	32
Şekil 4.4.	Çözüm ağı yakınsama analizi sonuçları.	33
Şekil 4.5.	Yakınsama çalışması sonucunda elde edilen çözüm ağı yapıları.	33
Şekil 4.6.	Çalışmanın akış algoritması.	37
Şekil 5.1.	Sayısal analiz sonuçlarının Shah-London, Sieder-Tate ve Hagen-Poiseuille korelasyonları ile kıyaslanması.	39
Şekil 5.2.	Re değerine bağlı olarak Nu değişimi (DK için).	40
Şekil 5.3.	Re değerine bağlı olarak f değerinin değerini (DK için).	41
Şekil 5.4.	$\varphi=0,1$ ND+ Fe ₃ O ₄ /Su+Etilen Glikol ve $\varphi=0,2$ ND+ Fe ₃ O ₄ /Su+Etilen Glikol nanoakışkanlarının $500 \leq Re \leq 2000$ aralığındaki Re değerlerine göre PDK değerini.	42
Şekil 5.5.	Re değerine bağlı olarak Nu değerini (PK1 için).	43
Şekil 5.6.	Re değerine bağlı olarak f değerinin değerini (PK1 için).	44
Şekil 5.7.	PK1 kanalından Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\varphi=0,1$ ND+ Fe ₃ O ₄ /Su+Etilen Glikol ve $\varphi=0,2$ ND+ Fe ₃ O ₄ /Su+Etilen Glikol nanoakışkanlarının $500 \leq Re \leq 2000$ aralığındaki Re değerlerine göre PDK değerini.	45
Şekil. 5.8.	Re değerine bağlı olarak Nu değerini (PK2 için).	46
Şekil 5.9.	Re değerine bağlı olarak f değerinin değerini (PK2 için).	47
Şekil 5.10.	PK2 kanalından Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\varphi=0,1$ ND+ Fe ₃ O ₄ /Su+Etilen Glikol ve $\varphi=0,2$ ND+ Fe ₃ O ₄ /Su+Etilen Glikol nanoakışkanlarının $500 \leq Re \leq 2000$ aralığındaki Re değerlerine göre PDK değerini.	48
Şekil 5.11.	DK, PK1 ve PK2 kanallarındaki lokal Nu değerini.	49
Şekil 5.12.	DK, PK1 ve PK2 kanallarındaki lokal vorteks oluşumları.	49
Şekil 5.13.	DK, PK1 ve PK2 kanallarındaki sıcaklık karakteristiğinin karşılaştırılması.	50
Şekil 5.14.	DK, PK1 ve PK2 kanallarında hız karakteristiğinin karşılaştırılması.	50

Sayfa

Şekil 5.15. Farklı baz akışkan ve ND+Fe ₃ O ₄ /Su+Etilen Glikol hibrit nanoakışkanlarının lokal Nu'larının karşılaştırılması.	51
Şekil 5.16. Farklı baz akışkan ve ND+Fe ₃ O ₄ /Su+Etilen Glikol hibrit nanoakışkanlarının vortekslerinin karşılaştırılması.	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Nanopartiküllerin termofiziksel özellikleri.....	34

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A_{tm}	: Atmosfer basıncı (bar)
C_p	: Özgül ısı (kJ/kgK)
d	: Çap (m)
f	: Darcy Sürtünme Faktörü
h	: Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
Ha	: Hartmann sayısı
H_2O	: Su
k	: Isı iletim katsayısı (W/mK)
L	: Boru uzunluğu (m)
Nu	: Nusselt Sayısı
P	: Statik basınç (Pa)
Pr	: Prandtl sayısı
Re	: Reynolds Sayısı
V	: Hız (m/s)
Fe_3O_4	: Demir Oksit
ϕ	: Nanopartikül hacimsel konsantrasyon oranı
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
μ	: Viskosite (kg/ms)
γ	: Birim hacim ağırlığı
ΔP	: Statik basınç farkı (Pa)
q''	: Isı akısı (W/m ²)

KISALTMALAR

CFD : Computational Fluid Dynamics

DK : Düz Kanat

EG : Etilen Glikol

ND : Nanoelmas

PDK : Performans Değerlendirme Kriteri

PEC : Performance Evaluation Criteria

PK1 : Pürüzlü Kanat 1 (Gözyaşı desenli küçük kanatçık)

PK2 : Pürüzlü Kanat 2 (Gözyaşı desenli büyük kanatçık)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar enerjinin insan hayatındaki yeri oldukça önemlidir ve gerekli olan enerjinin çoğunluğu günümüze kadar birincil (yenilemeyen) enerji kaynaklarından karşılanmıştır. Bu enerji kaynakları, mevcuttaki miktarı tüketim hızından düşük olan kömür, petrol vb. yer altı zenginliklerinden elde edilen kaynaklardır. Birincil enerji kaynaklarının tasarruflu kullanılmaması ve küresel iklim üzerindeki dönüşü olmayan etkileri nedeniyle ikincil (yenilenebilir) enerji kaynakları üzerinde yapılan araştırmalara yön verilmiş ve bu kaynaklardan elde edilen enerji miktarı son yıllarda artış göstermiştir. Yenilenebilir ve temiz enerji kavramlarının hayatımıza girmesi ve bu sektörde yapılan çalışmaların artmasıyla birlikte verim terimi de büyük önem kazanmıştır. Bu bağlamda enerjiyi en verimli şekilde kullanan cihazların geliştirilmesi de öncül konumdadır.

Enerji ve verim kavramları birleştirildiğinde öne çıkan ve akla gelen ilk terimlerden biri ısı enerjisidir. Otomotiv, uzay, enerji, havacılık, iklimlendirme ve soğutma gibi pek çok sektörlerde ısı enerjisi kullanılmakta ve araştırmacılar ısıl sistemlerin performansını iyileştirerek verimliliği arttırmak için birçok çalışma yapmaktadır. Yapılan performans iyileştirme çalışmalarında ısı transferi kapsamında alt dal olarak yer alan iletim, taşınım ve ışınım üzerinde çalışmalar yürütülmektedir[1]. Bu kapsamda üzerinde çalışma yapılan, sanayide en fazla kullanım alanına sahip olan ve çalışma prensibinde taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin etkin olduğu ısı değiştiriciler yer almaktadır [2].

Bu tür ısı ekipmanlarının performansını iyileştirmek amacıyla pasif ve aktif olarak adlandırılan teknikler kullanılmaktadır. Pasif teknikler, ekipmanın fiziksel/geometrik yapısında yapılan ve herhangi bir harici güç kaynağına ihtiyaç duymayan tekniktir. Aktif teknikler ise uygulanması için harici güç kaynağına ihtiyaç duyan tekniktir. Hem uygulanabilirlik hem de enerji açısından daha fazla tercih edilen pasif tekniklerde ısı

transferini iyileştirme metodu olarak son yıllarda nano boyutta metal ve bunların oksitlerinden oluşan partiküllerin geleneksel ısı transferi akışkanları ile homojenize edilerek oluşturulan süspansiyonlar kullanılmaktadır. Bunlar nanoakışkan olarak bilinmekte olup baz akışkan içerisinde 100 nm'den küçük katı partiküllerin oluşturduğu süspansiyonlardır. Kullanılan bazı nanopartiküllere örnek olarak Al_2O_3 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $AlCu$, karbon nanotüpler verilebilir. Daha yüksek miktarda ısı transferi oranları elde edebilmek amacıyla taşıyıcı akışkan içerisine birden fazla nano boyutta katı partiküller eklenebilmektedir. Bu tür oluşturulan akışkanlara da hibrit nanoakışkan adı verilmektedir.

Bununla birlikte ısı transferini arttırmaya yönelik yapılan çalışmaların bir diğeri de yüzey alanını ve akıştaki türbülans şiddetini arttırmaya yönelik yapılan çalışmalardır. Araştırmacılar son zamanlarda bu tür çalışmalara yenilik katmak için çukur kanat yapısı gibi farklı kanat yapıları ile hem yüzey alanını hem de akışta türbülans şiddetini artırarak ısı transferini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda ısı transferini arttırmaya yönelik çukur kanat yapısı ve nanoakışkan kullanımıyla gerçekleştirilen bazı çalışmalar literatür bölümünde verilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Isı transfer akışkanları günümüzde ısıtma, soğutma, enerji gibi pek çok uygulama alanına sahiptir. Yıllardır araştırmacılar bu akışkanlardan daha yüksek ısı transferi performansı elde edebilmek için ısı transferi yüzey alanını arttırarak ve içinde nanopartikül bulunan akışkanlar hazırlayarak çeşitli çalışmalar yapmışlardır. 1995 yılında nanoakışkan ile ısı transferini iyileştirme çalışmaları Choi ve Eastman [3] tarafından yapılmıştır. Choi vd. [4] ısı transferini arttırmak için tek faz ile yapılan çalışmaları geliştirip hibrit nanoakışkanları kullanmışlardır. Çukur kanat yapıları ve nanoakışkanların ısı transferine etkileriyle ilgili son yıllarda yapılan araştırmalar aşağıda sunulmuştur.

Çeraghi vd. [5] derin çukurlu boruların akış alanı ve ısı transferi özelliklerini incelemiş ve yirmi yedi konfigürasyonla sonuçlanan üç farklı adım, çap ve çukur derinliğinden oluşan çeşitli çukur konfigürasyonunun etkilerini araştırmıştır ve PDK değerini tüm geometriler için incelemiştir. Isıl-akışkan özelliklerini incelemek için derin çukurlu borunun sıcaklığı, hızı, akış çizgisi ve Nu sayısını düz boruyla karşılaştırmışlardır. Çalışmalar $Re=500$, 1000 ve 2000 için yapılmıştır. Derin çukurlu borularda ısı transfer oranı, daha yüksek derinlik, çap ve daha düşük hatvede %600 olarak görülmüştür ve bu durum f değerini arttırmıştır. PDK değerinin genellikle $1.15-3.3$ arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca en yüksek PDK değerini düşük derinlik, büyük çap ve hatvede, $Re=2000$ 'de $PDK=3.3$ olarak hesaplamışlardır.

Xie vd. [6] sarmal ve kademeli çukurlu borularda; spiral hatve değişimi, enine uzunluk değişimi, başlangıç çukur sayısı değişimi, derinlik değişimi ve yarıçap değişiminin ısı transferi ve sürtünme katsayısına etkisi sayısal olarak incelemiş ve birbirleriyle karşılaştırmıştır. Sarmal çukurlu boruda, kademeli boruya göre daha iyi bir termal-hidrolik performans elde etmişlerdir ve maksimum $1,9$ olarak bulmuşlardır. Nu ve f

değerleri; çukur başlangıçları, derinliği ile yarıçapı arttıkça ve spiral aralığı ile enine uzunluk azaldıkça artış göstermiştir.

Liu vd. [7] beş teğetsel giriş jeti ve boru iç yüzeyinde çukurlar bulunan girdaplı bir soğutma borusunda, çukurlu borunun ısı transferi ve basınç kaybına etkilerini türbülanslı akış modelinde, $Re=10.000-40.000$ arasında incelemiştir. Çalışmada, girdaplı çukurlu boru ile girdaplı düz boru karşılaştırılmıştır. Ortalama ısı transferinde çukurlu boruda, düz boruya göre %7.2 oranında artış meydana geldiği hesaplanmıştır. Çukurlu girdaplı borularda artan çukur derinliği ile basıncın daha düzgün bir şekilde değiştiği ve genel basınç kaybının azaldığı görülmüştür. Ayrıca çukurlu borudaki basınç kaybının, düz boruya göre %17.6 oranında azaltılabileceği ortaya çıkmıştır.

Farsad vd. [8] içbükey-dışbükey çukur kanatçıklara sahip bir boruyu türbülanslı akışta, $Re=6.000$ ve 12.000 'de sayısal olarak incelemiştir ve düz boru ile kıyaslamışlardır. Borunun içbükey-dışbükey çukur kanatçık konumlarında küçük girdaplar oluşmuştur ve bu girdaplar ısı transferinin ve türbülanslı karışımın iyileşmesine katkı sağlamıştır. Re sayısı 6.000 'den 12.000 'e yükseldiğinde yüzey sürtünme değerlerinde ortalama %65'lik bir büyüme gözlenmiştir. Düz boruda ise bu oranın %38 olduğu bulunmuştur. İçbükey-dışbükey çukur kanatçıklı borunun ısı transferinde düz boruya göre %36.21 artış görülmüştür. Re sayısı 6.000 'den 12.000 'e arttığında ısı transferinde %40 artış görülmüştür.

Dedeyne vd. [9] boru şeklindeki reaktörün iç yüzeyine uygulanan küresel çukurların ısı transferi ve basınç değişimine etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. Girdap yapıları oluşturmak ve ısı transferini arttırmak için çukur derinliğinin minimum olması gerekmektedir. Çukur derinliği ve genişliğinin artması basınç kaybını arttırmaktadır. Kümelenmiş çukurların ısı transferinin farklı konfigürasyonlu çukurlara göre daha iyi olduğu bulunmuştur. Borudaki küresel çukurların ısı transferini %43, basınç düşüşünü ise %54'e kadar arttırdığı tespit edilmiştir.

Zhang vd. [10] çapraz birleştirilmiş çukur kanatçıklara sahip boruda ısı transferinin iyileştirilmesini ve akış özelliklerini sayısal olarak incelemiştir. Sonuçlar incelendiğinde yüzeydeki çukurların ısı transfer verimliliğini arttırdığı görülmüştür.

Çukurun yukarı ve aşağı yönündeki girdaplar ve içeri yöndeki akışlar Nu ve f değerlerini arttırmıştır. Çapraz birleştirilmiş çukurlu boru, geleneksel tek elipsoidal çukurlu boruyla karşılaştırıldığında ısı transfer performansını %18.8-48.3 oranında ve ortalama %24.8 oranında arttırmıştır.

Firoozi vd. [11] ısı transferini iyileştirmede pasif tekniklerin, yani hem geometrik parametrelerin hem de çalışma akışkanı özelliklerinin değiştirilmesinin performans üzerine etkisini araştırmıştır. Bu araştırma için farklı çukur açısı, çukur yüksekliği ve aralıkları seçilmiştir, böylelikle 27 farklı çukur düzenlemesine sahip geometri modellenmiştir. Çalışma akışkanının değiştirilmesinin ısı transferine etkisini incelemek için üç grup boru konfigürasyonu seçilmiştir. Farklı hacimlerde nanopartikül konsantrasyonlarına sahip Al_2O_3 /Su nanoakışkanı alternatif akışkan olarak kullanılmıştır. Re değerinin 500 ile 4000 arasında değiştiği çalışmada nanopartikül konsantrasyon oranları %1, %2 ve %4 olarak ele alınmıştır. Çukurlu borular düz borulara göre daha iyi bir termal-hidrolik performansa sahiptir. Çukur derinliğinin fazla olması, aralığının ise düşük olması Nu ve f değerlerini arttırmıştır. Çukur doldurma açısının ise akış karakteristiğine etkisi olmuştur. Su için tüm parametreler değerlendirildiğinde en iyi performans $Re=2000$ 'de 2.5 olarak bulunmuştur. Çalışma akışkanının Al_2O_3 /Su olarak değiştirilmesi ısı transferinin artmasına büyük katkı sağlamıştır. Nanopartikül konsantrasyonu %4 olan Al_2O_3 için maksimum PDK değeri 3.12 olarak bulunmuştur.

Mironov vd. [12] oval çukur ve oval yay şekilli çukur kanatçıkların, dikdörtgen kesitli bir kanalda, tek ve çok sıralı düzenlenerek ısı transferi ve hidrolik direncini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Oval çukur ve oval yay şekilli çukurların tek sıralı düzeni için maksimum ısı transferi artışı $Nu/Nu_0=1.2-1.7$ olarak bulunurken, çok sıralı çukur düzeni için $Nu/Nu_0=2.3-2.5$ olarak bulunmuştur. Oval yay şekilli çukurların uygulanması, aynı koşullar altında oval çukurlu çukurlara göre %5-10 daha büyük bir termal performans sağlamıştır. Sürtünme kayıpları oranı, ısı transferi artış oranını geçmemiştir. Oval yay şekilli çukurlu yüzeyler, oval çukura sahip yüzeylere göre %10 ila 15 daha düşük hidrolik kayıp göstermiştir. Böylece ısı transfer yüzeylerinin ısı performansının tek sıralı ve çok sıralı çukurlu düzenlemelerde sırasıyla %23 ve %14'e kadar arttığı görülmüştür.

Ziyaullahan vd. [13] dikdörtgen kesitli, düz, içbükey-dışbükey çukur kanatçık ve dairesel içbükey-dışbükey çukur kanatçıklara sahip kanallarda, sabit hacmi korurken nanopartikül konsantrasyonlarını değiştirerek üç mikro kanalın performanslarını karşılaştırmışlardır. $Re=100$ ve 900 için %0.1, %0.15 ve %0.2 konsantrasyonlarında bakır oksit nanopartikülleri kullanılmıştır. Dairesel içbükey-dışbükey çukur kanatçıklı kanalın yüksek Re sayıları için etkili olduğu ve ısı transferini %0,2 CuO konsantrasyonu için %10.5, nanoakışkan olmadan ise %8.2 artırdığı gözlemlenmiştir. İçinden nanoakışkan geçmeyen kanal ile dairesel içbükey-dışbükey çukur kanatçıklara sahip kanal kıyaslandığında $Re = 100$ 'de 1.1'den daha yüksek bir PDK değeri elde edilmiştir. Nu sayısında %10'luk maksimum iyileşme, %0,2 CuO konsantrasyonuna sahip dairesel içbükey-dışbükey çukur kanatçıklı kanalda görülmüştür.

Lotfi vd. [14] çukur kanatçıklara sahip borulu ısı eşanjörlerinde farklı kanat yapıları (eliptik çukur, konik kesik çukur, yamuk prizma çukuru, üçgen içbükey çukur ve üçgen dışbükey çukur) için üç boyutlu analiz yaparak en iyi performansı sergileyen kanat tipini bulmayı hedeflemişlerdir. Çapraz düzende üç sıralı eliptik çukurlu boruların, boru sıra sayısı arttıkça ortalama Nu ve f değerinin azaldığı görülmüştür. Tüm kanat şekillerinde Re arttıkça Nu artmıştır ve f azalmıştır. Bu kanat tiplerinden üçgen şeklindeki içbükey çukur kanatçıklara sahip boruda türbülans miktarı arttığı için en iyi termo-hidrolik performans görülmüştür.

Feng vd. [15] tarafından düz H-tipi kanatlı borulu ısı değiştiricilerin temel yapı parametrelerinin sabit olması durumunda, boyuna girdap jeneratörü, içbükey-dışbükey çukurlar, oyuklar ve yeni tasarım türlerinin ısı transferi, akış direnci ve kapsamlı termal-hidrolik performansları üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, boyuna girdap jeneratöründe %60.22'lik ısı transferi artışı olduğunu ve boyuna girdap jeneratörünün en fazla basınç düşüşüne neden olduğunu göstermektedir. İçbükey-dışbükey çukurların, tek başına ısı transferini arttırmada ve akış direncini azaltmadaki etkisi düşüktür. En iyi sonuç bu üç yapının birleştirilmesi ile elde edilen yapıda bulunmuştur. Re sayısı $4650 < Re < 28300$ arasındayken, yeni kombine tasarımın termal-hidrolik performansı %4.5-16.6 oranlarında iyileştirilmiştir.

Al-Obaidi [16] dairesel kesitli borularla, bükümlü bantlı çukur kanatlı boruların akış düzeni, basınç düşüşü, termal performans ve ısı transferine etkisini, $1573 \leq Re \leq 23592$ aralığında incelemiştir. Tam gelişmiş akış aralığına sahip boruda yapılan çalışmalar sonucunda çukur kanatçıklara sahip boruların, düz borulara göre termal performansında artış olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, statik basınç, dinamik basınç, hız büyüklüğü, duvar kesme gerilimi ve türbülanslı kinetik enerji gibi akış alanları için kalitatif analizin yanı sıra bükülmüş bant takılı çukurlu borudaki basınç düşüşü, ısı transfer katsayısı sürtünme faktörü ve Nu sayısının düz borudan daha büyük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bükülmüş bant takılı çukurlu boruda daha fazla ikincil akış ile girdap akışı ve akış karışımı oluşması daha yüksek türbülansa neden olmuş ve genel ısı transferini arttırmıştır.

Rajabi vd. [17] küresel çukur kanatçıklara sahip ve bir kenarı ısıtılmış dar bir kanalda türbülanslı akışta, nanoakışkan akışını tek ve karışım fazlı modeller ile sayısal olarak incelemiştir. Akışkan olarak farklı hacimsel konsantrasyonlarda Al_2O_3/Su ve Cu/Su kullanılan çalışmada, sabit bir boşluk derinliğinde, nanopartiküllerin hacim oranındaki her %2'lik artış için, yerel ısı transfer katsayısı %2 oranında artmıştır. İki fazlı (karışım) modelde nanopartikül hacimsel konsantrasyonun ve çukur derinliğinin artırılması ile ısı transferinde artış meydana geldiği belirtilmiştir.

Dağdevir vd. [18] trapez şeklinde çukur kanatçıklara sahip, içinden akışkan olarak su geçen bir boruya sabit ısı akısı uygulayarak ısı transferini ve hidrodinamik akış karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. $Re \ 3000 \leq Re \leq 8000$ aralığında, farklı çukur çapları, yamuk açıları ve çukur kanatçıkların adım uzunluklarına göre yapılan çalışmalarda; yamuk çukurlu borunun Nu değerinde düz boruya kıyasla 2.1 oranında artış görülmüştür. Yamuk çukurlu borunun f değeri $Re=8000$ 'de düz borudakine göre 1.39 oranında daha yüksektir. Dolayısıyla çukurlu borunun hidrolik performansı daha düşüktür. En büyük çukur çapı ile yamuk açısında ve en küçük adım aralığında PDK değeri en yüksek 1.7194 olarak elde edilmiştir.

Zhang vd. [19] yüzeysel olarak girdap yapılarına sahip mikro V şekilli çukur kanatçıklara sahip kanallardaki türbülanslı akış ve ısı transferi özelliğini $Re=50.500$ 'de

incelemişlerdir. Mikro V şekilli nervür-çukur hibrit yapısı, girdaplar oluşturarak türbülansı dolayısıyla da taşınımın ısı transferini arttırmıştır.

Singh vd. [20] konik şekilde içbükey-dışbükey çukur kanatçıklara sahip ısı eşanjör borusunda termo-akışkan davranışını sonlu hacimler yöntemiyle incelemiştir. Kanatçık için üç farklı çap (3 mm, 6 mm ve 9 mm) ve iki farklı adım miktarı (120 mm ve 180 mm) ile hesaplama yapılmıştır. Mevcut model, Nu ve f değeri için sırasıyla Dittus-Boelter denklemi ve Blasius denklemi ile doğrulanmıştır. 1200 W/m^2 sabit ısı akısı için 5000 ile 30000 Re değeri aralığında analizler tamamlanmıştır. Sonuçlar, dışbükey çukur şeklinin içbükey çukur şekline göre daha iyi termal performans sergilediğini ve 6 mm'lik çapın, uygun akış dinamikleri nedeniyle hem içbükey çukur hem de dışbükey çukur şekilli durumda en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Xie vd. [21] gözyaşı damlası çukurlu borunun akış ve ısı transferi özelliklerini araştırmış ve küresel ve eliptik çukurlarla karşılaştırmışlardır. Gözyaşı damlası, küresel ve eliptik çukurlu tüple karşılaştırıldığında, yeniden sirkülasyon akışının gücü ve boyutunun azalması nedeniyle ısı transfer performansında artış sağlanmıştır. Akışkan, gözyaşı damlası yüzeyinde düzgün ve kolay bir şekilde aktığı için akış karışımını iyileştirmiş ve periyodik çarpan akışlar oluşturarak termal-hidrolik performans artmıştır. Gözyaşı damlasının Nu ve f değeri çukur derinliği ve yarıçapının artmasıyla artmış ancak çukur aralığının artmasıyla azalmıştır. Ayrıca çalışmada $Re=5000$ 'da PDK değeri en fazla 2.06 olarak hesaplanmıştır.

Sabir vd. [22] geniş bir Re aralığı için 10 kW'lık sabit bir dış ısı akısı altında çeşitli geometrik aralıklara sahip çukur kanatçık tiplerinin termal-hidrolik performansını sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmada eşdeğer hacimlere sahip elipsoidal 0° , gözyaşı damlası ve elipsoidal 45° çukurlardan oluşan geliştirilmiş tüplerin performansı, kararlı durum Re ortalamalı Navier-Stokes simülasyonları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çukurlu tüplerin performansının, çukur aralığı (P) ve Re değişimi ile önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, $3.2\text{mm} \leq P \leq 13.2\text{mm}$ ve $9000 \leq Re \leq 40000$ değiştirilerek tüm çukurlu tüp konfigürasyonları için optimum aralık ve Re çalışma aralıkları belirlenmiştir. Elipsoidal 45° ve gözyaşı damlası çukurlu

tüplerin 3.2 mm'lik optimum çukur aralığına, $9000 \leq Re \leq 30000$ ve $14000 \leq Re \leq 40000$ 'lik uygun çalışma aralıklarına sahip olduğu bulunmuştur. Optimum çukur aralığına sahip elipsoidal 45° ve gözyaşı damlası çukurlu boruların, termal-hidrolik performansı sırasıyla %45.7 ve %31.2 olarak bulunmuştur.

Perwez ve Kumar [23] soğutma kanallarında, çukurlu bir yüzey kullanılmasının ısı transferine katkı sağlayacağını düşünmüşlerdir. Bu bağlamda küresel ile gözyaşı damlası desenli çukur kanatçıklara sahip kanallarda farklı akış koşullarında Nu ve f değerini $Re=1800$ ile 7000 arasında değişen aralıkta sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Her iki kanal uzunluğuna 10 mm aralığa, enine 5 mm aralığa sahiptir. Gözyaşı damlası desenli çukur kanatçığa sahip kanalın ısı transferinde, küresel çukur kanatçığa sahip kanala göre %8.6 oranında artış elde edildiği belirtilmiştir.

Jing vd. [24] gözyaşı damlası içbükey-dışbükey çukur kanatçıklara sahip olan ısı eşanjörü kanallarında süperkritik karbondioksitin termal-hidrolik performansını ve entropi üretimini incelemişlerdir. Üç farklı tip gözyaşı damlası modellenmiştir. Bu üç gözyaşı damlası modelinde en düşük termal performansa pozitif eksantrik dışbükey çukur kanatçık sahipken, pozitif eksantrik içbükey çukur kanatçıkta daha az sürtünme olduğundan genel termal performansında artış elde edilmiştir ve PDK değeri maksimum 1.17 olarak bulunmuştur. En az entropiyi pozitif eksantrik içbükey çukur kanatçık üretmiştir.

Xiang-shu vd.[25] gözyaşı damlası çukurlu tüplerin termal-hidrolik performansının tahminini ve analizini gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak, ANSYS 17.0 kullanılarak çukurlu tüplerin sayısal bir modeli oluşturmuş ve literatürdeki Nu sayısı ve f değeri ile karşılaştırılarak doğrulamışlardır. İkinci olarak, girdi katmanında beş nöron, çeşitli nöronlardan oluşan gizli katmanlar ve çıktı katmanında bir nöron bulunan yapay sinir ağlarını geliştirmişlerdir. Sonuçlar, gözyaşı damlası çukurlarının rüzgâr yönündeki kısmındaki ısı transferi performansının küresel çukurlarınkinden daha iyi olduğunu göstermiştir.

Isı transferini iyileştirmek için farklı çukur kanat yapılarının yanı sıra nanoakışkanlarla ilgili de pek çok çalışma yapılmıştır. Sepehrnia vd. [26] üç boyutlu trapezoidal mikro kanallarda, sabit ısı akısı ve manyetik alan altında ferro-nanoakışkan akışının termal ve termo-hidrolik performanslarını incelemiştir. Lorentz etkisini araştırmak için x, y ve z eksenlerinde manyetik alan uygulamışlardır. Sonuçlar incelendiğinde termal göstergelere göre x eksen en iyi performansa sahipken, PDK değerine bakıldığında y eksen en iyi sonucu vermiştir.

Sakib vd. [27] termal radyasyon, ısı üretimi ve nanopartikül şekil etkisini su bazlı ferro-nanoakışkanın manyeto hidrodinamik akışını incelemiştir. Caputo-Fabrizio zaman kesirli Brinkman tipi akışkan modeli ile kesin çözümler üretmek için hem rampalı hem de izotermal ısıtma modelini kullanmışlardır. Kesirli parametrenin artmasıyla sıcaklık ve hız alanlarının azaldığı görülmüştür.

Ebaid vd. [28] farklı manyetik alan uygulanan, akışkan olarak Fe_3O_4/Su kullanılan, 420 W sabit ısı akısı uygulanan yatay bir boruda ısı transferinin iyileştirilmesini incelemiştir. Sonuçlara göre Re arttıkça Nu ve f değeri artmıştır. Manyetik alan uygulanmadığında Nu sayısındaki artış Fe_3O_4/Su olan duruma göre %16.7 daha fazladır. Manyetik alan varlığında ısı transfer katsayısı ve Nu sayısındaki ortalama artış sırasıyla %9.4, %26.1, %31.3 ve %8.8, %131 %23.9'dur. Nu sayısındaki artış, f değerinden fazla olduğu için ısıtılmış borunun, ısı transferinin iyileştirilmesi için uygulamada kullanılabileceği varsayılmaktadır. Bu sonuçların, ısı değiştiriciler, tıbbi cihazlar ve elektronik cihazlar gibi birçok mühendislik uygulamasında ısı transferini arttırmak için faydalı olabileceği düşünülmektedir.

Rashed vd. [29] değişken güçteki bir manyetik kaynağın etkisini, Kobalt ferrit ($CoFe_2O_4$) nanoparçacıkları içeren ferro-nanoakışkan üzerinde temel akışkan olarak su ile incelemiştir. Çalışmada nanopartiküllerin hacim oranı, Prandtl (Pr) sayısı, kaynağın manyetik alan gücü ve ortam sıcaklığına göre sıcaklık farkı oranı dahil olmak üzere bu dört parametrenin etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, manyetik alan etkisi arttığı sürece nanoakışkan hızının ve kayma gerilmesinin arttığını göstermiştir. Öte yandan, her ikisi de Pr 'deki artışla ters orantılıdır ve sınır tabaka içindeki sıcaklık dağılımının Pr değerlerindeki artış oranına bağlı olarak arttığı ve azaldığı görülmüştür.

Thamizharasan ve Reddy [30] gözenekli bir kanalda Jeffrey ferro-nanoakışkanında manyeto hidrodinamik pulsatil akışının etkisini, Joule ısınması, viskoz dağılım ve ısı kaynağı etkisini analitik olarak incelemiştirlerdir. Akışkan olarak Fe_3O_4 /kan kullanılmış ve ısı iletkenlik modeli için Maxwell Garnett modelini kullanmışlardır. Farklı parametrelerin hız, sıcaklık ve ısı transfer hızı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, nanoakışkanın hızının frekans parametresindeki artışla arttığını, manyetik alan ve hacim oranının artmasıyla azaldığını göstermektedir. Nanoakışkanın sıcaklığı, viskoz yayılımının artmasıyla artmıştır. Nanopartikül hacim konsantrasyonunun artmasıyla ısı transfer hızında artış görülmüştür.

Abdel-wahed [31] kavisli bir borudan ferro-nanoakışkan akışında joule ısıtmanın yanı sıra hall akımının akış ve ısı transfer özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışma düşük hız koşullarında ısı değiştiriciler, güneş enerjisi toplayıcıları, elektronik ve mikroelektronik ekipmanların soğutma cihazlarında iyileştirmeler yapılmasını hedeflemiştir. Elde edilen sonuçlar nanopartiküllerin varlığında hall akımının boru içindeki akış basıncını azalttığı ve borunun iç yüzeyinden gelen ısı akısını arttırdığı yönündedir. Isı akısı nanopartiküllerin varlığında iyileşmiş ve boru eğriliği arttıkça azalmıştır. Hall akımının akış davranışı üzerinde doğrudan ve güçlü bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Perviz vd. [32] U şeklindeki bir boruda manyetik alanın, ferro-nanoakışkan akışına ve ısı transferine etkisini araştırmışlardır. Sonuçlara göre; düzgün bir manyetik alan uygulamak ısı transferini azaltmıştır, borunun eğrilik yarıçapı azaldıkça ısı transferi artmıştır, manyetik alanın şiddetinin artması sürtünme katsayısında küçük değişikliklere neden olmuştur, en düşük ve en yüksek sürtünme katsayısı ve basınç düşüşü sırasıyla boru bükülme yarıçapı 1,75 cm ve 3,5 cm olduğunda görülmüştür, akış hızı ve hacim oranının ısı transferinin artırılmasında en büyük etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Kamis vd. [33] tarafından gerilmiş bir levha üzerinde akan ferrit-kobalt ferrit ($Fe_3O_4/CoFe_2O_4$) ve nikel çinko ferrit-manganez çinko ferrit ($NiZnFe_2O_4/MnZnFe_2O_4$) olan iki farklı hibrit ferro-nanoakışkan H_2O -EG baz akışkanı içinde dağıtılmış, termal karakteristiği teorik olarak analiz edilmiş ve sonuçlar

karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyonunun artırılmasının hız profilinin azalmasına yol açtığını ancak yüksek viskozite ve termal iletkenlik değerleri nedeniyle sıcaklık profilini güçlendirdiğini ortaya koymuştur. Çalışmada $Fe_3O_4/CoFe_2O_4$ ve $NiZnFe_2O_4/MnZnFe_2O_4$ için ısı transferi artış oranları sırasıyla %81.91 ve %67.81 olarak bulunmuştur.

Aghamiri vd. [34] dönen silindirler içeren bir mikro kanalda, nanoakışkan akışının zorlanmış taşınımını farklı geometrilerde incelemiştir. Re değerini, nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyon oranını ve çukurlu ortamın çukurluluk yüzdesini araştırmışlardır. Sonuçlar, dönen silindirlerin hızının artırılmasının ısı transferini arttırdığını göstermektedir. Ayrıca Re değeri ve nanopartiküllerin hacimsel oranının artırılması, ısı transferini, basınç düşüşünü ve sürtünme faktörünü arttırmaktadır. Re değerinin artmasıyla birlikte ısı transferinden dolayı entropi oluşumunun azaldığı ve sürtünmeden dolayı entropi üretiminin arttığı görülmüştür. Nanopartiküllerin hacim oranının artırılmasının, ısı transferi ve sürtünmeden kaynaklı entropi oluşumunu arttırdığı gözlemlenmiştir.

Imran vd. [35] Fe_3O_4 /yağ karışımını kullanarak ısı transferini arttırmaya yönelik deneysel bir çalışma yapmışlardır. Ayçiçek yağı ve mineral yağ karışımına, farklı miktarlarda oleik asit kaplı Fe_3O_4 nanopartiküller eklenerek ferro-nanoakışkanlar hazırlamışlardır. Saf mineral yağıyla karşılaştırıldığında hacimce %0.6 Fe_3O_4 nanopartiküllerde M10 (baz sıvı) yağ karışımı bazlı ferro-nanoakışkan için ~%91'lik maksimum termal iletkenlik artışı elde etmişlerdir. Yağ karışımı bazlı ferro-nanoakışkan içerisine dağılmış nanopartiküller, Brownian hareketini gerçekleştirmiş ve bu nanopartiküllerin yağ karışımının molekülleri ile çarpışmalara yol açtığı görülmüştür. Küçük boyutlu nanopartiküller ile zincir benzeri bir yapı oluşturulmuştur ve bu durum nanopartiküllerin daha büyük hacimli bölüntüsüne yol açmıştır ve bu da yağ karışımı bazlı ferro-nanoakışkanların termal iletkenliğinin artmasına neden olmuştur.

Gürdal vd. [36] çukur kanatçık yapısına sahip bir boru içinden akan Fe_3O_4 /su nanoakışkanının manyetik alan etkisi altında termo-hidrolik performansını incelemiştir. Borunun yüzeyine $4500 W/m^2$ 'lik sabit ve düzgün ısı akısı uygulanmış

olup, çalışmalar laminer akışta $1131 \leq Re \leq 2102$ aralığında yapılmıştır. 3,75 adım oranına sahip çukur geometrisi, manyetik alan ($B=0,03 \leq T \leq 0,16$) ve %1,0 nanoparçacık hacim oranı temel değişkenlerdir. Sonuçlar, Re sayısı ve manyetik alan şiddeti arttıkça Nu sayısının arttığını göstermiştir. 0,3T manyetik alan şiddeti durumunda düz borudaki su akışına göre Nu sayısında en yüksek artış %115,31 olarak elde edilmiştir. Manyetik alanın yokluğunda $Re=1131$ 'de çukurlu tüp içindeki ferro-nanoakışkan akışı durumunda da en yüksek PDK değeri 1,44 olarak bulunmuştur.

Gürsoy vd. [37] düzgün manyetik alan ($0T \leq B \leq 0,3T$) etkisi altında akan Fe_3O_4 ferro-nanoakışkanın hidrotermal davranışını incelemiştir. Ayrıca, manyetik alan konumlarının (Uzunluk Çap Oranları=20, 40, 60) önerilen sistemin hidrotermal davranışı üzerindeki etkisini gözlemlemek için her deneyde manyetik alan konumlarını değiştirmişlerdir. $\phi=1.0$ hacimsel konsantrasyona sahip Fe_3O_4 ferro-nanoakışkanı suda laminer akışta $1131 \leq Re \leq 2102$ aralığında akmaktadır. Önerilen yeni parametrelerin hidrotermal davranışlarının karşılaştırmaları, farklı manyetik alan konumlarının ve büyüklüklerinin kombinasyonlarına göre yapılmıştır. En yüksek Nu sayısının hem düz hem de çukurlu tüplerde uzunluk çap oranı 20 olan manyetik alan konumu için $B=0,3T$ kullanılarak elde edilmiştir. $B=0T$ ile karşılaştırıldığında, $B=0,3T$ için uzunluk çap oranı 20 olan manyetik alan konumu için pürüzsüz tüpte Nu sayısı %64,03 oranında artarken, aynı giriş parametreleri için çukurlu tüpte Nu sayısı %45,40 oranında artmıştır. Ayrıca, farklı manyetik alan konumlarının uygulanması değiştirildiğinde, manyetik alan etkisi altında sürtünme faktöründe önemli bir değişiklik tespit edilmemiştir. Bu bulgular sonucunda, çukurlu boruya ait PDK değerinde en yüksek artış, uzunluk çap oranı 20 olan manyetik alan konumu için $B=0,16T$ için $Re=2102$ 'de %33,54 olarak hesaplanmıştır.

Gürdal vd. [38] bu çalışmada aktif ve pasif ısı geri kazanım tekniklerini bir arada kullanarak manyetik alan etkisi altında, 20 kW/m^2 sabit ısı akısında $10.000 \leq Re \leq 50.000$ arasında değişen Re sayısında, çukurlu boru içindeki Fe_3O_4 /su ferro-nanoakışkan akışının termo-hidrolik performansını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmanın temel amacı, küresel çukurlu borulardaki türbülanslı akış için sayısal veriler elde etmek ve yüksek verimli termal enerji depolama cihazlarının tasarımına yardımcı olmaktır. Bu çalışmada, boyutsuz hatve oranına sahip çukur

geometrisi (Adım Aralığı=3.75, 7.50 ve 11.25), Hartmann sayısı ($Ha=75, 150, 225$) ve nanopartikül hacim oranı ($\phi=0.5, 1.0$ ve 2.5) parametreleri incelenmiştir. Simülasyonlar gerçekleştirilebilir k-türbülans modeli ve tek fazlı yaklaşım ile oluşturulmuştur. Ayrıca, manyetik alan etkisini tanımlamak için manyeto hidrodinamik modülü etkinleştirilmiştir. Sonuçlar, Nu sayısının artan Re sayısı ve azalan hatve oranı ile arttığını göstermiştir. Adım aralığı 7.50 olan çukur geometri tipi en verimli çukur geometri tipi olarak belirlenmiştir. En yüksek manyetik alan yoğunluğu durumunda, en yüksek Nu sayısı artışı (%72,48), düz boruda su akışkanına kıyasla %2,5 hacimsel konsantrasyona sahip nanoakışkanda elde edilmiştir. En yüksek PDK değeri ise adım aralığı 7.50, $\phi = 2.5$ ve $Ha=75$ durumu için 1,126 olarak elde edilmiştir. Manyetik alan yoğunluğunun hız ve sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi genellikle daha yüksek adım aralığında gözlemlenmiştir. Manyetik alan artması ve küresel çukurlar nedeniyle akışkan hızı azalmıştır. Düz ve çukur kanatlı tüplerin duvar sıcaklıkları manyetik alan etkisinin olmadığı durumda en yüksektir. Manyetik alan uygulaması ile borunun merkezindeki sıcaklık değeri azalmaktadır.

İncelenen literatür çalışmaları doğrultusunda ferro-nanoakışkan ve çukur kanat yapısının ısı transferini ve performansını arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. $ND+Fe_3O_4$ ferro-nanoakışkanının iki temel akışkan olan su ve etilen glikol ile $500 \leq Re \leq 2000$ aralığında, %0,1 ve %0,2 hacimsel konsantrasyonları ve 600 W/m^2 ısı akısı altında büyük ve küçük gözyaşı damlası desenli kanalda (PK2 ve PK1) akış ısı transfer karakteristikleri bu tez kapsamında incelenmiştir.

BÖLÜM 3

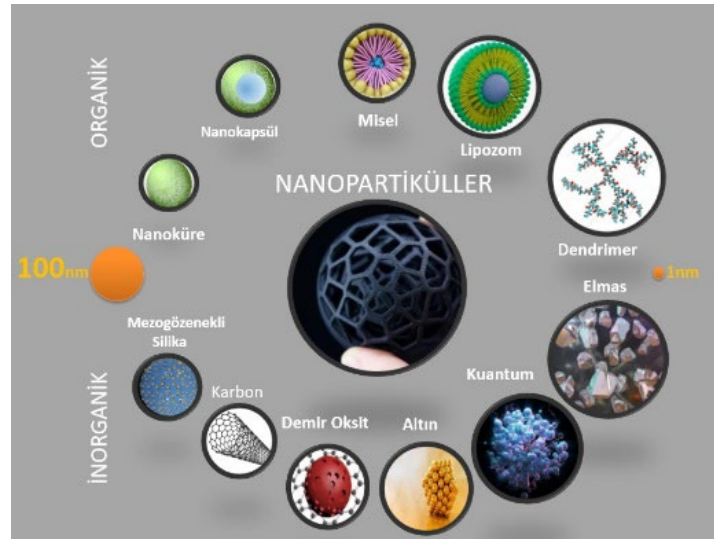
NANOAKIŞKANLAR

Dünya genelinde son zamanlarda enerji sorunları yaşanmaktadır. Gündelik hayatımızda sürekli kullandığımız ev aletleri, elektronik eşyalar, enerji, havacılık, otomotiv, iklimlendirme ve soğutma vb. sektörlerdeki ürünlerin kullanımının artmasıyla enerji sarfiyatı artmakta ve bunun büyük bölümü fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı nedeniyle doğaya yapılan karbon salınımında ciddi artış görülmektedir. Karbon salınımı ve enerji giderlerini azaltarak enerjiden maksimum seviyede faydalanmak için bilim insanları yeni yöntemler araştırmaktadırlar. Nanoakışkanlar da bu araştırma konularından biridir. Kelime anlamı olarak “nano” Yunanca’da “cüce” anlamına gelmektedir ve metrenin bin milyonda birine (10^{-9} m) tekabül etmektedir. 1 ile 100 nm arasındaki molekül ve parçacıkları inceleyen bilim dalına nanobilim ve bunun çeşitli teknolojilerde kullanılmasına nanoteknoloji denir. Kullanım yeri olarak jeotermal enerji uygulamalarında yer kabuğunun altında yüksek ısıya maruz kalan boruları soğutmak için, sondaj makinaları ve elektronik malzemeleri soğutmak için nanoakışkan kullanılabilir. Ayrıca nanoakışkanların yüksek enerji salınımlarını emme potansiyelleri geleneksel akışkanlara göre oldukça yüksektir ve jeotermal enerji kaynaklarında yapılan çalışmalar sırasında oluşan titreşim ve salınımları emme konusunda yardımcı olacaktır. Rüzgâr türbinlerinin dişli kutusunda nanopartiküllü yağlar kullanılarak, dişli kutusundaki sürtünme aşınmaları azaltılabilir. Güneş enerjisi sistemlerinde performansın artırılmasında nanoakışkanlar kullanılabilir. Örneğin, Hosseini ve Sheikholeslami [39] panellerin üzerinde biriken toz nedeniyle ısının arttığını ve nanoakışkan kullanılarak yapılacak soğutmanın verimliliği arttıracığını söylemişlerdir. Ayrıca güneş enerji sistemlerinde nanoakışkan kullanımı verimlilik, pompa gücü, f değeri, sistemin kapladığı alanın küçülmesini vb. iyi anlamda etkileyecektir.

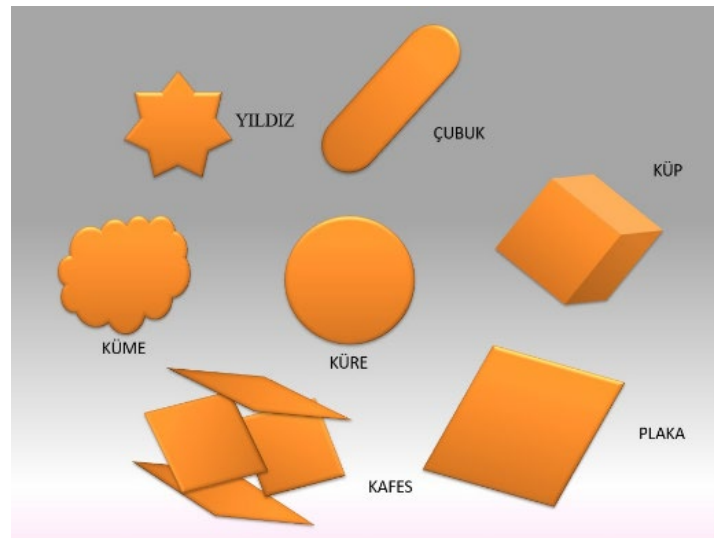
Nanoakışkanların tarihsel süreç içerisindeki gelişimi ise insanlığın en eski zamanlarına, cisimleri en ufak parçacıklarına ayırmakla ilgili sorular, düşünceleriyle M.Ö. 5. Yüzyılda Demokritos ve Yunanlılara dayanmaktadır. Sıra dışı araştırmalarıyla pek çok konuda öncülük yapan, Nobel Fizik Ödüllü Richard Phillips Feynman nanoteknolojinin gelişimine verdiği fikirlerle öncülük yapmasıyla bilinir. Feynman, Aralık 1959'da Caltech'teki Amerikan Fizik Topluluğu'nun yıllık toplantısında "Alta Bol Yer Var" isimli bir konuşma yapmıştır ve bu konuşmada "neden oda dolusu bilgisayar yapıyoruz? Neden her şeyden azar azar kullanmıyoruz" diyerek nanoteknolojinin temellerini atmıştır. Norio Taniguchi, 1974 yılında verdiği bir konferansta iyon ışın öğütme ve ince film biriktirme yöntemleri için nanoteknolojiyi tanımlayan ilk kişi olmuştur. Norio yine nanoteknolojinin malzemelerin bir atom veya molekül tarafından birleştirilmesi, ayrılması, deformasyonu ve işlenmesi olduğunu ifade etmiştir. Ancak Drexler'in 1981'de yayınladığı makaleye kadar kullanılmamıştır. Eric Drexler 1980'li yıllarda nanoteknolojiyle ilgili yaptığı çalışmalarla nanoteknoloji alanını geliştirmiştir. Drexler genellikle Moleküler Nanoteknoloji'yi vizyon edinmiş ve bu alanda çalışmalar yapmıştır. Bu alanın gelişimi için Öngörü Enstitüsü'nü kurmuştur. Ayrıca 1986'da Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer taramalı tünelleme mikroskopunu; Gerd Binnig, Calvin Quate ve Christoph Gerber ise ilk atomik kuvvet mikroskopunu icat etmişlerdir ve Don Eigler 1989'da taramalı tünel mikroskopunu kullanarak atomları manipüle eden ilk kişi olarak tarihe geçmiştir. Harry Kroto, Richard Smalley, Robert Curl, Sumio Iijima, Huffman ve Kraetschmer, Thomas Ebbesen nanoteknoloji alanında çalışmalar yapmış ve bu alanın gelişmesine büyük katkı sağlamış olan bazı isimlerdir.[40]

Nanoakışkan oluşturmak için temel bir sıvının (su, yağ, etilen glikol, etanol, aseton vb.) içerisine belli oranlarda nano boyuttaki karbon (C) yapıları (Elmas, Karbon nanotüpler (Tek duvarlı/SWCNT, çok duvarlı/MWCNT), fullerenler, grafen, grafit) metal (Al, Fe, Ni, Ti, Zn, Cu, Si), metal oksit (TiO_2 , SiO_2 , CuO , ZnO_2 , Al_2O_3) gibi malzemeler eklenmektedir. Şekil 3.1.'de nanopartikül boyutlarına ait aralık ve organik-inorganik içerikli bazı nanopartiküller, Şekil 3.2.'de ise nanopartikül şekilleri belirtilmiştir. Isı transferi uygulamalarında temel akışkanın ısı iletkenliğinin düşük olması sebebiyle, ısı iletkenliği daha yüksek olan nano boyuttaki metal veya karbon yapıdaki malzemelerin baz akışkana eklenmesiyle süspansiyonlar oluşturulmuş ve ısı

transferinin artırılması istenmiştir. Nanoakışkan terimi, ilk kez Choi, Eastman vd.[41] tarafından ABD Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda, geleneksel ısı transferi akışkanına, nanopartikül boyutundaki metal parçacıklarının eklenmesiyle yaptıkları çalışmalar sonucunda tanımlanmıştır. 1995 yılında Amerika Makine Mühendisleri Derneği'nin gerçekleştirdiği toplantıda Choi [42], pompalama gücünü arttırmak yerine, nanoakışkan kullanmanın konveksiyonel ısı transferine yapacağı katkının olasılığını sunmuştur. Son zamanlarda ise popülaritesini epey artırmış olan nanoakışkanlarla ilgili pek çok teorik ve deneysel çalışma yapılmaktadır.



Şekil 3.1. Organik ve inorganik bazı nanopartiküller.



Şekil 3.2. Nanopartikül şekilleri.

Nanoakışkanların hazırlanması için tek adımlı (kimyasal) ve iki adımlı (fiziksel) yöntem olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Direkt buharlaşmalı ve yoğunlaşmalı teknik, toz altı parçacık üretme tekniği, lazer ablasyon tekniği, mikrodalga ışıma tekniği tek adımlı nanoakışkan hazırlama yöntemleridir. Nano boyuta indirgenecek malzemeyi fiziksel olarak toz haline getirip baz akışkan ile karıştırmak ise iki adımlı yöntemdir. Haddad vd. [43] kararlı nanoakışkanların hazırlanmasıyla ilgili araştırmalar yapmışlardır ve nanoakışkanların kararlılığını etkileyen faktörleri aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir.

- Nanoakışkanlar, yüksek yüzey enerjilerine sahip çok fazlı dispersiyon sistemleridir ve bu nedenle termodinamik olarak kararsızdırlar.
- Nanoakışkanlarda dağılmış nanopartiküller güçlü Brownian hareketlerine sahiptir. Nanopartiküllerin hareketliliği, yerçekimi alanının neden olduğu çökelmeyi dengeleyebilir.
- Van der Waals kuvvetlerinin neden olduğu nanopartiküllerin birikmesi nedeniyle nanopartiküllerin akışkanlar içindeki dağılımı zamanla bozulabilir.
- Nanoakışkanın çalışma koşullarında, asılı nanopartiküller arasında veya baz akışkan ile nanopartiküller arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon istenmez.

Bu nedenle, nanoakışkanın stabilitesi için kritik olan iki olay vardır: topaklanma ve çökme. Chavan'ın [44] yaptığı çalışmaya göre nanoakışkan kullanılmasının avantajları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

- Debi veya nanopartikül hacim konsantrasyon oranındaki artışla ısı transferi artmıştır.
- Temel akışkana az miktarda da olsa nanopartikül eklenmesiyle basınç düşüşü meydana gelmektedir.
- Kısacası ısı transferini; nanopartikülün boyutu, miktarı, temel akışkan ile hacimsel oranı, laminer ya da türbülans akış olması, baz akışkanın ısı iletkenlik katsayısı, akışkanın geçtiği kanalın özellikleri vb. faktörler etkilemektedir [45].

3.1. NANOAKIŞKAN TÜRLERİ

Modern teknoloji, maddelerin nano boyuta indirgenmesine imkân tanımaktadır. Nanopartiküller malzemenin asıl boyutuna göre daha iyi performans sergilemektedirler ve nanoakışkanlarda kullanılan pek çok farklı partikül ve baz akışkan bulunmaktadır. Nanoakışkanlarda kullanılan bazı nanopartikül türleri: oksit seramikler (Al_2O_3 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , CeO_2 , SiC , SiO_2 , ZnO_2 , TiO_2), nitrür seramikler (AlN , SiN), karbür seramikler (SiC , TiC), metaller (Fe , Ni , Cu , Ag , Au), yarı iletkenler (TiO_2 , SiC), alaşımlar ($AlCu$, $AgCu$, $AgAl$), kompozitler, katkılı malzemeler ve tek, çift veya çok duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT, DWCNT, MWCNT) olarak belirtilebilir. Temel akışkan olarak su, motor yağı, etilen glikol, aseton kullanılmaktadır [46].

3.1.1. Seramik Nanoakışkanlar

Bu tür nanoakışkanlar, seramik nanopartiküllerin, yüksek sıcaklıkta ısıtma ve ardından hızlı soğutma ile kalsiyum, titanyum, silikon vb. gibi metallere sentezlenen oksitler, karbürler, karbonatlar ve fosfatlardan oluşan inorganik metaloid katıların oluşturduğu süspansiyonlardır. Seramik nanopartiküller kimyasal hareketsizlik ve yüksek ısı toleransı özelliğine sahiptir.[47] Ayrıca seramik partiküller, nanoakışkan karışımlarında ilk kullanılan malzemedir. Seramik nanopartikülleri üç grupta inceleyebiliriz. Bunlar:

- Oksit seramikler (Al_2O_3 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , CeO_2 , SiC , SiO_2 , ZnO_2 , TiO_2),
- Nitrür seramikler (AlN , SiN),
- Karbür seramikler (SiC , TiC)

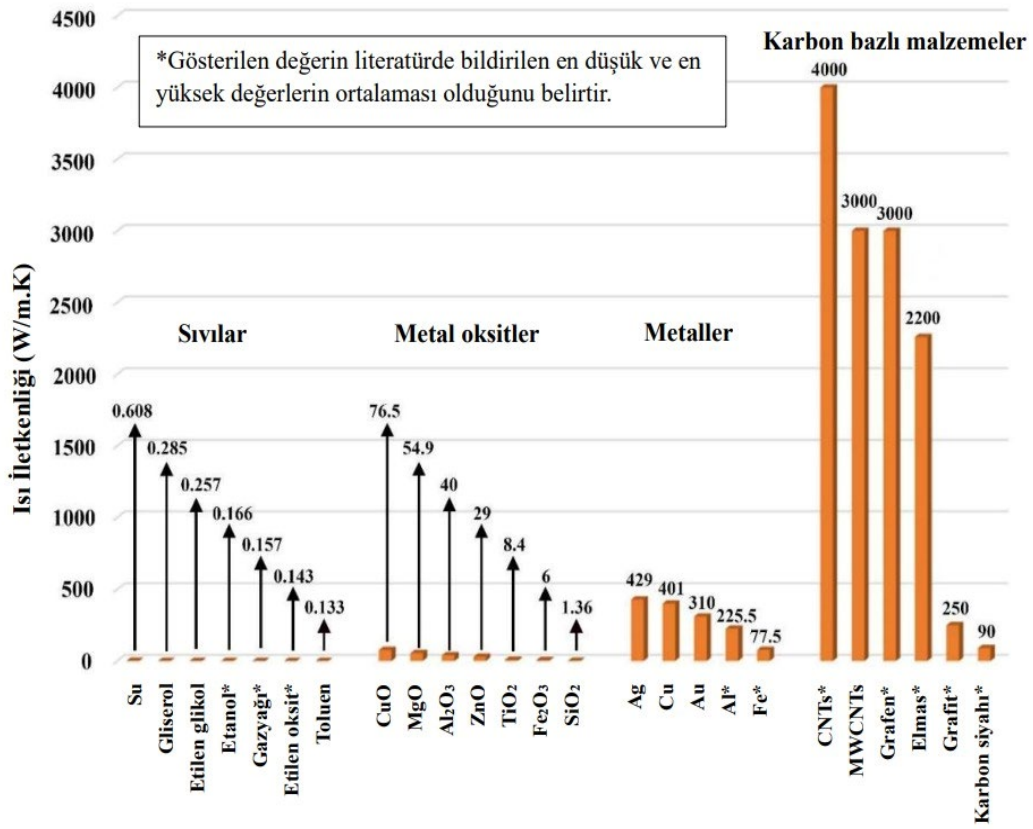
Bu seramik partiküllere baz akışkanın eklenmesiyle nanoakışkan oluşturulur ve seramik nanopartiküllerde en çok çalışma yapılan alan biyomedikaldir. [48]

3.1.2. Saf Metalik Nanoakışkanlar

Saf metalik nanoakışkanlarla ilgili çok fazla araştırma bulunmamakla birlikte Fe, Ni, Cu, Ag, Au metalleri kullanılarak süspansiyonlar hazırlanmaktadır. Ayrıca aynı hacimsel konsantrasyondaki seramik nanoakışkanlara kıyasla daha iyi ısıl iletkenlik göstermektedir [49].

3.1.3. Karbon Tabanlı Nanoakışkanlar

Karbon tabanlı nanoakışkanlar diğer nanopartikül türlerine göre daha iyi ısı transferi yeteneğine ve düşük yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle metal nanoakışkanlara kıyasla kullanımı daha uygundur. Nanoelmaslar, grafen, karbon nanotüpler vb. bazı karbon bazlı nanopartiküllerdir. Bazı akışkan ve bazı nanopartiküllerin ısıl iletkenlik değerleri Şekil 3.3'te verilmiştir. [50]



Şekil 3.3. Bazı baz akışkan ve nanopartiküllerin ısıl iletkenliği [50].

3.1.3.1. Karbon Tabanlı Nanoakışkanların Sentezlenmesi

Nanoelmaslar

Elmaslar grafitin yüksek basınç ve sıcaklığa maruz kalmasıyla ya da grafitin patlatılmasıyla oluşur. Nanoelmas sentezinde patlatma, mikrop plazma destekli oluşum kimyasal buhar biriktirme yöntemi, lazer ablayon, yüksek basınçtan üretilen mikro elmasların yüksek enerjili bilyeli öğütülmesi, yüksek sıcaklık koşulları, ultra ince grafit tozunun yüksek enerjili bilyeli öğütülmesi, ultrason kavitasyonu, karbürlerin klorlanması, elektron tarafından ışınlanan karbon yumruları ve grafitin iyon ışını gibi birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Nanoelmasların üretimi 3 şekildedir:

- Sentez,
- İşleme (elmas olmayan karbonlar, metaller ve metal oksitleri uzaklaştırarak nanoelmasların saflığı artırılır),
- Modifikasyon (yüzey işlevselleştirme ve nanoelmas partiküllerinin katılanması ile hedeflenen uygulamanın gereksinimlerini karşılamak mümkündür)

Grafen

Grafen toplu grafitten ve karbon atomlarından oluşan kafes görünümlü bir malzemedir. Grafen üretmek için ilk olarak pul pul dökülme yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca SiC'nin yüksek sıcaklıkta süblimleşmesi, lazer uyarımı gibi yöntemlerle de grafen üretimi yapılmıştır.

Karbon Nanotüpler

Karbon Nanotüpler, çapı 1 nm'den küçük, yarım fulleren başlıklı ucu olan silindirik tüplere sarılmış grafen levhalardır. Karbon nanotüpler 3 kategoriye ayrılmıştır: tek katmanlı karbon nanotüp (SWCNT), çift katmanlı karbon nanotüp (DWCNT) ve çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT). Karbon nanotüpleri ark deşarjı, lazer ablayon ve karbonlu gazlar (CVD yöntemi) ile sentezlenebilir [51].

3.1.4. Hibrit Nanoakışkanlar

Hibrit nanoakışkan, bir baz akışkan içinde sentezlenen ve dağılan iki veya daha fazla nanopartikülden oluşur. Minea'ya [52] göre hibrit malzemeler terimi, iki veya daha fazla malzemenin, her malzeme arasında, yeni elektron yörüngeleri tarafından oluşturulan yeni bir dizi özellik ile kombinasyonunu ifade eder; örneğin polimer molekülleri ve silanol molekülleri arasındaki kovalent bağ, inorganik/organik. Hibrit malzemeler metal matrisine bağlı olarak üç kategoriye ayrılabilir:

- Metal matris nanokompozitleri, örneğin Al_2O_3/Ni , Al_2O_3/Cu , MgO/Fe , ND/Ni , $Al_2O_3/Fe-Cr$, Mg/CNT ve Al/CNT ;
- Seramik matris nanokompozitleri, örneğin Al_2O_3/CNT , Al_2O_3/TiO_2 , SiO_2/Ni , Al_2O_3/SiC , CNT/Fe_3O_4 ve Al_2O_3/SiO_2 [53];
- Polimer nanomateryaller, örneğin polimer/CNT, termoplastik/katmanlı silikatlar polimer, polimer/hidroksitler ve polyester/ TiO_2 [54].

Jamil ve Ali [55] tarafından manyetik Fe_3O_4 nanopartikülleri üzerinde MWCNT'ler ve CNT'ler kullanılarak hibrit nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Tek bir nanoparçacık içeren nanoakışkanla karşılaştırıldığında hibrit nanoakışkan, sinerjistik etkisinden dolayı ısı transferini arttırmada avantaja sahiptir [56]. Bunun nedeni, hibrit nanopartiküllerin, farklı nanopartiküllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini aynı anda birleştirmesi ve özellikleri homojen bir durumda sağlamasıdır [57].

Farklı baz hibrit nanoakışkanlar aşağıdaki gibidir:

- Su Bazlı Hibrit Nanoakışkanlar: Hibrit nanoakışkanların geliştirilmesinde bir dizi araştırmacı tarafından baz akışkan olarak su kullanılmıştır. Kimyasal indirgeme ve yerinde yaklaşım yöntemi ile Sundar vd.[58] $ND-Fe_3O_4$ nanoakışkanlarını hazırlanmıştır.
- Yağ Bazlı Hibrit Nanoakışkanlar: Petrol, çeşitli araştırmacılar tarafından baz akışkan olarak kullanılmıştır ve hibrit nanoakışkanların termal özelliklerinin,

tek nanopartiküllü baz akışkanlara sahip nanoakışkanlardan daha üstün olduğu ortaya konmuştur.

- EG Tabanlı Hibrit Nanoakışkanlar: Nano elmas ve nikel bazlı hibrit nanoakışkan Sundar vd. [59] tarafından yerinde yaklaşım metodu kullanılarak hazırlanmıştır. Karboksillenmiş nanoelmas nanopartikülleri, etilen glikolde dağıtılmış ve ardından nikel klorür ilave edilerek etilen glikol tabanlı hibrit nanoakışkan elde edilmiştir.

3.2. NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Pr sayısı, Re değeri ve Nu değeri nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin fonksiyonlarıdır ve bu sayılar konvektif ısı transferini büyük derecede etkilemektedir. Isı transferinin gelişiminde ve bu davranışın öngörülmesinde nanoakışkanların termofiziksel özellikleri önemli bir role sahiptir. Nanoakışkanların yoğunluk, viskozite, özgül ısı ve ısı iletkenlik gibi farklı termofiziksel özellikleri aşağıda açıklanmıştır [60].

3.2.1. Yoğunluk

Yoğunluğun ısı transferine etkisiyle ilgili çok fazla veri bulunmamasıyla beraber, nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyona bağlı olarak arttığı bilinmektedir (yani nanopartikülün hacimsel konsantrasyonu arttıkça yoğunluk artar) ve Re değeri, f değeri, basınç kaybı gibi diğer akışkan özellikleriyle de bağlantılıdır [61]. Bu nedenle, nanoakışkanların akış özelliklerini, stabilitesini ve ısı transfer performansını değerlendirmek için yoğunluğun doğru belirlenmesi önemlidir. Nanoakışkanın yoğunluğu, sıcaklık arttıkça azalma eğilimindedir. Bunun sebebi, sıcaklık arttıkça bağların zayıflamasıdır. İlk kez Pak ve Cho (1998) [62] tarafından, nanoakışkan yoğunluğunun hacimsel konsantrasyona olan etkisi, türbülanslı bir akış rejimi altında yatay dairesel bir tüp içinde 25 °C'de akan suda dağılmış γ -Al₂O₃ ve TiO₂ bazlı nanoakışkanlar için sayısal olarak şu formül ile ifade edilmiştir:

$$\rho_{na} = (1 - \varphi)\mu\rho_{ba} + \varphi\rho_p \quad (3.1)$$

Burada ρ [kg/m³], φ [%], p , n_a ve b_a sırasıyla yoğunluğu, hacimsel konsantrasyonu, nanopartikülü, nanopartiküllerin yoğunluğunu ve baz akışkanların yoğunluğunu ifade etmektedir.

3.2.2. Viskozite

Nanoakışkan viskozitesi, süspansiyonun akışa direnme eğilimidir ve kayma geriliminin kayma hızına oranı olarak da ifade edilebilir. Nanoakışkanların ısı geliştirmesiyle ilişkili fayda, baz sıvıya eklenen nanopartiküllerin neden olduğu etkili viskozitedeki artışla dengelenir. Viskozitedeki bu artış, daha yüksek basınç kayıplarına yol açar ve dolayısıyla pompalama gücü taleplerini artırır. Etkili viskoziteyi etkileyen ana parametreler; baz akışkan viskozitesi, nanopartikül konsantrasyonu, partikül şekli, partikül çapı, partikül tipi, sıcaklık, basınç, pH değeri ve kayma hızıdır [63].

Viskoziteyle ilgili ilk denklemler Einstein tarafından oluşturulmuştur ve düşük konsantrasyondaki küresel mikron boyutunda katı parçacıklarla sınırlıdır ($\varphi < 0.02\%$).

$$\mu_{na} = (1 + 2.5\varphi)\mu_{ba} \quad (3.2)$$

Bu denklemde yer alan μ [kg/ms] viskoziteyi belirtmektedir. Brinkman, Einstein'ın bu denklemini geliştirmiştir ve $\varphi < 0.04\%$ koşulu için aşağıdaki gibi sunmuştur.

$$\frac{\mu_{na}}{\mu_{ba}} = \frac{1}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (3.3)$$

Viskozitenin ısı transferine etkisini incelemek üzere pek çok araştırma yapılmış olup, pek çok araştırmacı tarafından yeni denklemler/korelasyonlar türetilmiş ve geliştirilmiştir [64]. Chavan ve Pise [65] nanopartikül hacim konsantrasyonunun ve sıcaklığın nanoakışkanların etkin viskozitesi ve yoğunluğu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Farklı baz akışkanlar ve değişen nanopartikül konsantrasyonlarına sahip nanopartiküller kullanılarak stabil nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Nanoakışkanların viskozite ve yoğunluğunun ölçümü için Reometre ve yoğunluk ölçer

(Anton Parr Make) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, nanoakışkanın viskozitesinin parçacık hacim konsantrasyonunun artması ile artış gösterdiğini ve nanoakışkanın sıcaklığının artmasıyla azaldığını açıkça göstermektedir. Termal iletkenlik ve viskozitenin aşağıdaki önemli parametrelere bağımlı olduğu söylenebilir [66]:

- Parçacık yükleme
- Hazırlama yöntemleri
- Yüzey aktivatörleri ve kimyasalların eklenmesi
- Optimum sonikasyon süresi
- Yeniden numarası ve daha yüksek termal difüzyon hızı
- Sıcaklık değişimi
- Nanopartiküllerin boyut, tür ve şekil gibi geometrik parametreleri

3.2.3. Özgül Isı

Nanoakışkanın ısı transfer hızını etkileyen önemli özelliklerden biridir. Bir gram nanoakışkanın sıcaklığını bir santigrat derece arttırmak için gereken ısı miktarı özgül ısıdır. Nanoakışkanların etkin özgül ısını hesaplamak için önerilen iki temel özgül ısı modeli bulunmaktadır [67]. İlk model, nanopartiküllerin hacim konsantrasyonuna ve sıvı-partikül karışımı formülüne dayanarak Pak ve Cho [62] tarafından önerilen ve Eşitlik 3.4'te verilen korelasyondur. Sudaki partikül hacim konsantrasyonunun artmasıyla özgül ısının azaldığını keşfetmişlerdir [68].

$$C_{pna} = \varphi(C_p)_{np} + (1 - \varphi) \cdot (C_p)_{ba} \quad (3.4)$$

Burada C_p [J/kgK] akışkanın özgül ısını sembolize etmektedir. İkinci model, Xuan ve Roetzel [69] tarafından sunulmuş olup Eşitlik 3.5'te verilmiştir. Bu eşitlik yaygın olarak kabul edilen korelasyonlardan biridir.

$$C_{pna} = \frac{(1 - \varphi) \cdot (\rho C_p)_{ba} + \varphi \cdot (\rho C_p)_{np}}{\varphi \rho_{np} + (1 - \varphi) \rho_{ba}} \quad (3.5)$$

Zhou ve Ni, nanopartikül hacim konsantrasyonunun artmasıyla nanoakışkanların özgül ısısının azaldığını gözlemlemişlerdir [69]. Vajjha ve Das [70] Al₂O₃, ZnO ve SiO₂ nanoparçacıklarını içeren üç nanoakışkanın özgül ısısını ölçmüşlerdir İlk ikisi bir baz akışkan içinde (%60Etilen Glikol+%40Su karışımı) ve sonuncusu deiyonize su içinde dağıtılmıştır. Ayrıca nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyonunun artmasıyla özgül ısının azaldığını, ancak bu nanoakışkanların özgül ısısının sıcaklığın artmasıyla arttığını bulmuşlardır.

3.2.4. Isıl İletkenlik

Isıl iletkenlik bir aktarım özelliğidir ve ısı akısının yerel sıcaklık gradyanına oranı olarak tanımlanabilir [66]. Isı transferini iyileştirmek için geleneksel akışkanlar yerine nanoakışkanlara yüksek bir ilgi vardır. Geleneksel akışkanlara nano boyuta ve yüksek ısıl iletkenlik değerine sahip partiküllerin eklenmesi ile akışkanın ısıl iletkenliği artırılabilir. Sıvı-nanopartikül homojen dağılımının termal hareketini kontrol eden Brownian hareketi ve nanopartikülleri çevreleyen sıvı moleküllerin, nano katman olarak bilinen katmanlı yapılar oluşturması etkili termal iletkenliği arttıran faktörlerdir. Bu katmanlı yapılar, toplu sıvı ile nanopartiküller arasında bir termal köprü olarak kabul edilir ve dolayısıyla nanoakışkanın termal iletkenliğini artırır [67]. Katı, sıvı ve gaz fazlarının ısıl iletkenlikleri malzemenin fiziksel yapısına, kimyasal bileşimine ve durumuna bağlı olarak farklılık gösterir. Bu nedenle yeni ölçüm teknikleri ve korelasyonları geliştirilmiştir. Moleküllerin titreşim ve dönme enerjisi, serbest elektronların öteleme hareketi ve kristal yapıların kafes noktalarının denge konumları etrafındaki titreşimleri katıların termal iletkenliğini belirler. Katı metalin genel termal iletkenliği ($k=k_p+k_e$), serbest yük taşıyıcılarından (k_e) kaynaklanan termal iletkenlikten ve kristal yapıların titreşim hareketinden kaynaklanan termal iletkenlikten (k_p) oluşur. Eşitlik 3.6'da verilen korelasyon metallerin ısı iletkenliğini yansıtmaktadır.

$$k = \frac{\pi^2 n (K_B)^2 T \tau_c}{3 m_e} \quad (3.6)$$

Bruggeman [71] rastgele dağılmış parçacıklar arasındaki etkileşimleri analiz edebilen etkili termal iletkenliğin Eşitlik 3.7’de verilen örtülü bir modelini önermiştir.

$$\left[\left(\frac{K_{np} - K_{nf}}{K_{np} + 2K_{nf}} \right) \cdot f_V + (1 - f_V) \left(\frac{K_{bf} - 2K_{nf}}{K_{bf} + 2K_{nf}} \right) \right] = 0 \quad (3.7)$$

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

Yapılan bu çalışmada, çapı (D) 16 mm ve uzunluğu (L) 1500 mm olan, yüzeyine tüm temel koordinat düzleminde P=15 mm aralığında olacak şekilde iki farklı ölçüye sahip gözyaşı damlası desenli dairesel kesitli kanalın laminer akış rejimi şartları ($500 \leq Re \leq 2000$) altındaki termo-hidrolik performansı ve PDK değerlendirmesi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada farklı hacimsel konsantrasyondaki ND, Fe₃O₄ nanopartikülleri ve Su+Etilen Glikol karışımı baz akışkan olarak kullanılmıştır. Dairesel kesitli kanala giren akışkanın 293 K sahip olup ve kanal yüzeyine sabit ve homojen şekilde 600 W/m² ısı akısı uygulanmıştır. Boru çıkışında ise akışkanın atmosfere aktığı varsayılmış ve dolayısıyla analizlerdeki çıkış sınır şartı $P_{\text{çıkış}}=1$ atm olarak tanımlanmıştır.

4.1. SAYISAL YÖNTEM

Çalışmadaki sayısal analizler, sonlu elemanlar tekniğini temel alarak, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemine dayalı çözümlene yapabilen ANSYS Fluent 2020 R2 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Tüm analizler parametrik olarak belirlenen sınır şartlarına bağlı kalmak kaydıyla tek faz modeli ile yürütülmüştür.

4.1.1. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu Hacimler Yönteminde, çözülmesi gereken geometri, sonlu elemanlar yöntemine benzer şekilde parçalara bölünür ve her parça bir çözüm sürecinden geçer. Sonra bu parçaların çözümleri birleştirilir ve problemin çözümü elde edilir. Sonlu Hacimler Yöntemi öncelikle sonlu farklar yöntemini temel almasına karşın, sonlu farklar yöntemiyle karşılaştırıldığında daha doğru çözümler üretebilmektedir. Bu yöntem sonlu elemanlardan farklı olarak, akışkan akış denklemlerini bir dizi cebirsel denklemlere dönüştürmek için kontrol hacmi yaklaşımını kullanmaktadır. Kısmi

diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal bir teknik olan Sonlu Elemanlar Yöntemi, denklemlerin her kontrol hacmi için ayrıklaştırıldığı ve yinelemeli olarak çözüldüğü Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kodlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.1.2. Modelleme ve Problem Çözümlemede Ansys Fluent Programı

Fluent, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizlerinde sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımıdır. 1970'ten bu yana Fluent, dünyada en çok tercih edilen ticari bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı olarak ortaya çıkmıştır ve birçok sektörde yaygın olarak benimsenmektedir.

ANSYS, mühendislik uygulamalarının ve bilimsel deneylerin dijital formatta modellenmesi için tasarlanmış bir yazılımdır. Fiziksel problemleri çözmek için çeşitli bilgisayar tabanlı sayısal modeller kullanmaktadır. ANSYS, akışkan akışı, ısı transferi, gerilim analizi ve malzeme mukavemeti dahil olmak üzere birçok alanda analizler yaparak, sorunların çözümünü kolaylaştırmanın yanı sıra ürün veya sistemlerin üretim öncesi modellenmesine olanak sağlayarak olası hataların tespit edilmesine yardımcı olmaktadır. [72] Böylece sistem tasarım ve Ar-Ge çalışması maliyetlerini düşürmektedir.

ANSYS pek çok alana hizmet vermektedir ve ihtiyaca göre ilgili arayüz kullanılabilir. ANSYS otomotiv, havacılık ve uzay, enerji teknolojileri, ısıtma ve soğutma, havalandırma, üretim, kömür, petrol ve doğal gazın işlenmesi, yenilenebilir enerji, elektronik ve robotik vb. sektörlerde kullanılmaktadır [72]. Öncelikle yazılımın dahili çizim programı kullanılarak geometri oluşturulmaktadır. Geometri oluşturulduktan sonra ilgili akış verisi üzerinde çözüm ağı oluşturma işlemi yapılmaktadır. Ardından akışkanın kimyasal ve fiziksel özellikleri çözüme en uygun sayısal model, sınır koşulları ve çözüm metotları belirlenir. Seçilen hata toleransına göre başlangıç koşulları ve sürecin yönü belirlenerek çözüm başlatılır ve belirlenen hata toleransına ulaşılan kadar çözüm yinelenir. Fluent programı ile elde edilen sonuçlar çeşitli şekillerde görselleştirilebilmektedir ve sonuçlar programdan grafik olarak temin edilebilmektedir [73].

4.1.3. Korunum Denklemleri

Oluşturulan modelde akış ve ısı transferi özelliklerini belirlemek için süreklilik, momentum ve enerjiye ilişkin genel yönetici denklemler kullanılmıştır. Laminer akış koşulları için de uygulanabilen bu denklemler bu çalışmada tek fazlı bir çözüm modeli ile çözülmektedir. Bu durumdan yola çıkarak analizlerin yürütülmesinde kullanılan korunum denklemleri aşağıda verilmiştir.

Süreklilik denklemi;

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.1)$$

Kütle korunumu;

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{V} \cdot (\rho \bar{V}) \right) = S_m \quad (4.2)$$

Yukarıdaki denklem hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılamaz akışlara uygulanabilen kütle korunumu denkleminin genel formunu temsil etmektedir. Bu denklemde S_m terimi, akışın ikinci bir aşamaya geçişi gibi akışkana özgü koşulları veya kullanıcı tarafından bilgi, denklemler vb. olarak sağlanabilecek diğer kaynak terimlerini açıklar.

Momentum Korunumu;

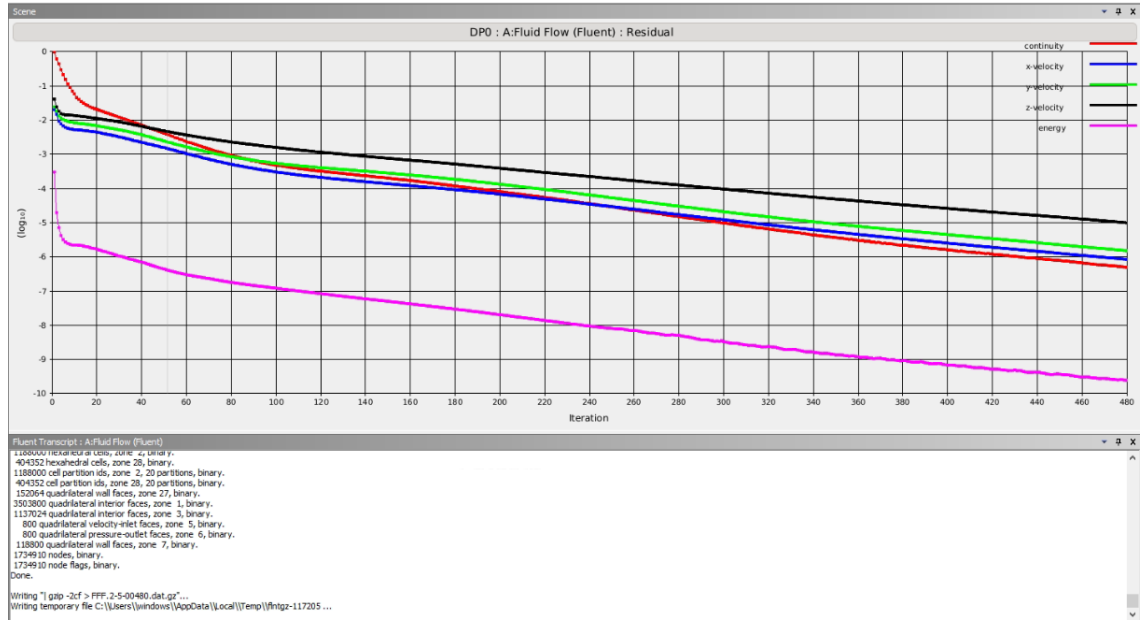
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{V}) + \nabla (\rho \bar{V} \bar{V}) = -\nabla P + \nabla(\bar{T}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.3)$$

Bu denklemde P statik basıncı, (\bar{T}) gerilme tensörünü, \vec{g} yerçekimi kuvvetini, \vec{F} ise harici olarak uygulanan kuvveti ifade etmektedir.

Enerji Denklemi;

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho E + \rho)) = \nabla \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_{ij} + (\bar{T}_{eff} \vec{V}) \right] + S_h \quad (4.4)$$

Yukarıdaki enerji denkleminde E birim enerjiyi, $k_{eff} \nabla T$ iletimi, $\sum_j h_{ij}$ difüzyonu ve $(\bar{T}_{eff} \vec{V})$ viskoz dağılımını ifade etmektedir [74,75]. Analizler yapılmadan önce bu korunum denklemlerinin yakınsaklık değeri 10^{-6} olarak belirlenmiştir ve çözümler Şekil 4.1'deki gibi bu değere ulaşınca kadar yürütülmüştür.

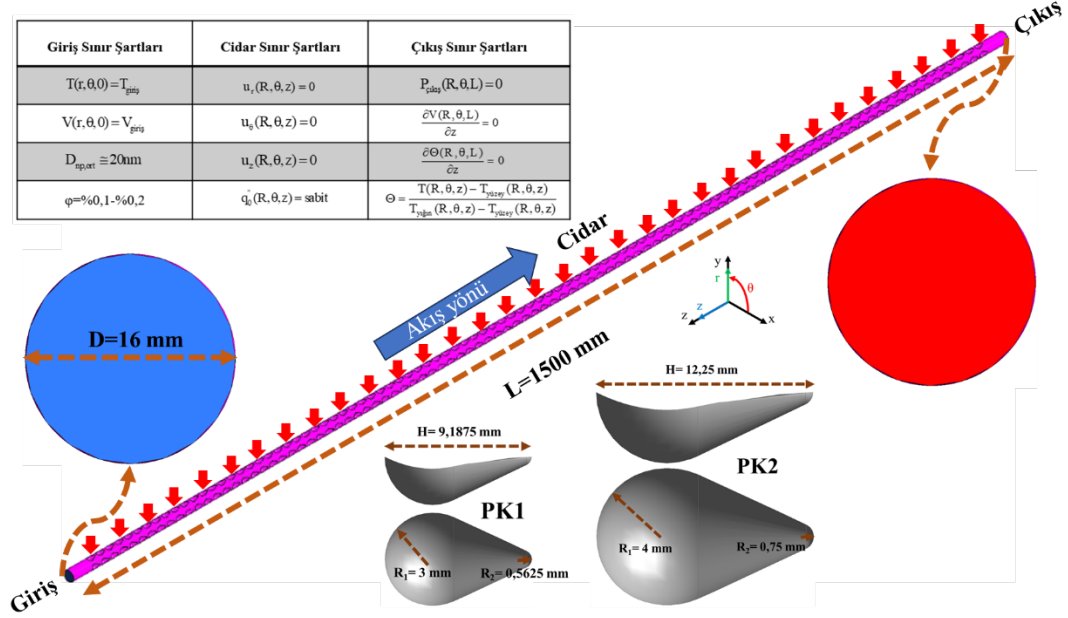


Şekil 4.1. Yakınsama (Residual) eğrileri.

4.2. PROBLEM GEOMETRİSİ

Dairesel kesitli kanalın çıkışındaki basıncın atmosfer basıncına (1 atm) eşit olduğu varsayılmıştır. Analizler laminar akış rejimi için ($500 \leq Re \leq 2000$) yürütülmüş olup, akışkan giriş sıcaklığı 293 K olarak kabul edilmiştir. Kanal içerisinden akan akışkanın birim kütle sinin zamana göre değişmediği kabul edilmiş ve analizler zamandan bağımsız akış için yapılmıştır. Ayrıca analizlerde yerçekimi ivmesi ihmal edilmiştir. Nanopartikül ile baz akışkan arasında termal dengenin ve kanal duvarlarında ise kaymama şartının olduğu varsayılmıştır. Baz akışkan ve farklı konsantrasyonlarda elde edilen hibrit nanoakışkanın tek faz akışkan gibi davrandığı kabul edilmiştir. Dairesel kesitli kanalın yüzeyine şiddeti $q''=600 \text{ W/m}^2$ olan sabit ve üniform ısı akışı

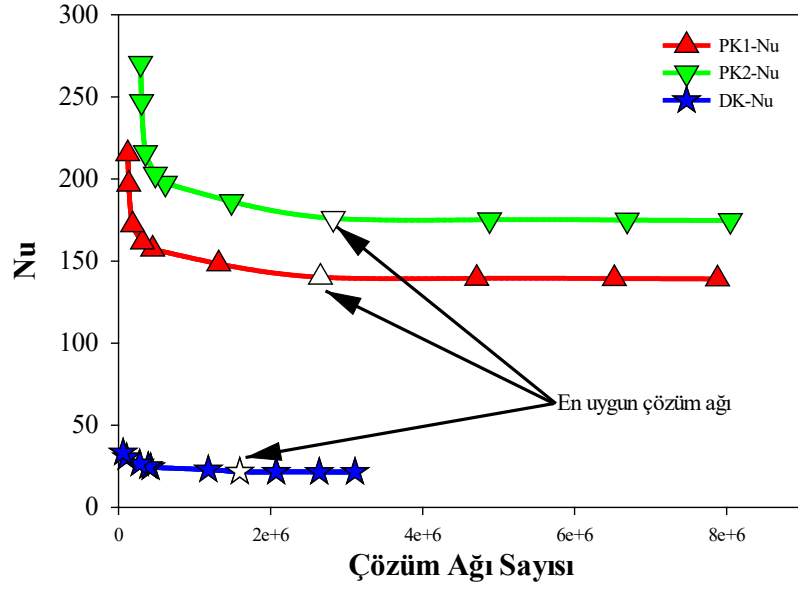
uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında ele alınan akış datalarının fiziksel özellikleri ve sınır şartları Şekil 4.2.'de verilmiştir.



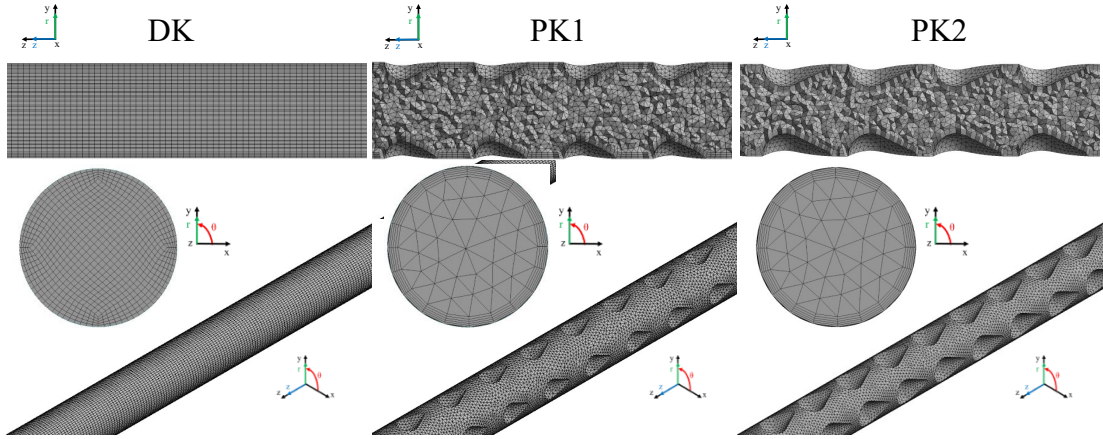
Şekil 4.2. Sayısal analizlere ait akış kanalları.

4.3. SAYISAL AĞ YAPISININ OLUŞTURULMASI

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözümlerinde ilk ve en önemli adım akış datasına ait çözüm ağı yapısının oluşturulması ve gerekli sınır şartların tanımlanması için gerekli akış yüzeyi/akış hacminin tanımlanmasıdır. Lokal ve genel çözüm ağı ayarları ve tetragonal ağ yapısı kullanılarak akış datası küçük hacimlere ayrılmıştır ve bu ayarlamalar sırasında orthogonal ve skewness mesh kalite değerleri göz önüne alınmıştır. Ardından belirli ayarlamalar göz önüne alınarak akış datası üzerinde mesh yakınsama analizi yürütülmüştür. Bu çalışmada akışkan olarak $Re=2000$ 'deki saf su akışı seçilmiştir. Yapılan yakınsama analizine ait sonuçlar Şekil 4.3'te, yakınsama sonucunda elde edilen mesh yapısı ise Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Çözüm ağı yakınsama analizi sonuçları.



Şekil 4.5. Yakınsama çalışması sonucunda elde edilen çözüm ağı yapıları.

4.4. NANOAKIŞKANLARIN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada üzerinde analizler gerçekleştirilen akışkan belirli orandaki ND ve Fe_3O_4 nanopartiküllerinden ve H_2O ve EG baz akışkanlarından oluşmaktadır. ND ve Fe_3O_4 nanopartiküllerinin baz akışkanlar içerisindeki konsantrasyonu $\phi=0,1$ ve $0,2$ olup, bu çalışma kapsamında yer alan tüm akışkanların 293 K sıcaklık değerindeki termofiziksel özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Nanopartiküllerin termofiziksel özellikleri.

Nanopartikül Oranı	Nanopartikül/Akışkan	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	k (W/mK)	μ (kg/ms)
%100	ND	3100,0	516,0	1000,0	-
%100	Fe ₃ O ₄	5810,0	670,0	80,2	-
%0,0	%100 Su	1058,69	3468,00	0,4040000	0,0029600
%0,0	%100 EG	1113,00	2347,00	0,2580000	0,0021000
%0,0	%60 Su+%40 EG	1059,68	3468,00	0,4040000	0,0029400
%0,1	%60 Su+%40 EG	1063,67	3461,00	0,4198000	0,0058900
%0,2	%60 Su+%40 EG	1067,66	3457,00	0,4244000	0,0061300

Bu çalışmada, kullanılan termofiziksel özellikler Sundar vd. [76,77] tarafından yapılan çalışmalardan alınmıştır. Sayısal analiz sonucunda elde edilen temel büyüklükleri hem ısı hem de akış karakteristiği açısından anlamlı hale getirmek amacıyla aşağıda verilen eşitlikler kullanılmıştır. Bu kapsamda, akışın karakteristiği Eşitlik 4.5'te verilen Reynolds sayısı yardımıyla belirlenmiştir.

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte ρ [kg/m³], V [m/s], D_h [m] ve μ [kg/ms] sırasıyla yoğunluğu, akış hızını, dairesel kanal çapını ve dinamik viskoziteyi belirtmektedir. Kanalda taşınım yolu ile gerçekleşen ısı transferi ise Eşitlik 4.6 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$h = \frac{q''}{(T_d - T_y)} \quad (4.6)$$

Burada h [W/m²K] ısı transfer katsayısını, q'' [W/m²] kanal yüzeyine uygulanan ısı akısını, T_d [K] ortalama duvar sıcaklığı ve T_y [K] yığın sıcaklığını göstermektedir. Kanalın giriş ve çıkış sıcaklığının ortalaması alınarak hesaplanan yığın sıcaklık ise Eşitlik 4.7'de belirtilmiştir.

$$T_y = \frac{T_{giriş} + T_{çıkış}}{2} \quad (4.7)$$

h değerinin boyutsuzlaştırma işlemi Nu ile yapılmaktadır ve Eşitlik 4.8’de verilmiştir.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (4.8)$$

Bu eşitlikte yer alan k [W/mK] sistemde akan akışkanın ısı iletkenliğini belirtmektedir. Kanal yüzeyinde meydana gelen sürtünme ise Eşitlik 4.9 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D_h}\right) \left(\frac{\rho V^2}{2}\right)} \quad (4.9)$$

Bu eşitlikteki ΔP [Pa] dairesel kesitli kanalın giriş ve çıkışı arasındaki basınç kaybını, L [m] ise dairesel kesitli kanalın uzunluğunu ifade etmektedir.

Akış datası üzerinde yapılan performans iyileştirme tekniklerinin etkinliği Eşitlik 4.10’da ifade edilen PDK ile hesaplanmaktadır.

$$PDK = \frac{(Nu_{geliştirilmiş}/Nu_{baz})}{(f_{geliştirilmiş}/f_{baz})^{1/3}} \quad (4.10)$$

Bu eşitlikte yer alan geliştirilmiş alt indisi akış kanalına uygulanan gözyaşı damlası şeklindeki yapının ve/veya hibrit nanoakışkanı tarafından sağlanan değeri, baz ise dairesel kesitli düz bir kanal içerisinde sadece baz akışkanın geçirildiği durum göz önüne alınarak yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçları temsil etmektedir.

Yürütülen sayısal analiz sonuçlarının doğruluğunu tespit edebilmek amacıyla literatürde Nu tespitinde kullanılan Shah – London ve Sieder – Tate korelasyonlarından yararlanılmıştır [78]. Bu korelasyonlar sırasıyla Eşitlik 4.11 ve Eşitlik 4.12’de verilmiştir:

$$Nu = 1.953. \left(Re. Pr. \frac{D}{L} \right)^{1/3} ; \left(Re. Pr. \frac{D}{L} \right) \quad (4.11)$$

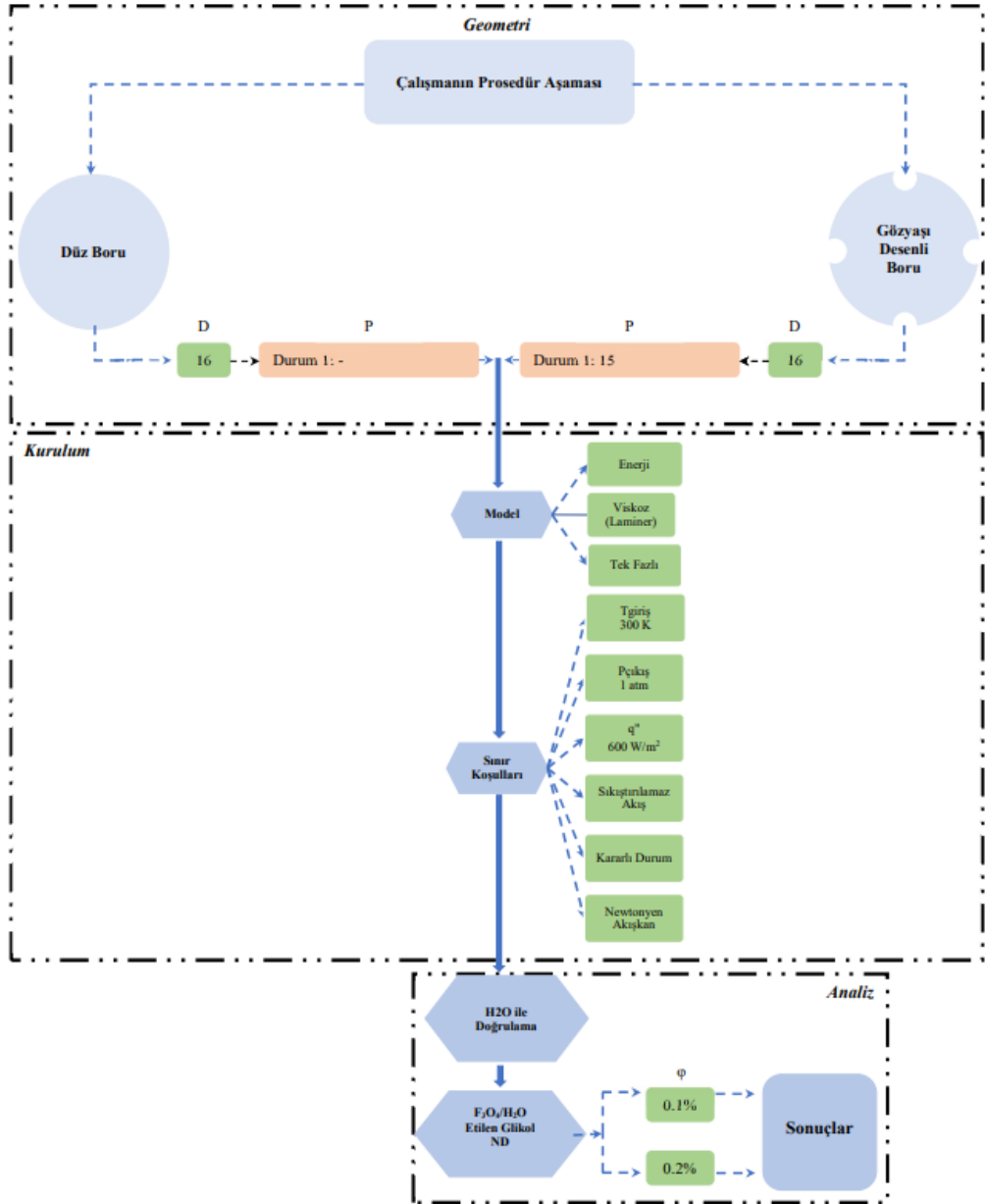
$$Nu = 1.86 Re^{1/3} Pr^{1/3} \left(\frac{D}{L} \right)^{1/3} \quad (4.12)$$

Nu'nun yanı sıra dairesel kesitli kanal içerisinde gerçekleşen sürtünme kayıpları kaynaklı doğrulama işlemi laminar akış için verilen Hagen-Poiseuille korelasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu korelasyon ise Eşitlik 4.13'te sunulmuştur.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4.13)$$

4.5. AKIŞ ALGORİTMASI

Çalışmanın akış algoritması aşağıda Şekil 4.6'da verilmiş olup, geometri, kurulum ve analiz olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır.



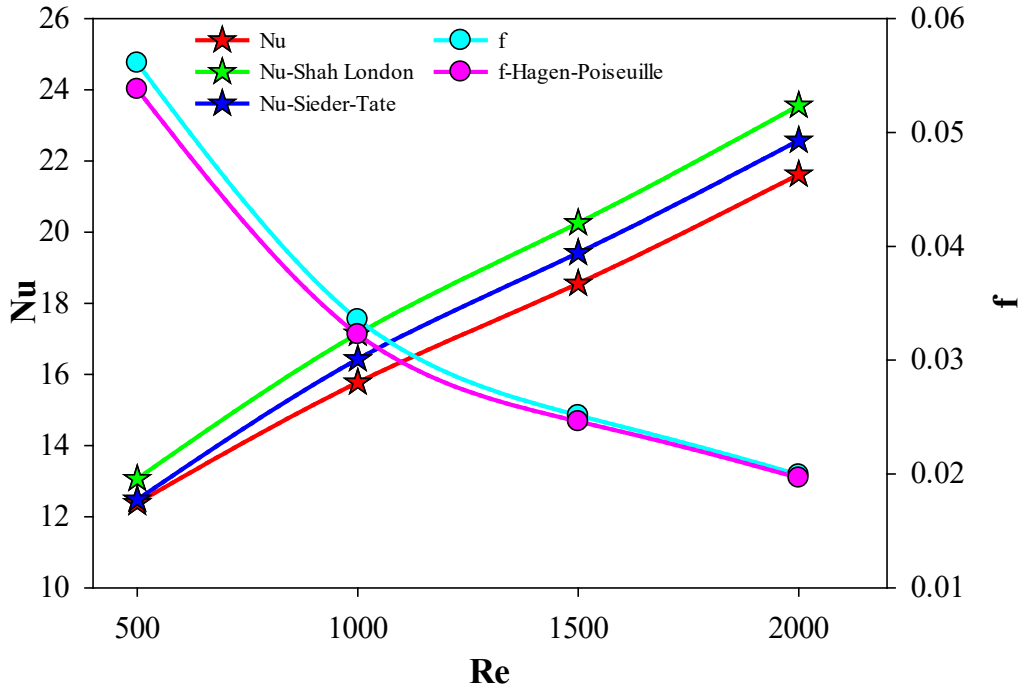
Şekil 4.6. Çalışmanın akış algoritması.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, dairesel kesitli düz ve farklı kanat yapılarındaki gözyaşı desenli kanaldan akan $\varphi=0,1$ ve $0,2$ hacimsel konsantrasyona sahip $ND+Fe_3O_4/Su+Etilen$ Glikol hibrit nanoakışkanının laminer akış koşullarındaki ($500 \leq Re \leq 2000$) termohidrolik performansı sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlar sonlu hacimler tekniğine dayalı çözümlene yapabilen ANSYS Fluent 2020 R2 programında parametrik olarak elde edilmiştir ve sonuçlar ilgili denklemler yardımıyla ısı transfer ve akış karakteristik ifadelerine Excel programı kullanılarak dönüştürülmüştür. ANSYS Fluent 2020 R2 programından elde edilen çıkış sıcaklığı, basınç değeri ve duvar sıcaklığının yardımı ile h , Nu , f ve PDK değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, SigmaPlot 15.0 programı ile grafik haline getirilmiş ve bu bölümde detaylı olarak incelenmiştir.

İlk olarak düz yüzeye sahip dairesel kesitli kanaldan $500 \leq Re \leq 2000$ akış rejiminden akan suyun sayısal analiz sonuçları Shah-London, Sieder-Tate, ve Hagen-Poiseuille korelasyonları ile Şekil 5.1’de karşılaştırılmıştır. Şekil incelendiğinde Nu sonuçlarının Shah-London korelasyonuna göre hata oranı $Re=500, 1000, 1500$ ve 2000 için sırasıyla 5.49% , 8.71% , 9.18% ve 8.97% olduğu belirlenmiştir. Ayrıca benzer kıyaslama Sieder-Tate korelasyonuna göre yapıldığında hata oranının $Re=500, 1000, 1500$ ve 2000 için sırasıyla 0.77% , 4.15% , 4.63% ve 4.42% olduğu sonucuna varılmıştır. f sonuçlarının Hagen-Poiseuille korelasyonuna göre hata oranı ise $Re=500, 1000, 1500$ ve 2000 için sırasıyla 4.11% , 3.93% , 2.11% ve 1.43% olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçların genel bir değerlendirmesi yapıldığında hata oranlarının 10% ’un altında olduğu ve bu çalışmadan elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu sonucuna varılabilir.



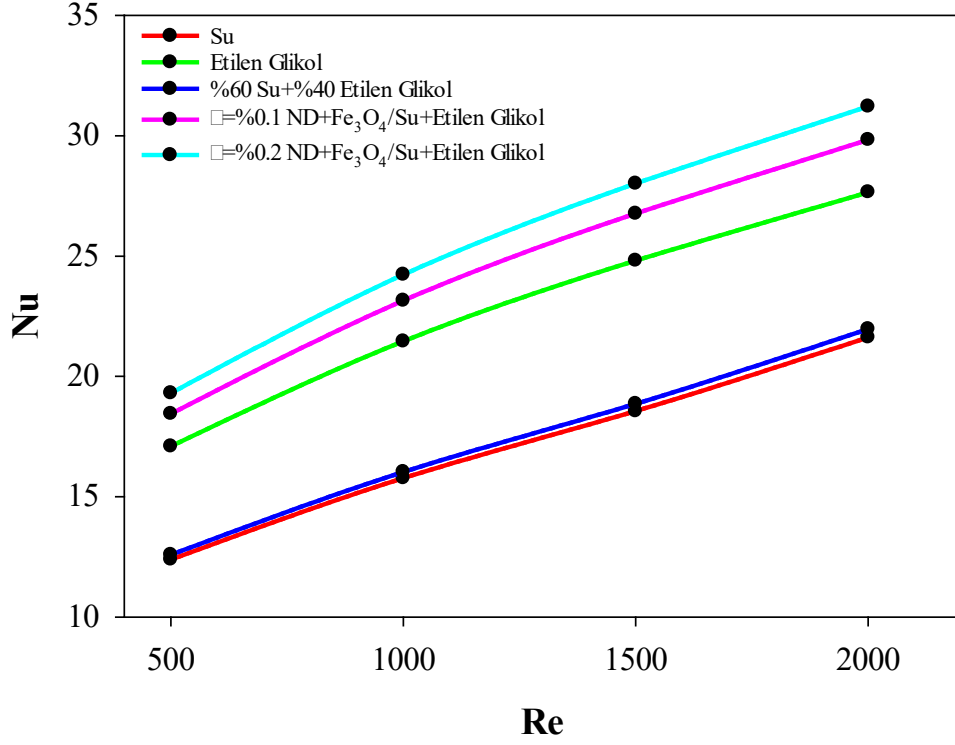
Şekil 5.1. Sayısal analiz sonuçlarının Shah-London, Sieder-Tate ve Hagen-Poiseuille korelasyonları ile kıyaslanması.

5.1. DK KANALINDA Nu-f VE PDK DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ

Uzunluğu 1500 mm ve çapı 16 mm olan düz yüzeye sahip dairesel kesitli kanalda (DK) $500 \leq Re \leq 2000$ akış rejiminde akan Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\varphi = \%0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\varphi = \%0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Nu sayısının değişimi Re'nin bir fonksiyonu olarak Şekil 5.2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Nu'nun Re değeri arttıkça yükselme eğiliminde olduğu ve en yüksek Nu sayısının Re=2000'de $\varphi = \%0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol akışkanında elde edildiği görülmüştür.

Farklı akışkanların Re=2000'deki Nu değerinin farkları incelendiğinde $\varphi = \%0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Suya, Etilen Glikole, %60Su+%40Etilen Glikole ve $\varphi = \%0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikole göre sırasıyla %44.4, %12.9, %42.1 ve %4.6 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere hibrit nanoakışkan konsantrasyonunun Nu değerine doğrudan etki ettiği açık bir şekilde görülmektedir. Elde edilen bu sonuç Tijerina vd. [79] tarafından yapılan çalışmaya benzerlik göstermektedir. Araştırmacılar laminer akışta düz kanatlı kanalda Su, Etilen

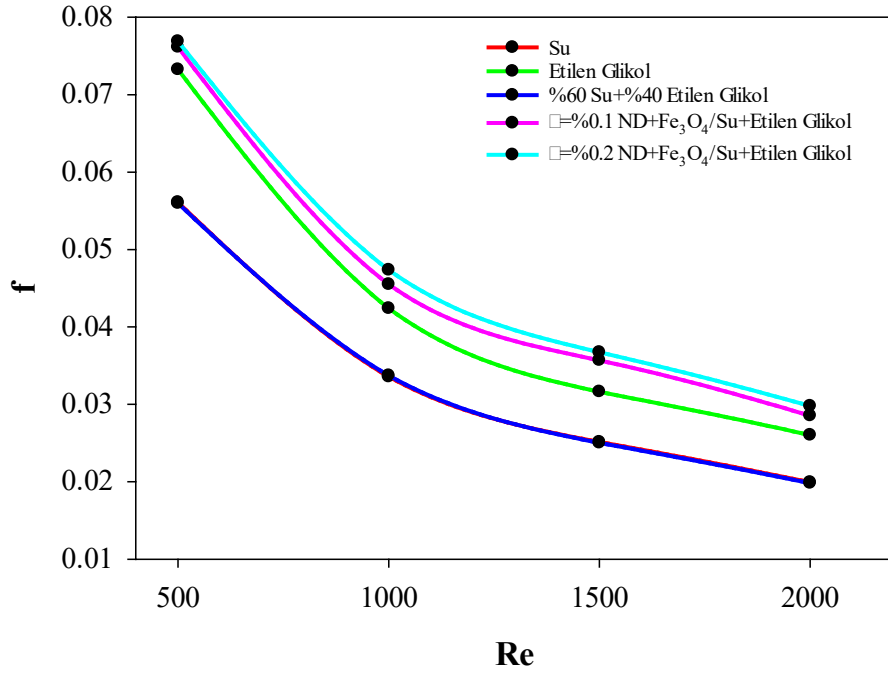
Glikol ve türbin yağı baz akışkanları ile Al_2O_3 , TiO_2 , CuO , SiO_2 ve ZnO nanopartikülleri kullanılarak yapılan çalışmada Re değerinin artmasıyla Nu sayısının da arttığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 5.2. Re değerine bağlı olarak Nu değişimi (DK için).

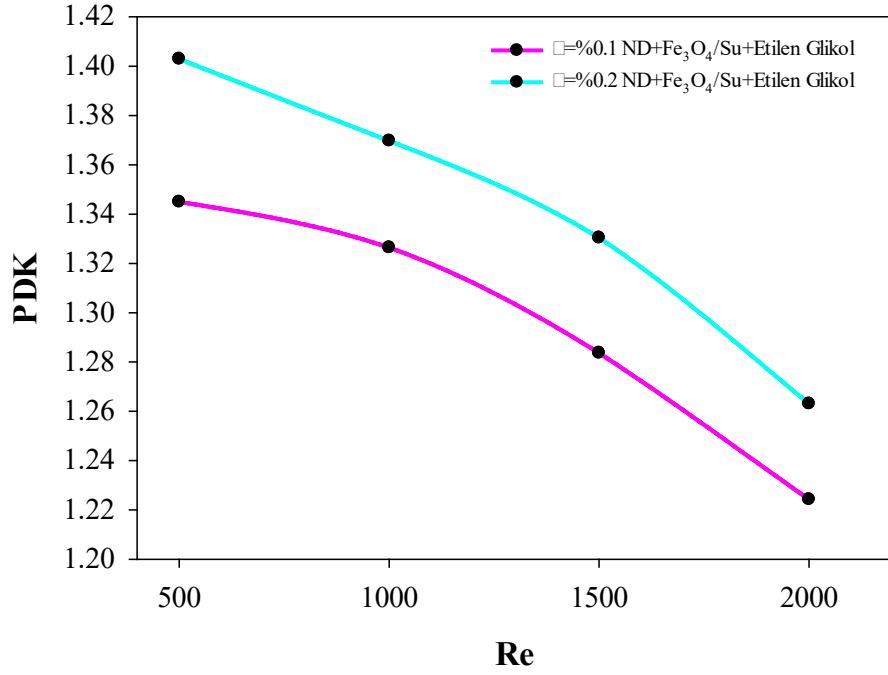
DK kanalından akan Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\phi=0,1$ ND+ Fe_3O_4 /Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+ Fe_3O_4 /Su+Etilen Glikol akışkanlarının f değerinin $500 \leq Re \leq 2000$ aralığındaki değişimi Şekil 5.3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda Re arttıkça, f değerinin azaldığı gözlemlenmektedir. En yüksek f değeri $Re=500$ 'de $\phi=0,2$ ND+ Fe_3O_4 /Su+Etilen Glikol nanoakışkanında görülmüştür. En düşük f değeri ise $Re=2000$ 'de %60Su+%40Etilen Glikol karışımında görülmüştür.

Farklı akışkanların $Re=2000$ 'deki f değerinin farkları incelendiğinde $\phi=0,2$ ND+ Fe_3O_4 /Su+Etilen Glikolün Suya, Etilen Glikole, %60Su+%40Etilen Glikole ve $\phi=0,1$ ND+ Fe_3O_4 /Su+Etilen Glikole göre sırasıyla %49.4, %14.5, %50.3 ve %4.4 oranlarında artışa neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.3. Re değerine bağlı olarak f değerinin değişimi (DK için).

Şekil 5.4'te gösterilen grafik DK kanalında $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol akışkanlarının PDK değerlerini vermektedir. Re=500'de $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanının performansı, nanopartikül oranı daha fazla olduğu için $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanına göre daha iyidir ve en düşük performans Re=2000'de $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanında görülmüştür. Re=2000'deki PDK değerinin farkı incelendiğinde $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün, suya ve $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikole göre sırasıyla %26.3 ve %3.2 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir.

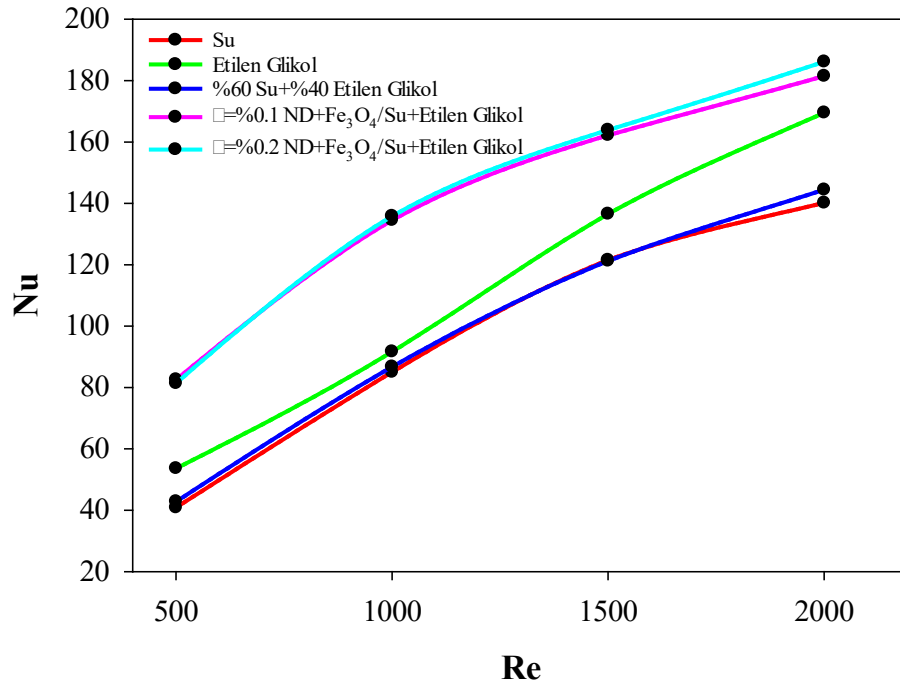


Şekil 5.4. $\phi=0,1$ ND+ Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+ Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanlarının $500 \leq Re \leq 2000$ aralığındaki Re değerlerine göre PDK değişimi.

5.2. PK1 KANALINDA Nu-f VE PDK DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ

Uzunluğu 1500 mm ve çapı 16 mm olan küçük gözyaşı damlası yüzeyine sahip dairesel kesitli kanalda (PK1 kanalı) $500 \leq Re \leq 2000$ akış rejiminde akan Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Nu sayısının değişimi Re'nin bir fonksiyonu olarak Şekil 5.5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Nu'nun Re değeri arttıkça yükselme eğiliminde olduğu ve en yüksek Nu sayısının Re=2000'de $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol akışkanında elde edildiği görülmüştür.

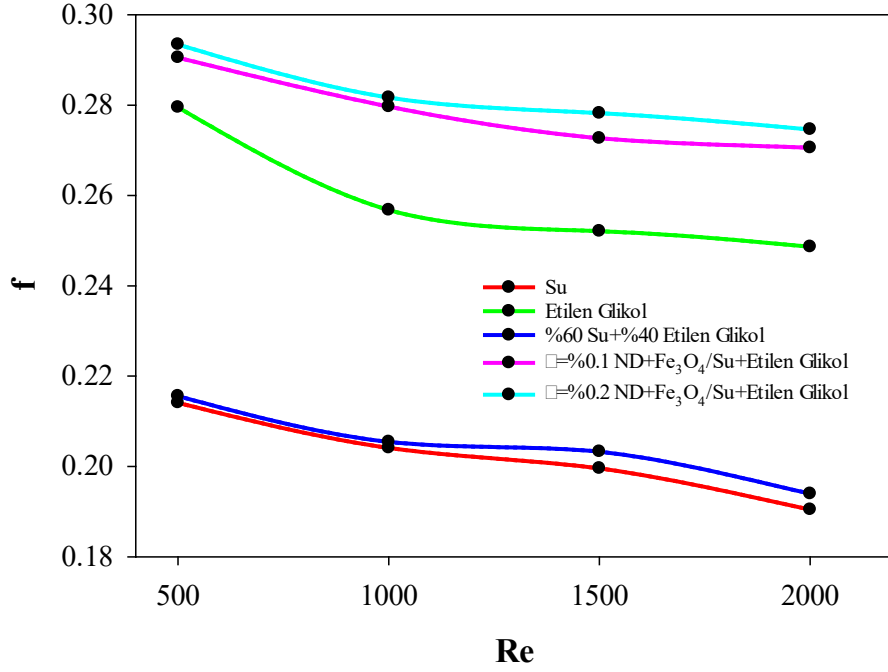
Farklı akışkanların Re=2000'deki Nu değerinin farkları incelendiğinde $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Suya, Etilen Glikole, %60Su+%40Etilen Glikole ve $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikole göre sırasıyla %32.8, %9.8, %28.9 ve %2.6 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere hibrit nanoakışkan konsantrasyonunun Nu değerine doğrudan etki ettiği açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.5. Re değerine bağlı olarak Nu değişimi (PK1 için).

PK1 kanalından akan Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol akışkanlarının f değerinin $500 \leq Re \leq 2000$ aralığındaki değişimi Şekil 5.6’da verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Re arttıkça, f değerinin azaldığı gözlemlenmektedir. En yüksek f değeri $Re=500$ ’de $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanında görülmüştür. En düşük f değeri ise $Re=2000$ ’de Su akışkanında görülmektedir.

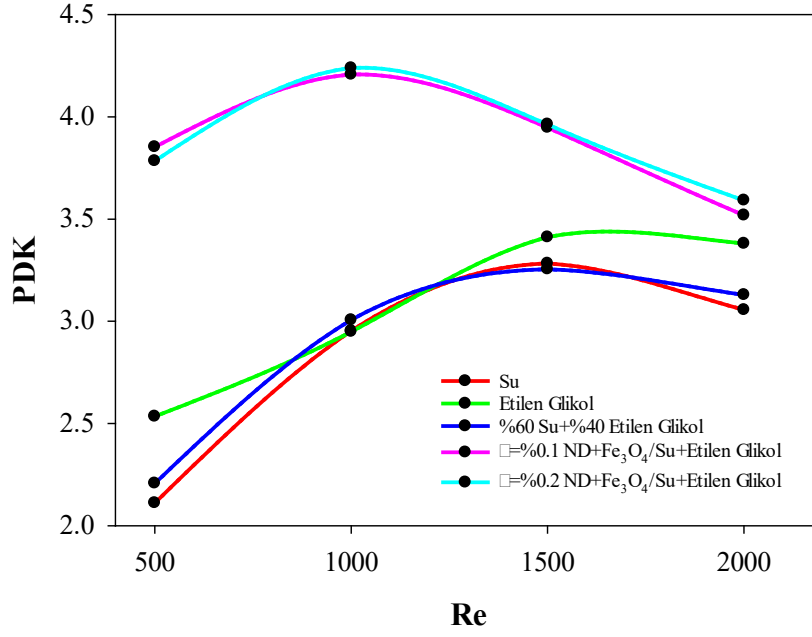
Farklı akışkanların $Re=2000$ ’deki f değerinin farkları incelendiğinde $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Suya, Etilen Glikole, %60Su+%40Etilen Glikole ve $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikole göre sırasıyla %44.2, %10.4, %41.6 ve %1.5 oranlarında artışa neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.6. Re değerine bağlı olarak f değerinin değişimi (PK1 için).

Şekil 5.7’de gösterilen grafik PK1 kanalında Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol akışkanlarının PDK değerlerini vermektedir. Re=1000’de $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanı, nanopartikül oranı diğer tüm akışkanlardan fazla olduğu için en iyi performansı göstermiştir. En düşük performans ise Re=500’de Su temel akışkanında görülmüştür.

Farklı akışkanların Re=2000’deki PDK değerinin farkları incelendiğinde $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Suya, Etilen Glikole, %60Su+%40Etilen Glikole ve $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikole göre sırasıyla %17.5, %6.2, %14.7 ve %2.1 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

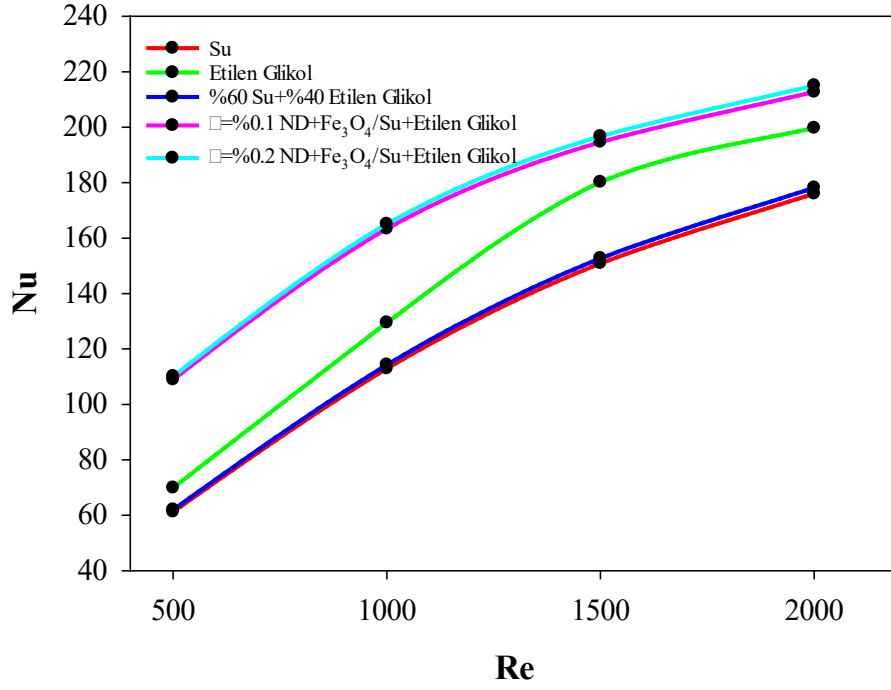


Şekil 5.7. PK1 kanalından Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanlarının $500 \leq Re \leq 2000$ aralığındaki Re değerlerine göre PDK değişimi.

5.3. PK2 KANALINDA Nu-f VE PDK DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ

Uzunluğu 1500 mm ve çapı 16 mm olan düz yüzeye sahip dairesel kesitli kanalda $500 \leq Re \leq 2000$ akış rejiminde akan Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Nu sayısının değişimi Re'nin bir fonksiyonu olarak Şekil 5.8'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Nu'nun Re değeri arttıkça yükselme eğiliminde olduğu ve en yüksek Nu sayısının Re=2000'de $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol akışkanında elde edildiği görülmüştür.

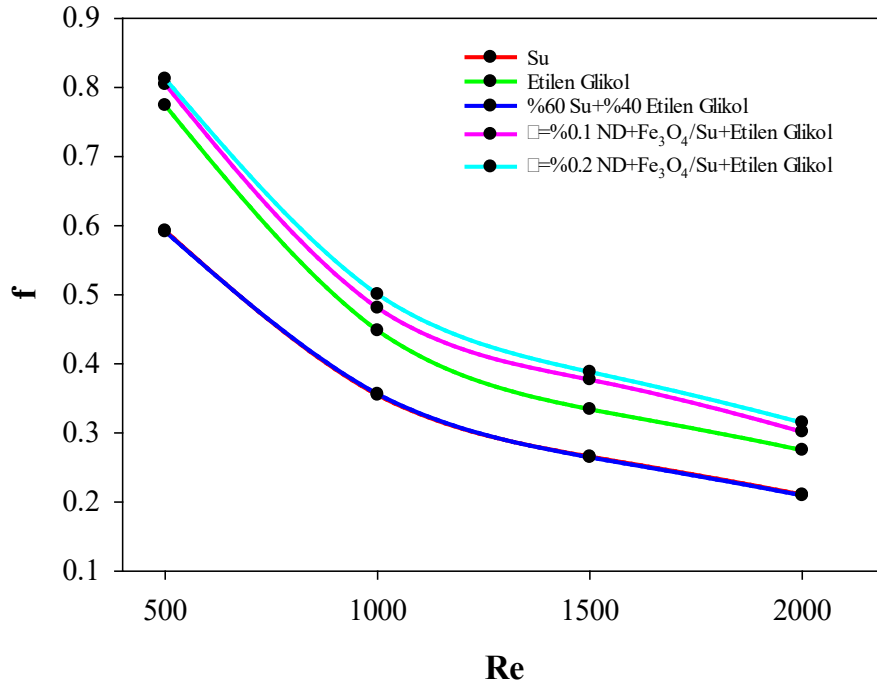
Farklı akışkanların Re=2000'deki Nu değerinin farkları incelendiğinde $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Suya, Etilen Glikole, %60Su+%40Etilen Glikole ve $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikole göre sırasıyla %22.1, %7.7, %20.7 ve %1.1 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere hibrit nanoakışkan konsantrasyonunun Nu değerine doğrudan etki ettiği açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil. 5.8. Re değerine bağlı olarak Nu değişimi (PK2 için).

PK2 kanalından akan Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol akışkanlarının f değerinin $500 \leq Re \leq 2000$ aralığındaki değişimi Şekil 5.9’da verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Re arttıkça, f değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. En yüksek f değeri Re=500’de $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanında görülmüştür. En düşük f değeri ise Re=2000’de %60Su+%40Etilen Glikol karışımında görülmüştür.

Farklı akışkanların Re=2000’deki f değerinin farkları incelendiğinde $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Suya, Etilen Glikole, %60Su+%40Etilen Glikole ve $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikole göre sırasıyla %49.5, %14.5, %50.3 ve %4.4 oranlarında artışa neden olduğu belirlenmiştir.



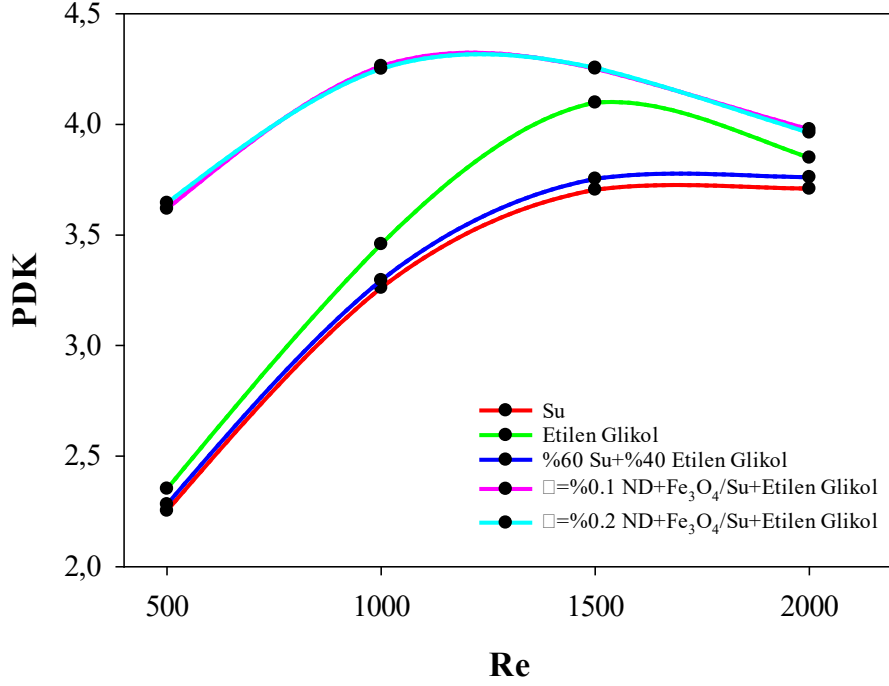
Şekil 5.9. Re değerine bağlı olarak f değerinin değişimi (PK2 için).

Şekil 5.10'da gösterilen grafik PK2 kanalında Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol akışkanlarının PDK değerlerini vermektedir. En yüksek performans Re=1000'de $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanında görülmüştür. En düşük performans Re=500'de Su akışkanında görülmüştür.

Farklı akışkanların Re=2000'deki PDK değerinin farkları incelendiğinde $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikolün Suya, Etilen Glikole, %60Su+%40Etilen Glikole ve $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikole göre sırasıyla %7.6, %3.7, %6.2 ve %0,4 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

PK2 kanalında bulunan sonuçlar, PK1 kanalında bulunan sonuçlar ile kıyaslandığında; PK2 kanalında Re=1000'de $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanında en yüksek PDK değeri elde edilmiştir, PK1 kanalında ise Re=1000'de $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanında en yüksek PDK değeri elde edilmiştir. Ayrıca PK2 kanalında Re=1000'de $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanının PDK değeri, PK1 kanalındaki $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol

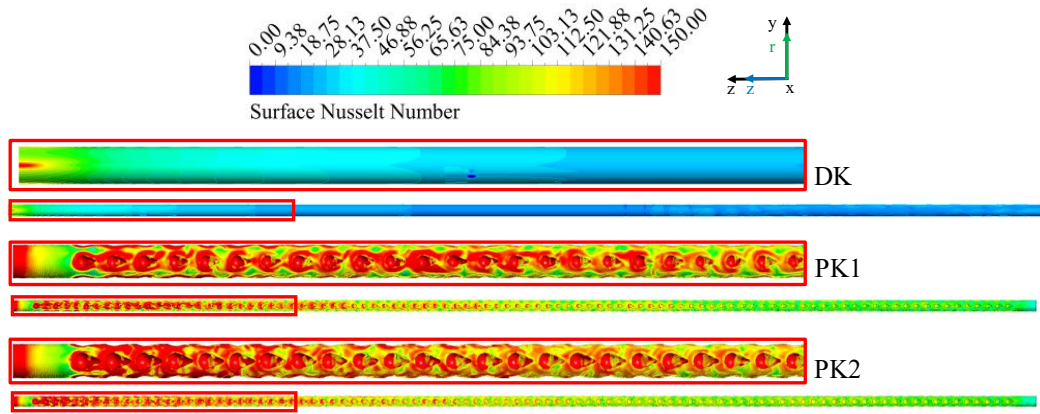
nanoakışkanının PDK değeri ile kıyaslandığında %0.59 oranında bir artış olduğu görülmüştür.



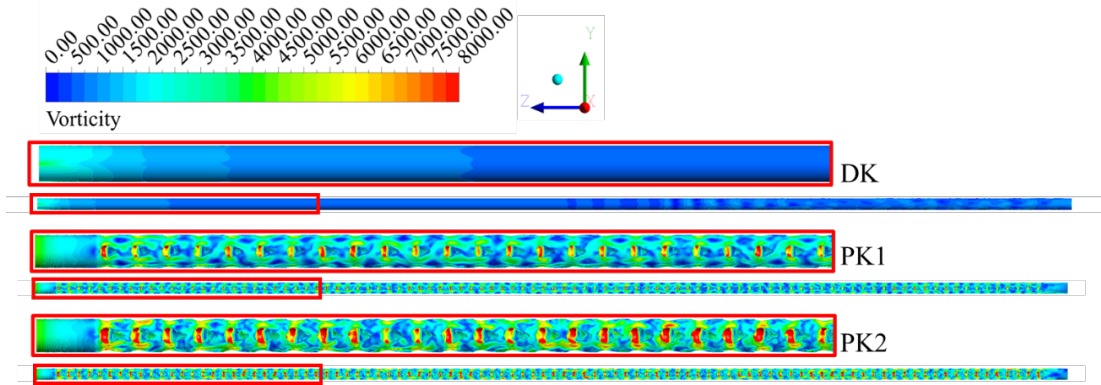
Şekil 5.10. PK2 kanalından Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, ϕ =%0,1 ND+ Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve ϕ =%0,2 ND+ Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanlarının $500 \leq Re \leq 2000$ aralığındaki Re değerlerine göre PDK değişimi.

5.4. GÖZYAŞI DAMLASI ŞEKLİNDEKİ KANATÇIKLARIN ISI, AKIŞ, SICAKLIK VE HIZ KARAKTERİSTİĞİNE ETKİSİ

Farklı boyutlara sahip gözyaşı damlası şeklindeki kanatçıkların lokal Nu değişimi Şekil 5.11’de verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere kanatçıklar akış kanalının termal performansını dikkate değer bir şekilde arttırmıştır. Ayrıca kanat boyutu arttıkça termal performansta artışlar gözlemlenmiştir. Bu artışa neden olan en büyük etken akışkanın kanal içerisinde akması sırasında akışkanın kanat yüzeyine çarpması sonucu oluşturduğu vortekslerdir. Bu vorteksler Şekil 5.12’de gösterilmiş olup, ısıl ve hız sınır tabakaların incelmesine neden olmakta ve bu sayede taşınımın gerçekleşen ısı transferinin artmasını sağlamaktadır.

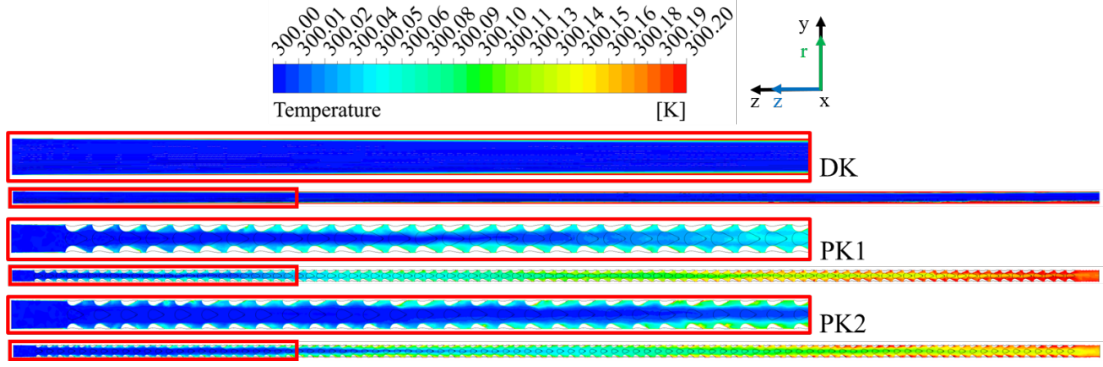


Şekil 5.11. DK, PK1 ve PK2 kanallarındaki lokal Nu değişimi.



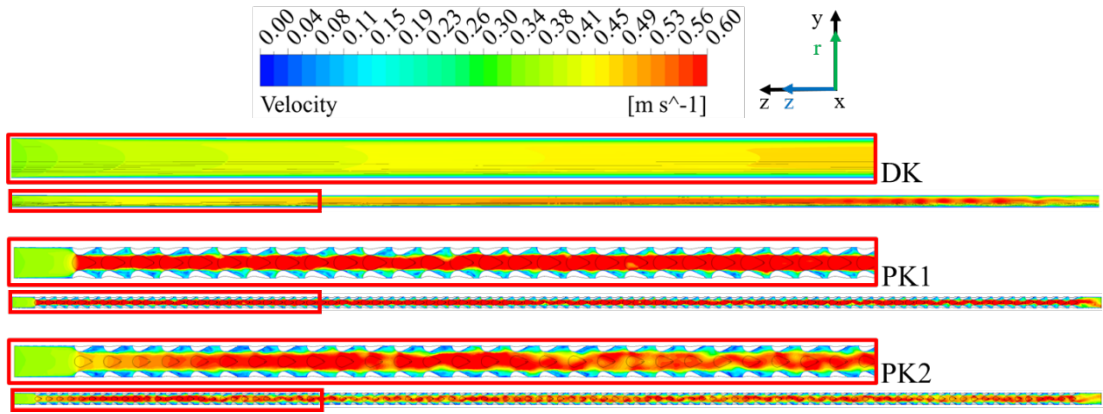
Şekil 5.12. DK, PK1 ve PK2 kanallarındaki lokal vorteks oluşumları.

Farklı boyutlara sahip gözyaşı damlası şeklindeki kanatçıkların sıcaklık karakteristiği $Re=2000$ olan su için Şekil 5.13'te verilmiştir. Kanatçık boyutu arttıkça akışkandaki vortekslerin de şiddeti arttığından dolayı dairesel kesitli kanal yüzeyine uygulanan ısı, akışkana daha iyi taşınır. Bunun sonucunda da PK2'den akan akışkanın çıkış sıcaklığı daha fazladır.



Şekil 5.13. DK, PK1 ve PK2 kanallarındaki sıcaklık karakteristiğinin karşılaştırılması.

Farklı boyutlara sahip gözyaşı damlası şeklindeki kanatçıkların hız karakteristiği $Re=2000$ olan su için Şekil 5.14’te verilmiştir. Şekilde de açık bir şekilde görüldüğü üzere PK1 kanat yapısına sahip dairesel kesitli kanallarda lokal hız değişiminin ileri derecede olduğu gözlemlenmektedir. Bu duruma neden olan en büyük etken akışkanın, kanatçıkların ön yüzüne ani bir şekilde çarpması ve akışkan iki düşey hizadaki kanatçık arasından geçtiğinde kesitte meydana gelen daralmadır.

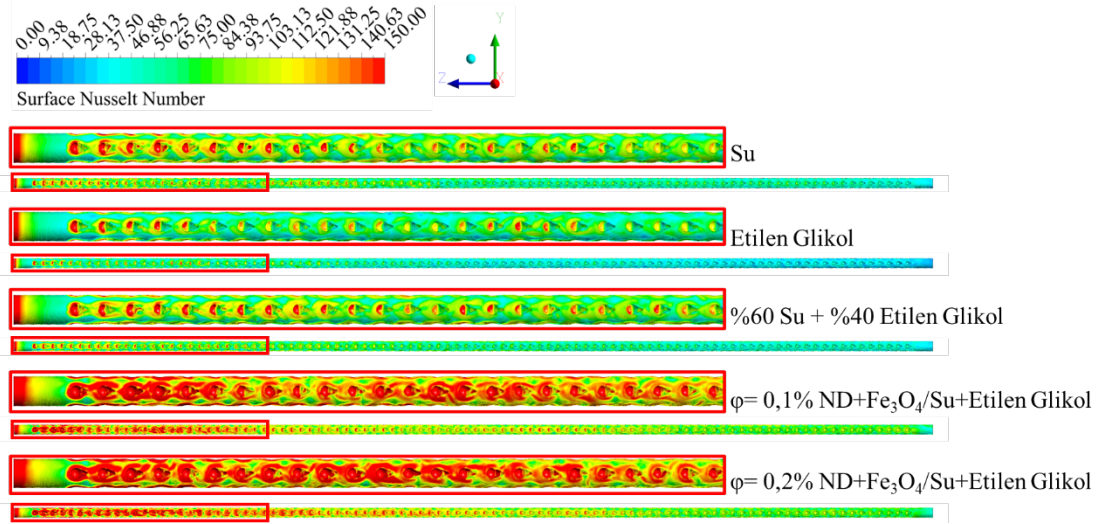


Şekil 5.14. DK, PK1 ve PK2 kanallarında hız karakteristiğinin karşılaştırması.

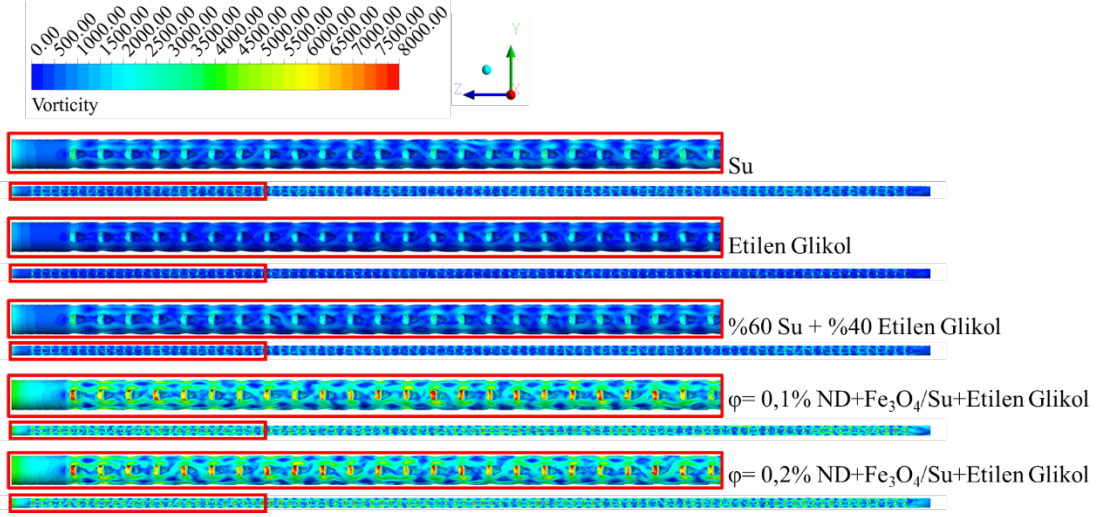
5.5. FARKLI BAZ AKIŞKAN VE ND+Fe₃O₄ NANOPARTİKÜLLERİNİN ISI VE AKIŞ KARAKTERİSTİĞİNE ETKİSİ

Bu tez çalışmasında ısı ve akış karakteristiği incelenen Su, Etilen Glikol, %60Su+%40Etilen Glikol, $\phi=0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol ve $\phi=0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol akışkanlarına ait lokal Nu ve vorteks oluşumları sırasıyla Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilmiştir. Lokal Nu değişimleri incelendiğinde akışkanlar

arasında ciddi farklılıkların olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle hibrit nanoakışkanlar tarafından sergilenen lokal Nu baz akışkanlara önemli derecede üstünlük sağlamaktadır ve konsantrasyon arttıkça lokal Nu'da da artışlar görülmektedir. Bu duruma neden olan en büyük etken akışkanın artan ısı iletkenlik değerine ve partiküllerin kendi aralarında ve onları çevreleyen baz akışkan arasında meydana gelen Brownian hareketidir. Konsantrasyon oranı arttıkça Brownian hareketinin şiddeti ve etkisi de oransal olarak artış göstermektedir. Lokal Nu'da meydana gelen bu değişimin vortekslerde meydana geldiği tam anlamıyla söylenememektedir. Vortekslerde meydana gelen değişimin sadece hibrit nanoakışkanın konsantrasyonuna bağlı olarak artış gösterdiği ve baz akışkanlarda neredeyse aynı şiddette oluştuğu söylenebilir.



Şekil 5.15. Farklı baz akışkan ve ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol hibrit nanoakışkanlarının lokal Nu'larının karşılaştırılması.



Şekil 5.16. Farklı baz akışkan ve ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol hibrit nanoakışkanlarının vortekslerinin karşılaştırılması.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ND, Fe₃O₄ nanopartikülleri ile Su ve Etilen Glikol baz akışkanlarının, farklı konsantrasyon ve karışımlarda, DK, PK1 ve PK2 kanallarında, laminer akış şartlarında ($500 \leq Re \leq 2000$), sabit ısı akısı (600 W/m^2) uygulanarak nanoakışkanların ısı transferi ve akış karakteristiğine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. %0,1 ve %0,2 hacimsel konsantrasyonlarında ND ve Fe₃O₄ nanopartikülleri, Su ve Etilen Glikol baz akışkanları ile karıştırılarak nanoakışkanlar oluşturulmuştur. Sayısal analizler, sonlu hacimler tekniği ile ANSYS 2020 R2 programında Fluent kodu ile problemle ilgili olan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri iteratif olarak çözümlenmiştir. Sayısal analizler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda belirtilmiştir:

- Hibrit nanoakışkan kullanımı taşınım ile ısı transferini iyileştirmiştir.
- Nanopartikül hacimsel oran artışı, ısı transferini iyileştirirken basınç düşümünü arttırmıştır.
- Gözyaşı damlası desenli çukur kanattaki vorteks oluşumları, ısı transferinin artması sağlanmıştır.
- En iyi ısı transfer artışı, $Re=2000$ 'de PK2 kanalında $\phi=\%0,2$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanı kullanıldığı durumda gerçekleşmiştir.
- PK2 kanalındaki ısı transferi, akışkanın su olduğu durumda DK ve PK1 kanallarıyla karşılaştırıldığında sırasıyla %714 ve %25.5 oranlarında artış göstermiştir.
- En iyi PDK değeri $Re=1000$ 'de PK2 kanalında $\phi=\%0,1$ ND+Fe₃O₄/Su+Etilen Glikol nanoakışkanı kullanıldığı durumda 4.26 olarak elde edilmiştir.
- Gelecek çalışmalarda farklı çukur ve kanal geometrileri ile farklı nanoakışkan kullanarak hem sayısal hem de deneysel çalışmalar yapılması önerilir.

KAYNAKLAR

1. Araiz M, Araiz M., “Introductory Chapter: Heat Transfer. Heat Transfer”, *Design, Experimentation and Applications*, (2021).
2. Bejan A., “Chapter 4: External Natural Convection.”, *Convection in Porous Media*, 122–87 (2006).
3. McGrail BP, Thallapally PK, Blanchard J, Nune SK, Jenks JJ, Dang LX., “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles.”, *Nano Energy*, (2):845–55 (1995).
4. Wang X, Xu X, Choi SUS., “Thermal Conductivity of Nanoparticle” *Fluid Mixture.*, (13):474–80 (2012).
5. Cheraghi MH, Ameri M, 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).
6. Xie S, Guo Z, Gong Y, Dong C, Liu J, Ren L., “Numerical investigation of thermal-hydraulic performance of a heat exchanger tube with helical dimples.”, *International Journal of Thermal Sciences*, (177):107530 (2022).
7. Liu Y, Rao Y, Weigand B., “Heat transfer and pressure loss characteristics in a swirl cooling tube with dimples on the tube inner surface.”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (128):54–65 (2019).
8. Farsad S, Mashayekhi M, Zolfagharnasab MH, Lakhi M, Farhani F, Zareinia K., “The effects of tube Dimples-Protrusions on the thermo-fluidic properties of turbulent forced-convection.”, *Case Studies in Thermal Engineering*, (35):102033 (2022).
9. Dedeyne JN, Van Cauwenberge DJ, Reyniers PA, Van Geem KM, Marin GB., “Large eddy simulation of tubular reactors with spherical dimples.”, *Chemical Engineering Journal*, (380):122463 (2020).
10. Zhang L, Xiong W, Zheng J, Liang Z, 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).
11. Firoozi AO, Majidi S, 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).

12. Mironov A, Isaev S, Skrypnik A, Popov I., “Numerical and physical simulation of heat transfer enhancement using oval dimple vortex generators” *Review and Recommendations. Energies (Basel)*, 13 (2020).
13. Khan MZU, Akbar B, Sajjad R, Rajput UA, Mastoi S, Uddin E., “Investigation of heat transfer in dimple-protrusion micro-channel heat sinks using copper oxide nano-additives.”, *Case Studies in Thermal Engineering*, (28):101374 (2021).
14. Lotfi B, Sundén B., “Thermo-Hydraulic Performance Enhancement of Finned Elliptical Tube Heat Exchangers by Utilizing Innovative Dimple Turbulators.”, *Heat Transfer Engineering*, (41):1117–42 (2020).
15. Feng Y, Xu R, Cao Y, Wu X, Liang C, Zhang L., “Optimization of H-type finned tube heat exchangers with combinations of longitudinal vortex generator, dimples/protrusions and grooves by Taguchi method.”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (143):106709 (2023).
16. Al-Obaidi AR., “Analysis of the flow field, thermal performance, and heat transfer augmentation in circular tube using different dimple geometrical configurations with internal twisted-tape insert.”, *Heat Transfer*, (49):4153–72 (2020).
17. Rajabi AH, Toghraie D, Mehmandoust B., “Numerical simulation of turbulent nanofluid flow in the narrow channel with a heated wall and a spherical dimple placed on it by using of single-phase and mixture-phase models.”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (108):104316 (2019).
18. Dagdevir T, Keklikcioglu O, Ozceyhan V., “Heat transfer performance and flow characteristic in enhanced tube with the trapezoidal dimples.”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (108):104299 (2019).
19. Zhang P, Rao Y, Xie Y, Zhang M., “Turbulent flow structure and heat transfer mechanisms over surface vortex structures of micro V-shaped ribs and dimples.”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (178):121611 (2021).
20. Singh BP, Bisht VS, Bhandari P, Rawat KS., “Thermo-Fluidic Modelling of a Heat Exchanger Tube with Conical Shaped Insert having Protrusion and Dimple Roughness.”, *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, (3):127–43 (2021).
21. Xie S, Liang Z, Zhang J, Zhang L, Wang Y, Ding H., “Numerical investigation on flow and heat transfer in dimpled tube with teardrop dimples.”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (131):713–23 (2019).
22. Sabir R, Khan MM, Sheikh NA, Ahad IU., “Effect of dimple pitch on thermal-hydraulic performance of tubes enhanced with ellipsoidal and teardrop dimples.”, *Case Studies in Thermal Engineering*, (31):101835 (2022).
23. Perwez A, Kumar R., “Heat transfer performance investigation of the spherical dimple heat sink and inclined teardrop dimple heat sink.”, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications.*, (76):73–86 (2019).

24. Jing Q, Xie Y, Zhang D., “Thermal-hydraulic performance and entropy generation of supercritical carbon dioxide in heat exchanger channels with teardrop dimple/protrusion.”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (135):1082–96 (2019).
25. Lei X shu, Li J bo, Qi X, Liu Y wen., “Prediction and analysis of thermal-hydraulic performance of tubes with teardrop dimples based on artificial neural networks.”, *The Canadian Journal Chemical Engineering*, (100):202–20 (2022).
26. Sepehrnia M, Khorasanizadeh H, Shafii MB., “Effect of transverse and parallel magnetic fields on thermal and thermo-hydraulic performances of ferro-nanofluid flow in trapezoidal microchannel heat sink.”, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, (31):2089–111 (2021).
27. Saqib M, Khan I, Shafie S, Mohamad AQ., “Shape effect on MHD flow of time fractional Ferro-Brinkman type nanofluid with ramped heating.” *Scientific Reports*, 11 (2021).
28. Ebaid MSY, Ghrair AM, Al-busoul M., “Investigation of heat transfer enhancement using ferro-nanofluids ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{water}$) in a heated pipe under the application of magnetic field.”, *Advances in Mechanical Engineering*, 14 (2022).
29. Rashed AS, Nasr EH, Kassem MM., “Mathematical Investigation for Flow Characteristics of Laminar Ferro-Nanofluid Incorporating Cobalt Ferrite Nanoparticles.” *Journal of Nano Research*, (68):52–69 (2021).
30. Thamizharasan T, Reddy AS., “Pulsating hydromagnetic flow and heat transfer of Jeffrey ferro-nanofluid in a porous channel: a dynamics of blood.”, *The European Physical Journal Special Topics*, 231:6 2022;231:1205–14 (2022).
31. Abdel-wahed MS., “Magnetohydrodynamic Ferro-Nano fluid flow in a semi-porous curved tube under the effect of hall current and nonlinear thermal radiative.”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (474):347–54 (2019).
32. Parviz M, Ahmadi-Danesh-Ashtiani H, Saraei A, Afshar H., “Numerical simulation of forced convection of ferro-nanofluid in a U-shaped tube subjected to a magnetic field.” *Alexandria Engineering Journal*, (66):1015–30 (2023).
33. Kamis NI, Jiann LY, Shafie S, Rawi NA., “Comparative analysis of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ and $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4/\text{MnZnFe}_2\text{O}_4$ hybrid ferro-nanofluids flow under magnetic dipole effect over a slip stretching sheet.”, *Case Studies in Thermal Engineering*, (51):103580 (2023).
34. Aghamiri H, Niknejadi M, Toghraie D., “Analysis of the forced convection of two-phase Ferro-nanofluid flow in a completely porous microchannel containing rotating cylinders.”, *Scientific Reports*, 11 (2021).
35. Imran M, Alam MM, Hussain S, Abutaleb A, Aziz A, Chandan MR., “Colloidal Fe_3O_4 nanoparticles-based oil blend ferro-nanofluid for heat transfer

- application.”, *The European Physical Journal Plus*, 136:7 2021;136:1–17 (2021).
36. Gürdal M, Pazarlıoğlu HK, Tekir M, Arslan K, Gedik E, Taşkesen E., “Experimental investigation on thermo hydraulic performance of ferronanofluid flow in a dimpled tube under magnetic field effect.”, *Experimental Heat Transfer*, (36):312–30 (2023).
 37. Gürsoy E, Gürdal M, Kadir Pazarlıoğlu H, Dağdeviren A, Tekir M, Arslan K., “Effect of magnetic field locations on thermo-magnetic convection performance of Fe₃O₄/H₂O ferrofluid flowing in a novel dimpled tube: An experimental study.”, *Applied Thermal Engineering*, (226):120305 (2023).
 38. Gürdal M, Pazarlıoğlu HK, Tekir M, Arslan K, 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).
 39. Hosseini F, Sheikholeslami M., “Effects of self-cleaning technique and nanofluid cooling on performance of photovoltaic solar unit employing sinusoidal surfaces.”, *Applied Thermal Engineering*, (240):122223 (2024).
 40. İnternet: Wikipedia, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Nanoteknoloji>
 41. Choi, SU, Dunlap BD, Eastman JA, Poeppel RB, Valentin RA, Wambsganss MW, Weeks RW., “Nanofluid Technology: Current Status an Future and Research.”, *Energy Technology Devision Argonne Labrotory*, Argonne, USA., (1999).
 42. Choi, S.U. ve Eastman, J., “Enhancing thermal conductivity of fluids with Nanoparticles.”, *ASME International Mechanical Engineering Congress &Exposition*, San Francisco, CA., (1995).
 43. Haddad Z, Abid C, Oztop HF, Mataoui A., “A review on how the researchers prepare their nanofluids.”, *International Journal of Thermal Sciences*, (76):168–89 (2014).
 44. Chavan D, Pise AT., “Experimental investigation of convective heat transfer agumentation using Al₂O₃/water nanofluid in circular pipe.”, *Heat and Mass Transfer*, (51):1237–46 (2015).
 45. Gupta M, Singh V, Kumar R, Said Z., “A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications.”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (74):638–70 (2017).
 46. Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., ve Choi, S. U. S., “Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements”, *Heat Transfer Engineering*, 29 (5): 432–460 (2008)

47. Bhardwaj P, Singh B, Behera SP., “Green approaches for nanoparticle synthesis: emerging trends.”, *Nanomaterials: Application in Biofuels and Bioenergy Production Systems*, 167–93 (2021).
48. C. Thomas S, Harshita, Kumar Mishra P, Talegaonkar S., “Ceramic Nanoparticles: Fabrication Methods and Applications in Drug Delivery”, *Current Pharmaceutical Design*, (21):6165-6188 (2015).
49. Das, S. K., Choi, S. U. S., ve Patel, H. E., “Heat transfer in nanofluids—a review”, *Heat Transfer Engineering*, 27 (10): 3–19 (2006).
50. Ali N, Bahman AM, Aljuwayhel NF, Ebrahim SA, Mukherjee S, Alsayegh A., “Carbon-Based Nanofluids and Their Advances Towards Heat Transfer Applications-A Review”, *Nanomaterials*, (11):1628 (2021).
51. Salehi, J.M., Heyhat, M.M., Rajabpour, A., “Enhancement of thermal conductivity of silver nanofluid synthesized by a one-step method with the effect of polyvinylpyrrolidone on thermal behavior”, *Applied Physics Letters.*, 102 (2013).
52. Minea AA., “Challenges in hybrid nanofluids behavior in turbulent flow: Recent research and numerical comparison.”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (71):426–34 (2017).
53. Sundar LS, Sharma K V., Singh MK, Sousa ACM., “Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor – A review.”, *Renewable and Sustainable Energy Review* (68):185–98 (2017).
54. Maskeen MM, Zeeshan A, Mehmood OU, Hassan M., “Heat transfer enhancement in hydromagnetic alumina–copper/water hybrid nanofluid flow over a stretching cylinder.”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, (138):1127–36 (2019).
55. Jamil F, Ali HM., “Applications of hybrid nanofluids in different fields.”, *Hybrid Nanofluids for Convection Heat Transfer*, 215–54 (2020).
56. Che Sidik NA, Mahmud Jamil M, Aziz Japar WMA, Muhammad Adamu I., “A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids.”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (80):1112–22 (2017).
57. Huminic G, Huminic A., “Hybrid nanofluids for heat transfer applications – A state-of-the-art review.”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (125):82–103 (2018).
58. Sundar LS, Venkata Ramana E, Graça MPF, Singh MK, Sousa ACM., “Nanodiamond-Fe₃O₄ nanofluids: Preparation and measurement of viscosity, electrical and thermal conductivities.”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (73):62–74 (2016).

59. Sundar LS, Singh MK, Ramana EV, Singh B, Grácio J, Sousa ACM., “Enhanced Thermal Conductivity and Viscosity of Nanodiamond-Nickel Nanocomposite Nanofluids.”, *Scientific Reports*, (4):1–14 (2014).
60. Bardool, R., Bakhtyari, A., Esmailzadeh, F., ve Wang, X., “Nanofluid viscosity modeling based on the friction theory”, *Journal Of Molecular Liquids*, 286:110923 (2019)
61. Vajjha RS, Das DK., “A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power.”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (55):4063–78 (2012).
62. Pak BC, Cho YI., “Hydrodynamic And Heat Transfer Study Of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide Particles.”, *Experimental Heat Transfer An International Journal*, (11):151–70 (1998).
63. Bashirnezhad K, Bazri S, Safaei MR, Goodarzi M, Dahari M, Mahian O., “Viscosity of nanofluids: A review of recent experimental studies.”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (73):114–23 (2016).
64. Singh S, Ghosh SK., “A unique artificial intelligence approach and mathematical model to accurately evaluate viscosity and density of several nanofluids from experimental data.”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, (640):128389 (2022).
65. Chavan D, Pise A., “Experimental Investigation of Effective Viscosity and Density of Nanofluids.”, *materialstoday:PROCEEDINGS*, (16):504–15 (2019).
66. Awais M, Bhuiyan AA, Salehin S, Ehsan MM, Khan B, Rahman MH., “Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: A critical overview.”, *International Journal of Thermofluids*, (10):100086 (2021).
67. Ali N, Teixeira JA, Addali A., “A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties.”, *Journal of Nanomaterials*, 6978130 (2018).
68. Shahrul IM, Mahbubul IM, Khaleduzzaman SS, Saidur R, Sabri MFM., “A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective.”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (38):88–98 (2014).
69. Xuan Y, Roetzel W., “Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids.”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (43):3701–7 (2000).
70. Vajjha RS, Das DK., “Specific heat measurement of three nanofluids and development of new correlations.”, *Journal of Heat Transfer*, (131):1–7 (2009).
71. J. Ordóñez-Miranda, JJ Alvarado-Gil ve R. Medine-Ezquivel., “Generalized Bruggeman Formula for the effective thermal conductivity of particulate composites with an interface layer.”, *International Journal of Thermophysics*, (31):975-986 (2010).

72. İnternet: Mühendistan, “ANSYS Nedir? Nerelerde Kullanılır?”, <https://muhendistan.com/ansys-nedir-nerelerde-kullanilir/> (2020)
73. Gedik, E., “Silindirik borularda manyetohidrokinamik akışın deneysel olarak incelenmesi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile sayısal analizi”, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ph.D. Thesis, Karabük, 46-52 (2012).
74. Karabulut, K., " Isı Değiştiricilerde Isı Aktarımının Nanoakışkanlar Kullanılarak Arttırılması.", *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi 149 (2015).
75. Taştan G., “Dairesel Bir Borudaki Zorlanmış Taşınımın Isı Transferine Nanopartikül Şekil Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi”, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi 37 (2022).
76. Syam Sundar L, Singh MK, Ferro MC, Sousa ACM., “Experimental investigation of the thermal transport properties of graphene oxide/Co₃O₄ hybrid nanofluids.”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (84):1–10 (2017).
77. Syam Sundar L, Mesfin S, Venkata Ramana E, Said Z, Sousa ACM., “Experimental investigation of thermo-physical properties, heat transfer, pumping power, entropy generation, and exergy efficiency of nanodiamond + Fe₃O₄/60:40% water-ethylene glycol hybrid nanofluid flow in a tube.”, *Thermal Science and Engineering Progress*, (21):100799 (2021).
78. Taşkesen E., Tekir M., Gedik E., Arslan K., “Numerical investigation of laminar forced convection and entropy generation of Fe₃O₄/water nanofluids in different cross-sectioned channel geometries”, *Journal of Thermal Engineering*, (7):7;1752-1767 (2021).
79. Ramirez-Tijerina R, Rivera-Solorio CI, Singh J, Nigam KDP., “Numerical study of heat transfer enhancement for laminar nanofluids flow.” *Applied Sciences (Switzerland)*, (8):12 (2018).

ÖZGEÇMİŞ

Esra SABAN ilk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2013'te Ankara Dr. Şerafettin Tombuloğlu Anadolu Lisesi'nden mezun oldu ve aynı yıl içerisinde Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Lisans Programı'nda öğrenimine başlayıp, 2018 yılında lisans derecesini 3,04/4 ortalama ile tamamlayarak mezun oldu. 2018'de Karabük'te Karabük Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde teknik öğretmen olarak görev aldı. 2018-2019 yılları arasında Karabük Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Pedagojik Formasyon eğitimini tamamladı. Aralık 2020 yılında Ankara'da endüstriyel kazan, fan, filtre ve brülör imalatı yapan SELNİKEL ENERJİ ISI HAVA TEKNİKLERİ A.Ş. 'de çalışmaya başladı ve Proje Yönetim Şefi olarak hâlâ çalışmaya devam etmektedir. 2021 yılında Karabük Üniversitesi'nde başlamış olduğu yüksek lisans programını ise Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamlayarak 2024 yılında mezun oldu.