

**DİKDÖRTGEN KESİTLİ MİKROKANALLARDA
ZnO-ETİLEN GLİKOL NANOAKIŞKANININ AKIŞ
VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN
SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ**

**2016
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Cüneyt UYSAL

**DİKDÖRTGEN KESİTLİ MİKROKANALLARDA ZnO-ETİLEN GLİKOL
NANOAKIŞKANININ AKIŞ VE ISI TRANSFERİ
KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ**

Cüneyt UYSAL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Ağustos 2016

Cüneyt UYSAL tarafından hazırlanan “DİKDÖRTGEN KESİTLİ MİKROKANALLARDA ZnO-ETİLEN GLİKOL NANOAKIŞKANININ AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Kamil ARSLAN

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 29/ 08/ 2016

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin KURT (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Kamil ARSLAN (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Oğuz TURGUT (GÜ)



Üye : Doç. Dr. Yaşar YETİŞKEN (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Yusuf ÇAY (SAÜ)



...../...../2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri 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.”

Cüneyt UYSAL

ÖZET

Doktora Tezi

DİKDÖRTGEN KESİTLİ MİKROKANALLARDA ZnO-ETİLEN GLİKOL NANOAKIŞKANININ AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ

Cüneyt UYSAL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Kamil ARSLAN

Ağustos 2016, 120 sayfa

Bu çalışmada, farklı en-boy oranlarına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-Etilen glikol (EG) nanoakışkanının akış ve ısı transferi karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Akış için üç boyutlu, sürekli, sıkıştırılamaz, hidrodinamik olarak tam gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan, laminer akış şartları ($10 \leq Re \leq 100$) göz önüne alınmıştır. Mikrokanalların alt yüzeylerine 1000 W/m^2 'lik sabit ısı akısı uygulanmıştır. İlk olarak, ısı ve hidrodinamik olarak en iyi akış ve ısı transferi performansına sahip mikrokanal geometrisinin belirlenmesi amacıyla, öncelikle çalışma akışkanı olarak etilen glikol kullanılarak sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ANSYS Fluent 15.0 paket programı kullanılmıştır. ZnO-EG nanoakışkanının farklı nanopartikül hacimsel oranlarında akış ve ısı transferi karakteristikleri sunulmuştur. ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal içerisindeki akışı tek fazlı ve çift fazlı akış modelleri

kullanılarak ayrı ayrı modellenmiştir. Tek fazlı ve çift fazlı modellerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanalın ısı ve hidrodinamik olarak çalışmada kullanılan diğer mikrokanallara kıyasla daha üstün performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Tek fazlı model sonuçlarına göre, ısı taşınım katsayısındaki maksimum iyileşme $Re = 10$ 'da % 19,33 olarak % 4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilmiştir. $Re = 100$ 'de, % 4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen basınç düşümü değeri etilen glikol için elde edilen değerden % 29,23 daha fazladır. Akışın birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değeri ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla artmaktadır. Çift fazlı model sonuçlarına göre ise, ısı taşınım katsayısındaki maksimum iyileşme $Re = 10$ 'da % 187,36 olarak % 4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilmiştir. Akışın basınç düşümü ise, tek fazlı modelin tersine, nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla azalmaktadır. $Re = 10$ 'da, % 4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen basınç düşümü değeri saf etilen glikol için elde edilen değerden % 3,98 daha düşüktür. Basınç düşümündeki bu azalmadan dolayı, nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın birim uzunluk başına toplam entropi üretimi de azalmaktadır. Çift fazlı akış modellemesinden elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel sonuçlar ile tek fazlı akış modellemesine kıyasla daha iyi bir uyum göstermiştir. ZnO-EG nanoakışkanının çift fazlı olarak modellenerek elde edilen ısı ve hidrodinamik performans parametreleri tek fazlı modellemeden elde edilen değerlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Mikrokanallar, nanoakışkanlar, laminer zorlanmış akış ve ısı transferi, tek ve çift fazlı akış, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, entropi üretimi.

Bilim Kodu : 914.1.065

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

COMPUTATIONAL MODELING OF FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF ZnO-ETHYLENE GLYCOL NANOFLUID THROUGH RECTANGULAR CROSS-SECTIONED MICROCHANNELS

Cüneyt UYSAL

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Kamil ARSLAN

August 2016, 120 pages

In this study, flow and heat transfer characteristics of ZnO-Ethylene glycol nanofluid for different nanoparticle volume fractions through rectangular microchannels having different aspect ratios are numerically investigated. Flow is considered under three-dimensional, steady, incompressible, hydrodynamically fully developed, thermally developing, laminar flow ($10 \leq Re \leq 100$) conditions. Fixed heat flux of 1000 W/m^2 is applied to bottom surface of microchannels. Firstly, computational study was realized by using ethylene glycol as working fluid to be able to determine the microchannel geometry having the best flow and heat transfer performance thermally and hydrodynamically. ANSYS Fluent 15.0 packaged software was used. The flow and heat transfer characteristics of ZnO-EG nanofluid for different nanoparticle volume fractions are presented. ZnO-EG nanofluid flow through microchannel is

separately modeled by using both single and two phase models. Results obtained for single and two phase model are compared. It is determined that the rectangular microchannel having aspect ratio of $\alpha = 1.0$ has thermally and hydrodynamically better performance compared to other microchannels used in the study. According to the results of single phase model, the maximum convective heat transfer enhancement is obtained to be 19.33% at $Re = 10$ for ZnO-EG nanofluid having nanoparticle volume fraction of 4.0%. At $Re = 100$, pressure drop value obtained for ZnO-EG nanofluid having nanoparticle volume fraction of 4.0% is 29.23% higher compared to that of ethylene glycol. Total entropy generation per unit length of flow increases with increase in nanoparticle volume fraction of ZnO-EG nanofluid. According to the results of two phase model, the maximum convective heat transfer enhancement is obtained to be 187.36% at $Re = 10$ for ZnO-EG nanofluid having nanoparticle volume fraction of 4.0%. Pressure drop of flow, contrary to single phase model, decreases with increase in nanoparticle volume fraction. At $Re = 10$, pressure drop value obtained for ZnO-EG nanofluid having nanoparticle volume fraction of 4.0% is 3.98 % lower than that of ethylene glycol. Resulting from this decrease in pressure drop, total entropy generation per unit length decreases with increase in nanoparticle volume fraction. The results obtained from two phase flow modeling are in good agreement with experimental results in literature compared to that of single phase flow modeling. It is seen that thermal and hydrodynamics performance parameters obtained by two phase modeling of ZnO-EG nanofluid are higher compared to values obtained by single phase modeling.

Key Word : Microchannels, nanofluids, laminar forced flow and heat transfer, single and two phase flow, computational fluid dynamics, entropy generation.

Science Code : 914.1.065

TEŞEKKÜR

Tez alıőması boyunca hiçbir yardımı esirgemeyen ve bu tezin ortaya çıkmasında en az benim kadar emeği bulunan danıőmanım Sayın Doç.Dr. Kamil ARSLAN'a,

Engin tecrübeleriyle çalıőmama ışık tutan, her türlü yardımı esirgemeyen ve yapıcı eleştirileriyle tez çalıőmamın daha iyi bir hal almasını sağlayan Sayın Prof.Dr. Hüseyin KURT'a ve Sayın Doç.Dr. Oğuz TURGUT'a,

Yardım ve desteklerinden dolayı çalışma arkadaşlarım Arő.Öör. Fatih PEHLİVAN, Arő.Öör. Kerim G. AKTAŐ ve Arő.Öör. M. Erdi KORKMAZ'a,

Her konuda maddi ve manevi destek veren sevgili aileme teőekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	4
MİKROKANALLAR	4
2.1. AKIŞIN KNUDSEN SAYISINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI	5
BÖLÜM 3.	9
NANOAKIŞKANLAR	9
3.1. NANOPARTİKÜL VE TEMEL AKIŞKAN MADDELERİ	10
3.2. NANOPARTİKÜL ÜRETİMİ	11
3.3. NANOAKIŞKANIN HAZIRLANMASI	11
BÖLÜM 4.	13
LİTERATÜR TARAMASI	13
4.1. MİKROKANALLAR İÇİN YAPILAN MEVCUT ÇALIŞMALAR	13
4.2. NANOAKIŞKANLAR İÇİN YAPILAN MEVCUT ÇALIŞMALAR	18
4.2.1. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Mevcut Çalışmalar	18

4.2.2. Nanoakışkanların Akış Ve Isı Transferi Performanslarının İncelenmesi Üzerine Yapılan Mevcut Çalışmalar	20
4.3. NANOAKIŞKANLARIN MİKROKANALLARDA KULLANIMI ÜZERİNE YAPILAN MEVCUT ÇALIŞMALAR	22
BÖLÜM 5.	26
MATERYAL VE YÖNTEM	26
5.1. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ.....	26
5.2. BOYUTSUZ PARAMETRELER.....	29
5.3. SAYISAL ÇALIŞMA MODELİNİN OLUŞTURULMASI.....	31
5.4. AKIŞIN MATEMATİKSEL MODELİNİN OLUŞTURULMASI	32
5.4.1. Akışın Tek Fazlı Modellenmesi	32
5.4.1.1. Tek Fazlı Akış Modellemesinde Korunum Denklemleri.....	33
5.4.1.2. Başlangıç Ve Sınır Koşulları	34
5.4.1.3. ZnO-EG Nanoakışkanının Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	36
5.4.1.4. Tek Fazlı Akış İçin Sayısal Modelin Oluşturulması.....	37
5.4.2. Çift Fazlı Akış Modellemesi.....	41
5.4.2.1. Çift Fazlı Akış Modellemesinde Korunum Denklemleri.....	41
5.4.2.2. Başlangıç Ve Sınır Koşulları	47
5.4.2.3. Etilen Glikol Ve ZnO Nanopartikülünün Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	48
5.4.2.4. Çift Fazlı Akış İçin Sayısal Modelin Oluşturulması.....	50
BÖLÜM 6.	52
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	52
6.1. MİKROKANAL EN-BOY ORANININ AKIŞIN ISIL VE HİDRODİNAMİK PERFORMANSINA ETKİSİ.....	52
6.1.1. Hız Ve Sıcaklık Dağılımları	52
6.1.2. Isı Taşınım Katsayısı	60
6.1.3. Nusselt Sayısı	62
6.1.4. Basınç Düşümü.....	63
6.1.5. Darcy Sürtünme Faktörü	64
6.1.6. Isıl Direnç Ve Pompalama Gücü	66

	<u>Sayfa</u>
6.1.7. Entropi Üretimi Değerleri.....	68
6.2. MİKROKANALDA ZnO-EG NANOAKIŞKAN AKIŞININ TEK FAZLI OLARAK MODELLENMESİ.....	73
6.2.1. Hız Ve Sıcaklık Dağılımları	74
6.2.2. Isı Taşınım Katsayısı	80
6.2.3. Nusselt Sayısı	83
6.2.4. Basınç Düşümü.....	85
6.2.5. Darcy Sürtünme Faktörü	86
6.2.6. Isıl Direnç Ve Pompalama Gücü	87
6.2.7. Entropi Üretimi.....	88
6.3. MİKROKANALDA ZnO-EG NANOAKIŞKAN AKIŞININ ÇİFT FAZLI OLARAK MODELLENMESİ.....	92
6.3.1. Hız Ve Sıcaklık Dağılımları	93
6.3.2. Isı Taşınım Katsayısı	98
6.3.3. Nusselt Sayısı	99
6.3.4. Basınç Düşümü.....	100
6.3.5. Darcy Sürtünme Faktörü	101
6.3.6. Isıl Direnç Ve Pompalama Gücü	101
6.3.7. Entropi Üretimi.....	102
6.4. TEK VE ÇİFT FAZLI AKIŞ MODELLEMELERİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	106
BÖLÜM 7.	111
SONUÇ VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	114
ÖZGEÇMİŞ	120

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 5.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğindeki genel düzenleme	28
Şekil 5.2. Mikrokanal geometrisinin şematik gösterimi	31
Şekil 5.3. Sayısal uygulama için örnek hücre dağılımı.....	38
Şekil 5.4. Mevcut sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların literatürden alınan deneysel sonuçlar ile kıyaslanması	40
Şekil 5.5. $\phi_{np} = \%0$ için mevcut sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlar ile kıyaslanması.....	50
Şekil 5.6. $\phi_{np} = \% 1,734$ için mevcut sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlar ile kıyaslanması.....	51
Şekil 6.1. Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanalların çıkış kesitlerindeki hız dağılımları	53
Şekil 6.2. Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanalların giriş bölgelerinin yan kesitlerindeki hız dağılımları	54
Şekil 6.3. Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanalların çıkış kesitlerindeki sıcaklık dağılımları	55
Şekil 6.4. Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanalların çıkış bölgelerinin yan kesitlerindeki sıcaklık dağılımları	56
Şekil 6.5. Boyutsuz sıcaklığın mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu ile değişimi	58
Şekil 6.6. Yerel ısı taşınım katsayısının mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu ile değişimi	60
Şekil 6.7. Ortalama ısı taşınım katsayısının mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.....	61
Şekil 6.8. Ortalama Nusselt sayısının mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.....	62
Şekil 6.9. Basınç düşümünün mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.....	63
Şekil 6.10. Yerel Darcy sürtünme faktörünün mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu ile değişimi	65
Şekil 6.11. Ortalama Darcy sürtünme faktörünün mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.....	66
Şekil 6.12. Mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak pompalama gücüne karşılık gelen ısı direnç değerleri.....	67

Şekil 6.13. Isı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	69
Şekil 6.14. Akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	70
Şekil 6.15. Birim uzunluk başına toplam entropi üretiminin mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	71
Şekil 6.16. Bejan sayısının mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	73
Şekil 6.17. Tek fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış kesitindeki hız dağılımları	74
Şekil 6.18. Tek fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal giriş bölgesinin yan kesitindeki hız dağılımları	75
Şekil 6.19. Tek fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımları	76
Şekil 6.20. Tek fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış bölgesinin yan kesitindeki sıcaklık dağılımları	77
Şekil 6.21. Tek fazlı akış modellemesi için boyutsuz sıcaklığın ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu ile değişimi	79
Şekil 6.22. Tek fazlı akış modellemesi için yerel ısı taşınım katsayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu ile değişimi	81
Şekil 6.23. Tek fazlı akış modellemesi için ortalama ısı taşınım katsayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	82
Şekil 6.24. Tek fazlı akış modellemesi için ortalama Nusselt sayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	84
Şekil 6.25. Tek fazlı akış modellemesi için basınç düşümünün ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	85
Şekil 6.26. Tek fazlı akış modellemesi için ortalama Darcy sürtünme faktörünün ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	86
Şekil 6.27. Tek fazlı akış modellemesi için ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak pompalama gücüne karşılık gelen ısı direnç değerleri	87

Şekil 6.28. Tek fazlı akış modellemesi için ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	88
Şekil 6.29. Tek fazlı akış modellemesi için akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	90
Şekil 6.30. Tek fazlı akış modellemesi için birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	91
Şekil 6.31. Tek fazlı akış modellemesi için Bejan sayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	92
Şekil 6.32. Çift fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış kesitindeki hız dağılımları	94
Şekil 6.33. Çift fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal giriş bölgesinin yan kesitindeki hız dağılımları	95
Şekil 6.34. Çift fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımları	96
Şekil 6.35. Çift fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış bölgesinin yan kesitindeki sıcaklık dağılımları	97
Şekil 6.36. Çift fazlı akış modellemesi için ortalama ısı taşınım katsayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	98
Şekil 6.37. Çift fazlı akış modellemesi için ortalama Nusselt sayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	99
Şekil 6.38. Çift fazlı akış modellemesi için basınç düşümünün ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	100
Şekil 6.39. Çift fazlı akış modellemesi için ortalama Darcy sürtünme faktörünün ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	101
Şekil 6.40. Çift fazlı akış modellemesi için ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak pompalama gücüne karşılık gelen ısı direnç değerleri	102

Şekil 6.41. Çift fazlı akış modellemesi için ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	103
Şekil 6.42. Çift fazlı akış modellemesi için akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	104
Şekil 6.43. Çift fazlı akış modellemesi için birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	105
Şekil 6.44. Çift fazlı akış modellemesi için Bejan sayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi	106
Şekil 6.45. Tek ve çift fazlı akış modellemelerinden elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değerlerinin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimlerinin kıyaslanması	107
Şekil 6.46. Tek ve çift fazlı akış modellemelerinden elde edilen basınç düşümü değerlerinin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimlerinin kıyaslanması	108
Şekil 6.47. Tek ve çift fazlı akış modellemelerinden elde edilen birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerlerinin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimlerinin kıyaslanması	109

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Kanalların hidrolik çaplarına göre sınıflandırılması	5
Çizelge 2.2. Knudsen sayısına göre akışın sınıflandırılması	7
Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan mikrokanalların geometrik ölçüleri.....	32
Çizelge 5.2. Etilen glikol ve ZnO nanopartikülünün termofiziksel özellikleri.....	36
Çizelge 5.3. Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının termofiziksel özellikleri	37
Çizelge 5.4. $\alpha = 1,0$ 'lik mikrokanal için hücre sayısına bağlı ortalama Nusselt sayısı ve ortalama Darcy sürtünme faktörü değerleri	39
Çizelge 5.5. Farklı en-boy oranına sahip mikrokanallar için çalışmada kullanılan hücre sayıları	39
Çizelge 6.1. ZnO nanopartikülü ilavesi ile ısı iletim katsayısı ve ısı taşınım katsayısında meydana gelen yüzdesel değişimler.....	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A	: alan (m^2)
Ag	: gümüş
Al_2O_3	: alüminyum oksit
AlN	: alüminyum nitrür
Au	: altın
Be	: Bejan sayısı
c	: ses hızı (m/s)
C_D	: sürüklenme katsayısı
C_P	: sabit basınçtaki özgül ısı (J/kgK)
Cu	: bakır
CuO	: bakır oksit
d_{np}	: partikül çapı (m)
D_h	: hidrolik çap (m)
e_{pp}	: düzeltme katsayısı
F	: kuvvet (N)
f_{ort}	: ortalama Darcy sürtünme faktörü
f_x	: yerel Darcy sürtünme faktörü
G	: etkileşim modülü
$g_{0,pp}$: radyal dağılım katsayısı
H	: yükseklik (m)
h_{ort}	: ortalama ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_x	: yerel ısı taşınım katsayısı (W/m^2K)
k	: ısı iletim katsayısı (W/mK)
k_B	: Boltzman sabiti (J/K)
Kn	: Knudsen sayısı

L	: uzunluk (m)
m	: kütle (kg)
\dot{m}	: kütleli debi (kg/s)
Ma	: Mach sayısı
Nu_{ort}	: ortalama Nusselt sayısı
Nu_x	: yerel Nusselt sayısı
P	: basınç (Pa)
Pr	: Prandtl sayısı
\dot{Q}	: ısı miktarı (W)
\dot{q}''	: ısı akısı (W/m ²)
Re	: Reynolds sayısı
R_{th}	: ısı direnç (K/W)
$\dot{S}'_{\text{üretim}}$: birim uzunluk başına entropi üretimi (W/mK)
SiC	: silisyum karbür
SiN	: silisyum nitrür
SiO ₂	: silisyum oksit
T	: sıcaklık (°C)
TiC	: titanyum karbür
TiO ₂	: titanyum dioksit
u	: x-yönü hız bileşeni (m/s)
\vec{V}	: hız vektörü
v	: y-yönü hız bileşeni (m/s)
W	: genişlik (m)
\dot{W}_p	: pompalama gücü (W)
w	: z-yönü hız bileşeni (m/s)
ZnO	: çinko oksit
z_{th}	: ısı gelişme uzunluğu (m)

Yunan harfleriyle:

α	: en-boy oranı, ısı yayılım (m ² /s)
β	: katı-sıvı değişim katsayısı
γ	: özgül ısı oranı

- θ : boyutsuz sıcaklık
 Θ_p : granüler sıcaklık (K, °C)
 λ : moleküler ortalama serbest yol (m)
 μ : dinamik viskozite (kg/ms)
 ρ : yoğunluk (kg/m³)
 τ : kayma gerilmesi (N/m²)
 ν : kinematik viskozite (m²/s)
 φ : nanopartikül hacimsel oranı (%)

Alt indisler:

- nf : nanoakışkan
 bf : temel akışkan
 np : nanopartikül
 vm : sanal kütle
 d : sürüklenme
 col : çarpışma
 eff : etkin
 kin : kinetik
 max : maksimum
 th : ısı

KISALTMALAR

CNT	: karbon nanotüp
CTAB	: hegzadesiltrimetil amonyum bromit
CTAC	: setil trimetil amonyum klorid
EG	: etilen glikol
ENIAC	: Electronic Numerical Integrator and Computer
MEMS	: Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler
PC-SIMPLE	: Phase Coupled Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations
SDBS	: sodyum dodesil benzen sülfonat
SDS	: sodyum dodesil sülfat
SIMPLE	: Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Tarihte elektrik ile çalışan ve elektronik veri işleme kapasitesine sahip ilk bilgisayar olan ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) bilim adamları John Mauchly ve Presper Eckert tarafından 1947 yılında tamamlandı. 167 m²'lik bir alan kaplayan ENIAC, 17468 vakum tüp, 7200 kristal diyot, 1500 röle, 70000 rezistans, 10000 kapasitör içeriyordu. Cihazın toplam ağırlığı ise 30 tondur. Cihazın işletim hızı ise 100 kHz idi [1].

Nobel ödüllü fizikçi Richard Feynman 1959 yılında California Institute of Technology'de düzenlenen American Physical Society'nin yıllık toplantısında "*There's Plenty of Room at the Bottom-An Invitation to Enter a New Field of Physics*" başlıklı konuşmasında mikromakineler fikrini sundu [2].

1970'li yıllarda elektronik cihazların küçültülmeye başlanması ve üretim tekniklerinin geliştirilmesiyle mikro ve nano boyutlarda imalata geçilmesi, daha yaygın ve farklı alanlarda mikro ölçekli uygulamaların ortaya çıkmasına neden olarak mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) denilen küçük ölçekli düzenek ve sistemlerin incelendiği disiplinler arası yeni bir bilim dalının ortaya çıkmasına önderlik etmiştir.

Günümüzde mikro-elektro-mekanik sistemler bilişim, çevre, otomotiv, proses kontrolü, havacılık ve uzay, savunma sanayi, tıp ve biyomühendislik alanlarında geniş uygulama alanları bulmaktadır. Mikro-elektro-mekanik sistemlerin bazı önemli uygulamaları; (tıp alanında) DNA analizleri, mikro cerrahi aletler, işitme cihazları, akıllı haplar, biyoçipler, mikroçipler, mikropompalar; (savunma sanayi alanında) mikrouydular, akıllı giysiler, mikro güç kaynakları, çip laboratuvarı; (otomotiv alanında) hava yastıkları, taşıt güdüm teknolojileri, yağmur algılama sistemleri;

(bilifim alanında) optik esaslı bilgi depolama, mürekkep püskürtmeli yazıcılar, kamera sabitleme sistemleri, antenler, mikroaynalar olarak gösterilebilir.

Elektronik cihazların kllmesi beraberinde farklı problemler dolayısıyla farklı çalışma alanlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu problemlerden biri de kllen elektronik cihazlarda meydana gelen aşırı ısınma problemidir. Çünkü cihazların boyutları kat ve kat kllrken, işlem kapasiteleri ise arttırılmaktadır. Örneğin, 1995 yılında tasarlanmış bir silikon ip ENIAC ile aynı fonksiyonelliğe sahip olmasına rağmen boyutları 7,44 mm ile 5,29 mm'dir. Üstelik işletim hızı ise 20 MHz'dir [3]. Dolayısıyla daha küçük bir hacimde daha yoğun bir işlemin yapılmasına sebep olmaktadır. Bu durum da beraberinde modern elektronik cihazlar veya çipler tarafından üretilen ısı miktarının etkili bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Elektronik cihazların boyutlarındaki azalma bu cihazların soğutulmasında kullanılan cihazların da boyutlarının kllmesine neden olurken; cihazlardan üretilen ısı miktarlarının hava ve su gibi alışılagelmiş çalışma sıvıları ile giderilemeyecek seviyelere gelmesi de akışkan özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmaların gelişmesine neden olmuştur.

Boyutları kllmş elektronik cihazların soğutulmasında gerekli olan ekipmanların da kllmesi gerekmektedir. Bu bağlamda mikrokanallar ve mikro ısı değiştircileri imal edilmektedir. Cihazların soğutulmasında kullanılan kanallar veya ısı değiştircilerinin soğutma performansını etkileyen en önemli olgular: (i) kanalın ısı transfer yüzey alanının kanal hacmine oranı ve (ii) kullanılan akışkanın termofiziksel özellikleridir. Geliştirilen mikrokanallar hidroluk çaplarının küçük olmalarından dolayı makro boyutlardaki kanallara kıyasla ısı transfer yüzey alanlarının kanal hacimlerine oranları daha büyüktür. Bundan dolayı daha yüksek ısı transfer katsayısı değerlerine sahiptirler. Isı transferi akışkanının termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi için ise akışkan içerisine ısı iletim katsayısı sıvınınkinden çok daha yüksek olan nano boyutlu katı partiküllerin ilave edilmesi yöntemi son zamanlarda kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu tür akışkanlara nanoakışkan adı verilmektedir.

Son yıllardaki yapılan çalışmalarda nanoakışkanların mikrokanallar içerisinde kullanılması detaylı olarak incelenerek performans değerleri belirlenmeye çalışılmaktadır. Bunun amacı boyutları küçültülmüş elektronik cihazlarında meydana gelen aşırı ısınma problemi çözmektir. Yapılan bu tür çalışmalar gelecekte mevcut elektronik cihazların boyutlarının daha da küçültülmesine ya da kapasitelerinin mevcut durumlarına kıyasla daha da artırılmasına olanak sağlayacaktır.

Bu çalışmada, elektronik cihazlarda ve çiplerde meydana gelen aşırı ısınma probleminin önlenmesi ve cihazların mevcut kapasitelerinin ve yoğunluklarının artırılabilmesi için mikrokanallardaki ısı taşınımının artırılması amacıyla, mikrokanalların en-boy oranı gibi geometrik düzenlemenin mikrokanaldaki akış ve ısı taşınımı olgularına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca, çalışma akışkanı olarak farklı nanopartikül hacimsel oranlarında ZnO-EG nanoakışkanı kullanılarak mikrokanaldaki akış ve ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

MİKROKANALLAR

Isı ve kütle transferi olguları ile ısı değiştiricileri, ısıtma soğutma ve iklimlendirme sistemleri, termik santraller gibi birçok endüstriyel uygulamalarda ve akciğerler, böbrekler ve kan damarları gibi birçok doğadaki mevcut süreçlerde karşılaşılmaktadır. Hem endüstriyel hem de doğadaki mevcut süreçlerde karşılaşılan bu olgular aynı fiziksel prensiplere dayanmaktadırlar.

Bir kanalda iki önemli olgunun gerçekleşmesi beklenmektedir. Bunlar, (i) kanal içerisindeki akışkanın kanal cidarları ile iyi bir şekilde temas halinde olmasının sağlanması ve (ii) transport işleminin gerçekleşmesi için kanal cidarlarındaki akışkanın uzaklaştırılarak cidarlarla temasa geçmemiş yeni akışkanın cidarlarla temasının gerçekleştirilmesidir [4]. Transport süreci kanalın yüzey alanı ile ilişkili bir durum iken, akışkan kanal boyunca akışı kanalın kesit alanı ile ilişkilidir. Bu durum ısı değiştiricilerinde kompaktlık olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompaktlık; ısı transfer yüzey alanının ısı transferi hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır. Dairesel kesitli bir boruda ısı transfer yüzey alanının ısı transfer hacmine oranı borunun çapı ile ters orantılıdır. Kanalın hidrolik çapı azaldıkça kanalın kompaktlığı artmaktadır. Kandlikar and Grande [5]'ye göre kanallar hidrolik çaplarına göre Çizelge 2.1'deki gibi sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 2.1'e göre hidrolik çapları 10 µm ile 200 µm arasında olan kanallar mikrokannallar olarak sınıflandırılmaktadır. Bu aralıkta hidrolik çapa sahip kanallara endüstriyel olarak elektronik cihazların soğutulmasında karşılaşılmaktadır. Yine insan vücudunda da akciğerlerde, böbreklerde ve ana ve kılcal damarlarda bu aralıktaki kanallara rastlanılmaktadır. Örneğin, akciğer ve böbreklerin içerisindeki kanalların hidrolik çapları 4 µm civarındadır [4].

Çizelge 2.1. Kanalların hidrolik çaplarına göre sınıflandırılması [5].

Kanal Türü	Hidrolik Çap Aralığı
Alışlagelmiş kanallar	$D_h > 3 \text{ mm}$
Minikanallar	$3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \mu\text{m}$
Mikrokanallar	$200 \mu\text{m} \geq D_h > 10 \mu\text{m}$
Geçiş mikrokanalları	$10 \mu\text{m} \geq D_h > 1 \mu\text{m}$
Geçiş nanokanalları	$1 \mu\text{m} \geq D_h > 0,1 \mu\text{m}$
Nanokanallar	$0,1 \mu\text{m} \geq D_h$

Kanal boyutlarının küçülmesiyle birlikte, kanallarda kullanılan akış, enerji ve kütle transfer denklemlerinin yeniden irdelenmesi gerekmektedir. Çünkü kanal boyutlarının küçülmesiyle bazı parametreler geçerliliğini kaybederken bazı parametrelerin ise dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle akış Knudsen sayısına göre dört gruba ayrılmaktadır. Knudsen sayısına göre ilgili denklemler ve kabuller belirlenmelidir.

2.1. AKIŞIN KNUDSEN SAYISINA GÖRE SINIFLANDIRILMASI

Knudsen sayısı bir akış durumunun modellenmesinde akışkanlar dinamiğinin istatistiksel mekanik denklemlerinin mi yoksa sürekli ortam mekaniği denklemlerinin mi kullanılacağına karar vermede yardımcı olan boyutsuz bir sayıdır. Knudsen sayısı fiziksel olarak, moleküler ortalama serbest yolun karakteristik uzunluğa oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (2.1)$$

Burada λ moleküler ortalama serbest yolu, L ise temsili fiziksel uzunluk ölçeğini ifade etmektedir.

Gazlar için Maxwell-Boltzmann dağılımı kullanıldığında moleküler ortalama serbest yol,

$$\lambda = \frac{\mu}{\rho} \sqrt{\frac{\pi m}{2k_B T}} \quad (2.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Knudsen sayısı ise,

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{\mu}{\rho L} \sqrt{\frac{\pi m}{2k_B T}} \quad (2.3)$$

halini almaktadır. Burada; μ dinamik viskoziteyi, ρ yoğunluğu, k_B Boltzmann sabitini, m moleküler kütleyi, T ise mutlak sıcaklığı ifade etmektedir. Denklem 2.3 düzenlenirse Reynolds sayısı ve Mach sayısı cinsinden,

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{Ma}{Re} \sqrt{\frac{\gamma \pi}{2}} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada γ özgül ısı oranını ifade etmektedir. Re ve Ma ise sırasıyla Reynolds sayısını ve Mach sayısını temsil etmektedir.

Reynolds sayısı fiziksel olarak atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (2.5)$$

Mach sayısı ise akış hızının yerel ses hızına oranı olarak tanımlanmakta ve

$$Ma = \frac{U}{c} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada U akış hızını, c ise yerel ses hızını ifade etmektedir. Yerel ses hızı ise,

$$c = \sqrt{\frac{\gamma k_B T}{m}} \quad (2.7)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

Hesaplanan Knudsen sayısına göre akış sınıflandırması Çizelge 2.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Knudsen sayısına göre akışın sınıflandırılması [4].

Akış Türü	Knudsen Sayısı Aralığı
Sürekli Ortam Akışı	$Kn < 0,001$
Kaymalı Akış	$0,001 < Kn < 0,1$
Geçiş Akışı	$0,1 < Kn < 10$
Serbest Moleküler Akışı	$10 < Kn$

- Sürekli Ortam Akışı: Knudsen sayısı değeri 0,001’den daha küçük olan akışlar sürekli ortam akışı olarak tanımlanmaktadır. Bu akışta sürekli ortam kabulü geçerlidir. Akış, kaymama sınır koşulu kullanılarak Navier-Stokes denklemleri ile doğru bir şekilde modellenebilmektedir.
- Kaymalı Akış: Knudsen sayısı değeri 0,001 ile 0,1 aralığında olan akış kaymalı akış olarak tanımlanmaktadır. Knudsen sayısının bu aralığında cidarlarda hız kaymaları meydana gelmektedir. Bundan dolayı kaymama koşulu geçerliliğini kaybetmektedir. Bu akış türü sınır koşulu olarak cidarlardaki kayma hızları ve sıcaklık sıçramaları hesaba katılarak Navier-Stokes denklemleri ile doğru bir şekilde modellenebilmektedir.
- Geçiş Akışı: Knudsen sayısı değeri 0,1 ile 10 aralığında olan akış geçiş akışı olarak tanımlanmaktadır. Bu Knudsen sayısı aralığında sürekli ortam kabulü ve Navier-Stokes denklemi geçerliliğini kaybeder. Fakat, moleküller arası çarpışmalar ihmal edilebilir seviyede değildir. Bundan dolayı, dikkate alınmaları gerekmektedir.
- Serbest Moleküler Akış: Knudsen sayısı değeri 10’dan büyük olan akışlar serbest moleküler akış olarak tanımlanmaktadır. Bu akış türünde, moleküller

arası çarpışmaların oluşumu gaz molekülleri ile kanal cidarları arasındaki çarpışmalara kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir.



BÖLÜM 3

NANOAKIŞKANLAR

Alışlagelmiş (su, etilen glikol, motor yağı vs.) ısı transferi akışkanlarına metalik veya metalik olmayan nano boyutlardaki (100 nm' den daha küçük) katı partiküllerin ilave edilmesiyle oluşturulan karışımlara nanoakışkan adı verilir. Her ne kadar nanoakışkan terimi ilk olarak 1995 yılında Choi and Eastman [6] tarafından önerilmiş olsa da, katı partikül ilavesi ile sıvıların ısı iletim katsayılarının iyileştirilmesi fikri 1881 yılına Maxwell'e [7] kadar dayanmaktadır. Fakat akışkana ilave edilen mikropartiküllerin çökmesi, akışkanın kullanıldığı kanalların aşınması ve tıkanması, akışta meydana gelen yüksek miktardaki basınç düşümü gibi temel problemler mikropartikül ilave edilmiş akışkanların yaygın olarak kullanılmasının önüne geçmiştir. Gelişen teknoloji ile nano boyutlardaki partiküllerin sentezi mümkün kılınmıştır. Akışkana nanopartikül ilave edildiğinde daha küçük boyutlarda olmalarından dolayı karşılaşılan problemlerin büyük ölçüde önüne geçilmiştir.

Nanoteknoloji ile yapılandırılmış malzemeler normal boyutlardaki katı yığın özelliklerine kıyasla yeni veya iyileştirilmiş özellikler sergileyen atomik veya moleküler ölçekte tasarlanmış nano boyutları maddelerden yapılmaktadır. Bütün fiziksel mekanizmalar malzemelerin fiziksel özelliklerinin değiştiği kritik uzunluk ölçeğinin altında değerlere sahiptir. Bundan dolayı, 100 nm'den daha küçük partiküller bunların alışlagelmiş katı formlarından farklı özellikler sergilemektedir. Nano boyutlu malzemelerin mükemmel özellikleri partiküllerin görece yüksek yüzey alanı/hacim oranlarından dolayıdır ki bu durum tane sınırlarındaki yüksek orandaki atomlardan kaynaklanmaktadır.

3.1. NANOPARTİKÜL VE TEMEL AKIŞKAN MADDELERİ

Nanoakışkan esas olarak nanopartikül ve taşıyıcı temel akışkandan oluşmaktadır. Fakat nanoakışkanın kararlılığını arttırmak ve topaklanmayı ve dolayısıyla çökelmeyi engellemek amacıyla nanoakışkan içeriğine yüzey aktifleştiriciler de ilave edilmektedir.

Nanoakışkan hazırlanmasında temel akışkan olarak su, etilen glikol, propilen glikol, motor yağı, soğutucu akışkanlar gibi alışlagelmiş akışkanlar kullanılmaktadır.

Nanoakışkanlarda genel olarak kullanılan nanopartiküller ise Al_2O_3 ve CuO gibi oksit seramikleri, AlN ve SiN gibi nitrür seramikleri, SiC ve TiC gibi karbür seramikleri, Cu , Ag ve Au gibi metaller, TiO_2 ve SiC gibi yarıiletkenler, karbon nanotüpler ve $Al_{70}Cu_{30}$ alaşımlı nanopartiküller gibi kompozit malzemeleri kullanılmaktadır [8].

Akışkan içerisine ilave edilen nanopartiküllerin hidrofobik olmaları durumunda nanopartiküller akışkan ile temas eden yüzeylerini minimuma indirmek için ya kanal cidarlarına yapışma eğilimi ya da bir araya gelerek topaklanma eğilimi göstermektedir. Nanopartiküller arasındaki güçlü van der Waals kuvvetleri de topaklanmaya neden olmaktadır. Topaklanma sonucunda kümelenen nanopartiküller yığının kütlesini arttırmakta bu durum da çökelmeye neden olmaktadır. Çökelme ise nanopartiküllerin homojen dağılımına engel olarak akışkanın termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesine engel olmaktadır. Bu durumun karşısına geçmek için topaklanma olan durumlarda yüzey aktifleştiriciler kullanılmaktadır. Yüzey aktifleştiriciler nanopartiküllerin yüzeylerini aynı elektriksel yük ile yükleyerek bir araya gelmelerini engellemektedir. Nanoakışkanlarda kullanılan başlıca yüzey aktifleştiriciler sodyum dodesil sülfat (SDS), sodyum dodesil benzen sülfonat (SDBS), hegzadesiltrimetil amonyum bromit (CTAB), setil trimetil amonyum klorid (CTAC), akasya sakızı ve Nanospense AQ'dur [8].

3.2. NANOPARTİKÜL ÜRETİMİ

Nanopartiküllerin üretimi fiziksel işlem ve kimyasal işlem olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Fiziksel yöntemler kapsamında kullanılan metotlar esasen soy gaz yoğunlaştırma ve mekanik aşındırmadır. Kimyasal yöntemler ise kimyasal buhar çökeltme, kimyasal çökeltme, mikro emülsiyon, ısıl sprey ve sprey piroliz uygulamalarıdır. Nano boyutlu malzemeler yaygın olarak toz formunda üretilir ve nanoakışkan hazırlanmasında toz halinde sulu veya organik temel akışkanlara ilave edilirler.

3.3. NANOAKIŞKANIN HAZIRLANMASI

Nanoakışkanların hazırlanmasında iki ana yöntem kullanılmaktadır. Bunlar, tek aşamalı yöntem ve iki aşamalı yöntemdir. Tek aşamalı yöntemde nanopartiküller üretilirken eş zamanlı olarak da temel akışkanın içine dağıtılırlar. İki aşamalı yöntem de ise daha önceden üretilmiş olan nanopartiküller, toz halinde temel akışkan içeriğine sonradan ilave edilirler. İki aşamalı yöntem tek aşamalı yöntemle kıyasla daha yaygın kullanılmaktadır. İki aşamalı yöntemde nanopartiküllerin temel akışkan içerisinde homojen dağılımını sağlamak, kararlılığını arttırmak ve çökmesini engellemek amacıyla toz halinde olan nanopartiküllerin temel akışkana ilave edilmesinden sonra nanoakışkan manyetik karıştırıcı ve ultrasonikasyon cihazları kullanılarak karıştırma işlemine tabi tutulur.

İki aşamalı yöntemde, toz halinde akışkana ilave edilen nanopartiküller aralarındaki güçlü van der Waals kuvvetlerinden dolayı topaklanmalar meydana gelir. Topaklanmalardan dolayı yığın haline gelen nanopartiküller akışkan içerisinde çökmeye başlar. Akışkan içerisinde homojen bir dağılım elde edilemediğinden de akışkanın ısı özelliklerinde herhangi bir değişiklik meydana gelmez. Akışkanın ısı özelliklerinin iyileştirilebilmesi nanopartiküllerin temel akışkan içeriğinde mümkün olduğunca homojen dağılmış olmaları ve topaklanmamaları gerekmektedir.

İki aşamalı yöntem oksit nanopartikülü içerikli nanoakışkanların hazırlanması için elverişli olsa da, metal nanopartikülü içerikli nanoakışkanların hazırlanmasında etkili

değildir. Yüksek ısı iletkenliğe sahip metal nanopartikülleri içeren nanoakışkanlar için, iki aşamalı yöntem yerine tek aşamalı yöntem daha tercih edilebilir [8]. Ayrıca, tek aşamalı yöntem iki aşamalı yöntemle kıyasla daha hızlı ve daha ucuzdur [9].



BÖLÜM 4

LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde mikrokanallar, nanoakışkanlar ve nanoakışkanların mikrokanallarda kullanımını üzerine literatürdeki mevcut çalışmalar incelenerek ayrı başlıklar altında özetlenmiştir.

4.1. MİKROKANALLAR İÇİN YAPILAN MEVCUT ÇALIŞMALAR

Mikrokanallar üzerine ilk çalışma 1981 yılında Tuckerman and Pease tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmada düzlemsel entegre edilmiş devrelerin yüksek performanslı su soğutma sistemi ile soğutulması deneysel olarak incelenmiştir. Düşük ısı direnç elde etmek için başlıca engelin ısı taşınım katsayısı olduğu ifade edilmiştir. Laminer akışta ısı taşınım katsayısının mikrokanal genişliği ile ters orantılı değiştiği ve ayrıca yüksek en-boy oranına sahip mikrokanallarda, yüzey alanı arttığı için, ısı direncin daha düşük olduğu belirtilmiştir [10].

Peng and Peterson farklı geometrik düzenlemelere sahip dikdörtgen kesitli mikrokanalda suyun akış ve ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Geometrik düzenlemelerin suyun akış ve ısı taşınım karakteristikleri üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Mikrokanalda laminer ısı transferinin kanal kesitinin en-boy oranına ve hidrolik çapın kanal merkezleri arasındaki mesafeye oranına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Türbülans akış direnci için elde edilen değerler klasik bağıntılardan elde edilen değerlerden çok daha küçüktür. Tam gelişmiş türbülanslı akışa geçiş normal makro boyutlardaki kanallardan çok daha küçük Reynolds sayılarında gerçekleşmektedir. Isı transferi ve basınç düşümü için ampirik korelasyonlar önerilmiştir [11].

Harms et al. dikdörtgen kesitli mikrokanalda su akışının zorlanmış ısı taşınım karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel olarak elde edilen Nusselt sayısı klasik gelişmekte olan akış teorisi ile iyi uyum göstermiştir. Çalışmada gelişmekte olan laminer akış koşulu için geliştirilen çoklu mikrokanal sistemi, akış ve ısı transferi açısından, tasarlanan tek kanallı sistemin türbülanslı akıştaki performansından daha yüksek performans göstermiştir [12].

Qu et al. ikizkenar yamuk kesitli silikon mikrokanalda su akışının ısı transferi karakteristiklerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasında büyük farklılıklar elde edilmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen Nusselt sayısı değerleri nümerik sonuçlardan elde edilen değerlerden çok daha küçük olduğu belirtilmiştir. Deneysel sonuçları yorumlamak için pürüzlülük-viskozite etkilerini de dikkate alan bir bağıntı önerilmiştir [13].

Qu et al. ikizkenar yamuk kesitli silikon mikrokanallarda suyun akış karakteristiklerini deneysel olarak inceleyerek, elde edilen sonuçları klasik laminer akış teorisi ile kıyaslamışlardır. Mikrokanallar içerisinde elde edilen basınç gradyanı ve akış sürtünmesi değerlerinin klasik laminer akış teorisinden elde edilenden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Mikrokanaldaki bu yüksek basınç gradyanı ve akış sürtünmesine mikrokanalın yüzey pürüzlülüğünün neden olabileceği düşünülmüş ve deneysel verileri yorumlamak için pürüzlülük-viskozite modeli geliştirilmiştir [14].

Judy et al., 15-150 μm aralığında hidrolik çaplara sahip dairesel ve kare kesitli mikrokanallarda çalışma akışkanı olarak su, metanol ve izopropanol kullanarak akışın sürtünme faktörü değerleri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçların Stokes akış teorisinden önemli bir sapma göstermediği ifade edilmiştir [15].

Zhao and Lu, mikrokanalda zorlanmış taşınımın ısı transferi karakteristiklerini analitik ve nümerik olarak incelemişlerdir. Modellemede gözenekli ortam modeli ve kanatçıklı yapı yaklaşımları kullanılmıştır. Kanalın en-boy oranının artmasıyla toplam Nusselt sayısı değerinin arttığı tespit edilmiştir. Efektif ısı iletim katsayısı oranının artmasıyla da Nusselt sayısının azaldığı ifade edilmiştir. Çalışmada

gözenekli ortam modeli kullanılarak optimum gözeneklilik değeri bulunmuştur. Ayrıca çalışma sonucunda, mikrokanalın ısı transfer sınır koşullarının Nusselt sayısı üzerinde çok küçük bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir [16].

Wu and Cheng, ikizkenar yamuk kesitli pürüzsüz silikon mikrokanallarda suyun laminer akışının sürtünme faktörünü deneysel olarak incelemiştir. Akışın sürtünme sabiti mikrokanal kesitinin en-boy oranından önemli derecede etkilendiği belirtilmiş ve deneysel verilere dayanarak mikrokanalda suyun tamamen gelişmiş laminer akışını en-boy oranı cinsinden ifade eden bir korelasyon önerilmiştir. Deneysel verilerden elde edilen veriler kaymama sınır koşulu altında sıkıştırılmaz tamamen gelişmiş laminer akış için mevcut analitik çözümlerle iyi bir uyum göstermiştir. Ayrıca, yapılan çalışmada $25,9 \mu m$ gibi çok küçük hidrolik çapa sahip pürüzsüz silikon mikrokanallarda bile suyun laminer akışı için Navier-Stokes denklemlerinin hala geçerli olduğu bulunmuştur. $103,4 \mu m - 291 \mu m$ gibi daha büyük hidrolik çapa sahip pürüzsüz kanallarda ise, akışın laminerden türbülansa $Re = 1500-2000$ 'de geçtiği gözlemlenmiştir [17].

Wu and Cheng, ikizkenar yamuk kesitli mikrokanallarda laminer taşınımın ısı transferi ve basınç düşümünü deneysel olarak incelemiştir. Nusselt sayısı ve sürtünme sabitinin büyük ölçüde geometrik parametrelere bağlı olduğu ifade edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve yüzey hidrofilik özelliğinin artmasıyla laminer akış için Nusselt sayısı ve sürtünme sabiti artmıştır. Bu artış yüksek Reynolds sayılarında daha belirgin hale gelmiştir. $Re < 100$ olduğu durumlarda Nusselt sayısı Reynolds sayısı ile lineer olarak artarken, $Re > 100$ olan durumlarda ise bu artış yavaşlamıştır. Farklı geometrik parametreler, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey hidrofilik özelliklerine sahip ikizkenar mikrokanallarda su akışı için Nusselt sayısı ve sürtünme sabiti korelasyonları elde edilmiştir [18].

Lee et al., ısı olarak gelişmekte olan laminer akış koşullarında dikdörtgen kesitli mikrokanallarda alışlagelmiş boyutlardaki kanallar için kullanılan klasik korelasyonların geçerliliğini deneysel olarak incelemiştir. Belirli bir debi için mikrokanal boyutunun azalmasıyla ısı transfer katsayısının arttığı belirtilmiştir. Klasik korelasyonların kullanıldığı nümerik hesaplamalar deneysel sonuçlar ile iyi

bir uyum göstermiştir. Fakat, mikrokanalın giriş ve sınır koşullarında deneysel sonuçlar ve klasik korelasyonlar arasında uyumsuzluk gözlemlenmiştir [19].

Lee and Garimella, çevresel olarak üniform cidar sıcaklığı ve aksel olarak üniform ısı akışı uygulanan dikdörtgen kesitli mikrokanalların giriş bölgesinde laminer taşınım ile ısı transferini incelemiştir. Çalışma farklı en-boy oranlarına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda ısı olarak gelişmekte olan akış koşulu için gerçekleştirilmiştir. Boyutsuz aksel uzunluk ve en-boy oranının fonksiyonu cinsinden ortalama ve yerel Nusselt sayısı korelasyonları elde edilmiştir. Elde edilen korelasyonlar bilinen korelasyonlar ve mevcut deneysel veriler ile çok iyi uyum göstermiştir [20].

Zhuo et al., ikizkenar yamuk ve üçgen kesitli silikon mikrokanallarda suyun laminer akışı ve ısı transferini nümerik olarak incelemiştir. Çalışmada mikrokanalın geometrik parametrelerinin mikrokanaldaki akış ve ısı transferine etkisi incelenmiş ve alan sinerji prensibi (*field synergy principle*) kullanılarak Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi tartışılmıştır. $Re < 100$ durumlarında hız ve sıcaklık gradyanları arasında elde edilen sinerji $Re > 100$ durumlarındakine kıyasla çok daha iyidir. Düşük Reynolds sayılarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile neredeyse orantısız değiştiği, yüksek Reynolds sayılarında ise Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişim hızının azaldığı belirtilmiştir. Mikrokanallarda tamamen gelişmiş akışın Nusselt sayısının, sabit bir değer almak yerine, Reynolds sayısı ile arttığı ifade edilmiştir [21].

Chen et al. ikizkenar yamuk, dikdörtgen ve üçgen kesitli mikrokanallarda suyun akış ve ısı transferi karakteristiklerini nümerik olarak incelemiştir. Mikrokanalın giriş bölgesinde çok yüksek Nusselt sayısı elde edilmiştir, fakat mikrokanal boyunca hızlı bir şekilde tam gelişmiş sabit değerine yaklaşmaktadır. En yüksek ısı verimlilik üçgen kesitli mikrokanal için elde edilmiştir [22].

Hasan et al. dairesel, kare, dikdörtgen, eşkenar üçgen, ikizkenar yamuk kesitli kanal kesitleri kullanılarak oluşturulan ters akışlı mikrokanal ısı değiştiricilerinde kanalların boyut ve şekillerinin performansa etkisini nümerik olarak incelemiştir.

Mikrokanallı ısı değiştiricisinin hacmi sabit tutularak kanal sayısı arttırıldığında mikrokanallı ısı değiştiricisinin etkinliği ve basınç dūřümü artmıştır. En iyi toplam (ısıl ve hidrolik) performans dairesel kanal geometrisine sahip mikrokanallı ısı değiştiricisi için elde edilmiştir. Isı değiştirici etkinliği ve performans indeksini tahmin etmek için Reynolds sayısı, ısıl iletkenlik oranı ve toplam ısı değiştirici hacmine göre bağıl kanal boyutu cinsinden korelasyonlar geliştirilmiştir [23].

Wang et al. ihmal edilebilir eksenel ısı iletimi ve bir cidarı kısmi olarak ısıtılmış ve tamamen ısıtılmış koşullar altında ikizkenar yamuk kesitli bir mikrokanalda suyun laminer zorlanmış taşınımı deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Nümerik analizden elde edilen cidar sıcaklığı ve yerel Nusselt sayısı değerleri deneyselden elde edilen değerler ile iyi uyum göstermiştir. Ayrıca, 155 μm gibi çok küçük hidrolik çapa sahip mikrokanalda bile klasik Navier-Stokes denklemi ve enerji denkleminin hala geçerli olduğu ifade edilmiştir. Isıl gelişme uzunluğunun $z_{th} = 0,15 Re Pr D_h$ formülü ile uyumlu olduğu ve tamamen gelişmiş akışın Nusselt sayısının ise 4 sabit değerine yaklaştığı ifade edilmiştir [24].

Gunnasegaran et al. dikdörtgen, ikizkenar yamuk ve üçgen kesitli mikrokanallarda geometrik parametrelerin suyun akış ve ısı transferi karakteristiklerine etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Isı transferi katsayısı ve sıcaklıkta en iyi niformluk en küçük hidrolik çapa sahip mikrokanallarda elde edilmiştir. Ayrıca, basınç dūřümü ve sürtünme faktörü açısından en iyi performans en küçük hidrolik çapa sahip mikrokanalda elde edilmiştir [25].

McHale and Garimella 45° ve 54,7°'lik köşe açılarına sahip ikizkenar yamuk kesitli mikrokanallarda ısıl olarak gelişmekte olan akışı nümerik olarak incelemişlerdir. Köşe açısı veya en-boy oranının değişimi tamamen gelişmiş akışın Nusselt sayısını ve ısıl giriş uzunluğunu etkilemiştir. Tamamen gelişmiş akışın sürtünme faktörünü en-boy oranı cinsinden ve ısıl giriş bölgesindeki yerel ve ortalama Nusselt sayısını boyutsuz uzunluk cinsinden ifade eden korelasyonlar önerilmiştir [26].

Dharaiya and Kandlikar 0,1 ile 10 arası en-boy oranına sahip sırasıyla tek cidar, iki cidar,  cidar ve dört cidardan çevresel ve eksenel olarak sabit ısı akısı uygulanan

dikdörtgen kesitli mikrokanallarda ısıl olarak gelişmekte olan akışta giriş bölgesinin etkisini nümerik olarak incelemiştirlerdir. Giriş bölgesinin Nusselt sayısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, en-boy oranı cinsinden geliştirilmiş Nusselt korelasyonları önerilmiştir [27].

Alfaryjat et al. altıgen, daire ve eşkenar dörtgen kesite sahip mikrokanallar kullanarak mikrokanal geometrik parametrelerinin su akışı ve ısı transferi karakteristiklerine etkisini nümerik olarak incelemiştirlerdir. En yüksek ısı transfer katsayısı altıgen kesitli mikrokanalın en düşük çapı için elde edilmiştir. Daha sonra bunu dairesel ve eşkenar dörtgen kesitli mikrokanallar izlemiştir. En yüksek basınç düşümü ise sırasıyla altıgen, eşkenar dörtgen ve dairesel kesitli mikrokanallar için elde edilmiştir. En düşük sürtünme faktörü ve ısıl direnç sırasıyla eşkenar dörtgen, altıgen ve dairesel kesitli mikrokanallar için elde edilmiştir [28].

4.2. NANOAKIŞKANLAR İÇİN YAPILAN MEVCUT ÇALIŞMALAR

Nanoakışkanlar hakkında gerçekleştirilmiş mevcut çalışmalar (i) nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve (ii) nanoakışkanların akış ve ısı transferi performanslarının incelenmesi olmak üzere iki ayrı başlık altında incelenebilir.

4.2.1. Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Yapılan Mevcut Çalışmalar

Yu et al. ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanının ısı iletim katsayısı ve viskozite değerlerini deneysel olarak ölçmüşlerdir. %5,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanının ısı iletim katsayısı temel akışkana kıyasla %26,5 daha fazladır. Sıcaklığın artmasıyla ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanının ısı iletim katsayısı artmaktadır. Fakat, ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanının ısı iletim katsayısının temel akışkanının ısı iletim katsayısına oranı sıcaklık değişimlerinde neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmiştir. ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanının ısı iletim katsayısı değişimi topaklanma mekanizmalı Maxwell ve Bruggeman modelleri ile iyi uyum göstermiştir. Ayrıca, düşük nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanı Newtonian davranış gösterirken, daha yüksek

nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanında ise kayma incelenmesi davranışı gözlemlenmiştir [29].

Jeong et al. dikdörtgen ve küresel şekle sahip ZnO nanopartikülleri kullanarak ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanında nanopartikül geometrisinin nanoakışkanının ısı iletim katsayısı ve viskozitesi üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla nanoakışkanının viskozitesinin %69'a kadar arttığı tespit edilmiştir. Aynı şartlar altında, dikdörtgen şekle sahip nanopartikül kullanıldığında nanoakışkanın viskozitesi küresel şekle sahip nanopartikül içeren nanoakışkanınkine kıyasla %7,7 daha yüksektir. %5,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanının ısı iletim katsayısı temel akışkana kıyasla küresel nanopartikül kullanıldığında %12 dikdörtgen şekle sahip nanopartikül kullanıldığında ise %18 daha fazladır [30].

Halelfadl et al. laminer ve türbülanslı akış koşullarında yatay bir boru içerisinde CNT-Su nanoakışkanının reolojik davranışlarının akışın sürtünme faktörü ve basınç düşümü üzerine olan etkisini deneysel olarak incelemiştir. Düşük kayma gerilmelerinde CNT-Su nanoakışkanı kayma incelenmesi davranışı göstermiştir. Laminer akış koşullarında akış Newtoniyen olmayan karakteristik gösterirken, türbülanslı akışta Newtoniyen karakteristik göstermiştir [31].

Halelfadl et al. 20-40 °C aralığı ve % 0,0055 ile % 0,278 nanopartikül hacimsel oranlarında CNT-Su nanoakışkanının termofiziksel özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Nanoakışkanın yoğunluğu nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla artmıştır. Fakat sıcaklıktan etkilenmemiştir. Nanoakışkanın bağıl ısıl iletkenliği ise nanopartikül hacimsel oranı ve sıcaklığın artmasıyla artmaktadır [32].

Esfe and Saedodin sıcaklık ve nanopartikül hacimsel oranının ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanının viskozitesi üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanının dinamik viskozitesi nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla önemli miktarda artmıştır, fakat, sıcaklık değişiminden etkilenmemiştir. Elde edilen değerler ile Einstein modeli kıyaslandığında, Einstein modelinin sadece

düşük nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanları için sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir [33].

Esfe and Saedodin sıcaklık ve nanopartikül hacimsel oranının ZnO- Etilen Glikol nanoakışkanının ısı iletkenliği üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. ZnO- Etilen Glikol nanoakışkanının ısı iletim katsayısı nanopartikül hacimsel oranının artması ve sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Sıcaklığın ısı iletim katsayısı üzerine etkisi yüksek nanopartikül hacimsel oranlarında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [34].

Pastoriza-Gallego et al. 283,15 K ile 323,15 K sıcaklık ve 40 ile 1000 s⁻¹ şekil değiştirme oranı aralığında ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanının Newtonian davranış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, ısı iletim katsayısındaki maksimum iyileşme oranı 343,15 K'de %6,9 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanında %45 olarak elde edilmiştir [35].

4.2.2. Nanoakışkanların Akış Ve Isı Transferi Performanslarının İncelenmesi Üzerine Yapılan Mevcut Çalışmalar

İlbelgi yaptığı çalışmada, sabit cidar sıcaklığı ve sabit ısı akısı uygulanan bir boru içerisinde farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki Al₂O₃-Su nanoakışkanının laminer zorlanmış taşınımını deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, Al₂O₃-Su nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın ortalama ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir [36].

Suresh et al. düz ve çukurlu boruda CuO-Su nanoakışkanının taşınımına ısı transferi ve sürtünme faktörü karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Düz boruda $\phi = \% 0,1, 0,2$ ve $0,3$ nanopartikül hacimsel oranına sahip CuO-Su nanoakışkanı için Nusselt sayısında sırasıyla $\% 6,0, 9,9$ ve $12,6$ 'lık artış elde edilirken, çukurlu boruda sırasıyla $\% 3,4, 6,8$ ve 12 'lik bir artış elde edilmiştir. Ayrıca, nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla sürtünme faktörünün arttığı belirtilmiştir. Nanoakışkanın ısı

transferini iyileştirmesindeki etkili olan mekanizmanın nanopartiküllerin akış merkezinden boru cidarına doğru yaptıkları hareket olduğu ifade edilmiştir [37].

Ahmed et al. ikizkenar yamuk oluklu bir kanalda Cu-Su nanoakışkanının laminer zorlanmış taşınım ısı transferini nümerik olarak incelemiştir. Nanopartikül hacimsel oranının, Reynolds sayısının ve kanaldaki oluk büyüklüğünün artması ortalama Nusselt sayısı arttırmış, fakat aynı zamanda basınç düşümünü de arttırmıştır. Ayrıca, oluğun dalga uzunluğunun artmasıyla ortalama Nusselt sayısı azalmış ve basınç düşümü ise artmıştır [38].

Madhesh and Kalaiselvam silindir gövdeli ısı değiştiricide farklı nanopartikül hacimsel oranlarına ($\varphi = \% 0,1-2,0$) sahip Ag-Etilen Glikol nanoakışkanının akış ve ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Isı taşınım katsayısı $\%39,5$ ile $\%49$ arasında bir artış gösterirken, basınç düşümü ise $\%1,42$ ile $\%23,7$ arasında bir artış göstermiştir [39].

Suganthi et al. ZnO-Etilen Glikol ve ZnO-Etilen Glikol/Su nanoakışkanlarının ısı transferi ve taşıma özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. $\%4,0$ nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-Etilen Glikol nanoakışkanında 27°C sıcaklıkta temel akışkanına kıyasla ısı iletim katsayısında $\%33,4$ artış, viskozite de ise $\%39,2$ azalış elde edilmiştir. $\%2,0$ nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-Etilen Glikol/Su nanoakışkanında ise 27°C sıcaklıkta temel akışkanına kıyasla ısı iletim katsayısında $\%17,26$ artış, viskozite de ise $\%17,34$ azalış elde edilmiştir. Nanopartikül ilave edilmesiyle viskozitede meydana gelen düşüş etilen glikolün ZnO nanopartikülü yüzeyinde oluşturduğu hidrojen bağlarının dağılımından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, yapılan deneyler sonucunda kullanılan nanoakışkanların temel akışkanlarına kıyasla daha yüksek soğutma kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir [40].

Cabaleiro et al. $283,15\text{ K}$ ve 343 K aralığında $\%1,0$, $\%2,5$ ve $\%5,0$ nanopartikül kütle oranlarına sahip ZnO-Etilen Glikol/Su (50:50) nanoakışkanının viskozite ve ısı iletim katsayısını deneysel olarak ölçmüş ve $\%1,0$ nanopartikül kütle oranına sahip nanoakışkanın ısı transfer performansını incelemiştir. Çalışma sonucunda nanoakışkanının ısı iletim katsayısı ve viskozitesinin nanopartikül kütle oranının

artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. 80 ila 1200 s⁻¹ şekil değiştirme oranında ZnO-Etilen Glikol/Su nanoakışkanı Newtonian davranış göstermektedir. %5,0 nanopartikül kütle oranına sahip nanoakışkanın ısı iletim katsayısı temel akışkanınkine kıyasla %8,3 daha fazladır. Ayrıca, Etilen Glikol/Su (50:50) akışkanına kütle olarak %1,0 ZnO nanopartikül ilavesi akışkanın ısı transferi katsayısında herhangi bir iyileşmeye neden olmadığı ifade edilmiştir [41].

4.3. NANOAKIŞKANLARIN MİKROKANALLARDA KULLANIMI ÜZERİNE YAPILAN MEVCUT ÇALIŞMALAR

Tsai and Chein gözenekli ortam olarak modellenmiş dikdörtgen kesitli bir mikrokanalda Cu-Su ve CNT (karbon nanotüp)-Su nanoakışkanlarının mikrokanalın performansına etkisini analitik olarak incelemiştir. Nanoakışkan kullanımının mikrokanal cidar sıcaklığı ile nanoakışkanın yığın sıcaklığı arasındaki farkı düşürdüğü belirtilmiştir. Bu da ısı iletkenlik direncinin azalmasına neden olmaktadır. Fakat akışkana nanopartikül ilavesi akışkanın viskozitesini arttırması ve ısı kapasitesini düşürmesinden dolayı da ısı taşınım direnci artmaktadır. Verilen bir basınç düşümü için toplam ısı direnci minimuma indirecek optimum en-boy oranı ve gözeneklilik değeri bulunabilir. Optimum en-boy oranı ve gözeneklilik değerinden daha yüksek en-boy oranı ve gözeneklilik kullanıldığında, nanoakışkan kullanımının mikrokanalın toplam ısı direncinde önemli bir etki oluşturmadığı belirtilmiştir [42].

Jung et al. dikdörtgen kesitli mikrokanalda Al₂O₃-Su ve Al₂O₃-Su/Etilen Glikol nanoakışkanlarının taşınım ısı transferini ve sürtünme faktörü değerlerini deneysel olarak incelemiştir. Laminer akış koşullarında saf suya %1,8 Al₂O₃ nanopartikül ilavesi akışın sürtünme kayıplarını ihmal edilebilir seviyede etkilemesine rağmen, akışın ısı taşınım katsayısını %32 arttırmıştır. Laminer akış koşullarında Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile arttığı ifade edilmiştir [43].

Mohammed et al. dikdörtgen kesitli mikrokanalda Al₂O₃-Su nanoakışkanının farklı nanopartikül hacimsel oranları (ϕ =%1,0-5,0) için akış ve ısı transferi karakteristiklerini nümerik olarak incelemiştir. Nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla ısı transfer katsayısı ve cidar kayma gerilmesi artmış, ısı direnci ise

azalmıştır. Fakat $\phi = \%5,0$ nanopartikül hacimsel oranına sahip nanoakışkan için elde edilen ısı transfer katsayısı neredeyse saf suyun değerleri ile aynıdır. Bundan dolayı, taşınım ile ısı transferini iyileştirmek için optimum nanopartikül hacimsel oranlarının belirlenmesi ve kullanılması gerekmektedir. Basınç düşümü ise saf akışkana nanopartikül ilavesinden neredeyse etkilenmediği belirtilmiştir [44].

Chen and Ding gözenekli ortam olarak modellenmiş mikrokanaalda γ Al_2O_3 -Su nanoakışkanının ısı transferi karakteristikleri ve soğutma performansını nümerik olarak incelemiştir. Akışkan akışı Forchheimer-Brinkman-extended Darcy modeli ile ısı transferi ise ısı yayılımı da dikkate alan two-equation model kullanılmıştır. Akışkanın sıcaklık dağılımı ve toplam ısı direnci atalet kuvveti etkisi ile önemli derecede etkilenirken, mikrokanal cidar sıcaklığının dağılımı ise etkilenmemiştir. Atalet etkisini dikkate alan modelden elde edilen toplam ısı direnç değerleri mevcut deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum gösterirken, atalet kuvveti ihmal edildiğinde deneysel değerlerin çok üzerinde kalmıştır [45].

Mohammed et al. üçgen kesitli mikrokanaalda $\%2,0$ nanopartikül hacimsel oranı içeren su esaslı Al_2O_3 , Ag, CuO, elmas, SiO_2 ve TiO_2 nanoakışkanlarının akış ve ısı transferi karakteristiklerini nümerik olarak kıyaslamışlardır. En düşük sıcaklık ve en yüksek ısı transfer katsayısı Elmas-Su nanoakışkanı için elde edilirken, en yüksek sıcaklık ve en düşük ısı transfer katsayısı Al_2O_3 -Su nanoakışkanı için elde edilmiştir. Ayrıca en yüksek basınç düşümü ve cidar kayma gerilmesi SiO_2 -Su nanoakışkanı için elde edilirken, en düşük basınç düşümü ve cidar kayma gerilmesi Ag-Su nanoakışkanı için elde edilmiştir [46].

Lelea viskoz yayılım etkisini dikkate alarak laminar akış için farklı nanopartikül hacimsel oranı ($\phi = \%1,0-9,0$) ve farklı nanopartikül çapları ($d_p = 13, 28, 47$ nm) için Al_2O_3 -Su nanoakışkanının kare kesitli mikrokanaalda akış ve ısı transferi karakteristiklerini nümerik olarak incelemiştir. Nanopartikül çapının artmasıyla ısı transferi iyileşmesi azalmıştır [47].

Ijam et al. minikanalda laminer akış koşulları için Al_2O_3 -Su ve TiO_2 -Su nanoakışkanlarının taşınım ile ısı transferi performanslarını kıyaslamışlardır. Isı transferinde Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanıldığında %2,95 ile %17,32 arasında iyileşme gözlemlenirken, TiO_2 -Su nanoakışkanı kullanıldığında ise %1,88 ile %16,53 arasında bir iyileşme tespit edilmiştir [48].

Ijam and Saidur dikdörtgen kesitli minikanalda türbülanslı akış koşullarında SiC-Su ve TiO_2 -Su nanoakışkanlarının performanslarını nümerik olarak kıyaslamışlardır. 2 m/s akış hızı ve %4,0'lük nanopartikül hacimsel oranı için TiO_2 -Su nanoakışkanı için ısı akısında %7,63'lük bir iyileşme elde edilirken, aynı koşullarda SiC-Su kullanıldığında ise %7,25'lik bir iyileşme elde edilmiştir. Ayrıca, TiO_2 -Su nanoakışkanı için gerekli pompalama gücü aynı çalışma şartlarında SiC-Su nanoakışkanından daha fazladır [49].

Mital dairesel kesitli mikrokanalda Al_2O_3 -Su nanoakışkanının geliştirmekte olan laminer zorlanmış ısı taşınımını pompalama gücünü de dikkate alarak analitik olarak incelemiştir. Reynolds sayısı, nanopartikül hacimsel oranı ve nanopartikül boyutlarının ısı transferi oranına etkisi incelenmiş ve nanopartikül hacimsel oranının ısı transfer oranını etkileyen en önemli faktör olduğu ifade edilmiştir. Nanopartikül çapının mümkün olduğunca küçültülerek ısı transfer oranının maksimum değere getirilebileceği belirtilmiştir. Verilen bir Reynolds sayısında ısı transfer oranını maksimum yapmak için optimum nanopartikül hacimsel oranının elde edileceği ifade edilmiştir [50].

Salman et al. %0,5-%1,0 nanopartikül hacimsel oranlarında Al_2O_3 -Su ve SiO_2 -Su nanoakışkanlarının dairesel kesitli mikrokanal içerisinde zorlanmış laminer ısı taşınımını nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. En yüksek Nusselt sayısının sırasıyla SiO_2 -Su nanoakışkanı için elde edildiği ve bunu sırasıyla Al_2O_3 -Su nanoakışkanı ve saf suyun izlediği belirtilmiştir. Belirlenen çalışma koşullarında ısı transferinde elde edilen en yüksek iyileşmenin %22 olduğu ifade edilmiştir. Nümerik ve deneysel sonuçlar klasik ısı transferi teorisiyle iyi uyum göstermiştir [51].

Sivakumar et al. kıvrımlı mikrokanalda Al_2O_3 -Su ve CuO-Etilen Glikol nanoakışkanlarının zorlanmış taşınım ile ısı transferini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. CuO-Etilen Glikol nanoakışkan kullanıldığında elde edilen taşınım ısı transfer katsayısı Al_2O_3 -Su nanoakışkanı, saf su ve saf etilen glikol kullanıldığında elde edilen değerden çok daha yüksektir [52].

Literatür taraması sonucunda, ZnO-EG nanoakışkanının akış ve ısı transferi karakteristiklerinin detaylı olarak incelenmediği, özellikle elektronik soğutma amacıyla mikrokanallar içerisinde ZnO-EG nanoakışkanının akış ve ısı taşınım olguları hakkında çalışmaların sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, mikrokanalların en-boy oranlarının mikrokanaldaki akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerine etkisi incelenirken, mikrokanalın en-boy oranının değişmesi sonucunda hidrolik çapının da değişmesine müsaade edildiği görülmüştür. Farklı hidrolik çapa sahip mikrokanallarda, sabit Reynolds sayısı için yapılacak analizlerde, mikrokanalın akış ve ısı transferi performansını doğrudan etkileyen akış hızları da değişecektir. Dolayısıyla, mikrokanalın en-boy oranının akış ve ısı transferi üzerine etkisi doğru bir şekilde değerlendirilmemiş olacaktır.

Bu çalışmada, sabit hidrolik çaptaki farklı en-boy oranlarına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanının akış ve ısı transferi karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal modelleme de tek fazlı ve çift fazlı akış modelleri ayrı ayrı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. İlave olarak, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının akışın entropi üretimi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, farklı en-boy oranına ($\alpha = 1,0 - 2,0$) sahip altı adet dikdörtgen kesitli mikrokanalda farklı nanopartikül hacimsel oranlarında ($\varphi = 0,01 - 0,04$) ZnO-Etilen Glikol (EG) nanoakışkan akışının zorlanmış akış ve ısı transferi karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. ZnO-EG nanoakışkanı hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak tek ve çift fazlı akış koşulları için ayrı ayrı modellenmiştir.

5.1. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği akış, ısı transferi ve kimyasal reaksiyon gibi ilgili olguları içeren sistemlerin bilgisayar destekli simülasyon yardımıyla analizini ifade eden bir yöntemdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde, korunum denklemlerinin sayısal çözümü ile gerçek akış simülasyonlarının hızlı bir şekilde çözümlenmesini sağlar. Çözüm aşamasında kısmi diferansiyel denklem durumundaki korunum denklemleri cebirsel denklem sistemlerine dönüştürülerek çözülür [53].

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak analizi yapılan bir sistemde sistem üzerinde yapılacak olan farklı düzenlemelerin sistem performansı üzerindeki etkileri bilgisayar simülasyonu üzerinden hızlı ve ucuz bir şekilde incelenebilmektedir. Böyle bir durumda deneysel çalışma oldukça maliyetli ve yapılması zordur. Ayrıca, hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak deneysel çalışmada sistem üzerinden elde edilmesi çok zor ve maliyetli olan verilerin elde edilmesi daha pratiktir. Fakat, deneysel çalışma gerçek şartları temsil ettiği için elde edilen sonuçlar daha doğrudur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde de gerçek koşullarda etkili olan fiziksel etkiler hesaplamalarda dikkate alınarak gerçek şartlarda elde edilen sonuçlar elde edilebilir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde analizi yapılacak olan sistem sonlu hacimler yöntemi kullanılarak diferansiyel elemanlara ayrılarak ilgili denklemler bu diferansiyel hacim için yazılmaktadır. Bütün akış denklemlerinde korunum formu,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Akış} \\ \text{elemanında} \\ \phi' \text{ nin artışı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Akış} \\ \text{elemanından} \\ \phi' \text{ nin net çıkışı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Difüzyondan} \\ \text{dolayı} \\ \phi' \text{ nin artışı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Kaynaklardan} \\ \text{dolayı} \\ \phi' \text{ nin artışı} \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

şeklinde yazılmaktadır. Diferansiyel formda ise,

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S_\phi \quad (5.2)$$

olarak yazılmaktadır. Denklem 5.2 sonlu hacimler yönteminde sayısal prosedürün başlangıç noktasıdır. Sonlu hacimler yönteminde Denklem 5.2'nin üç boyutlu kontrol hacmi için integrasyonu,

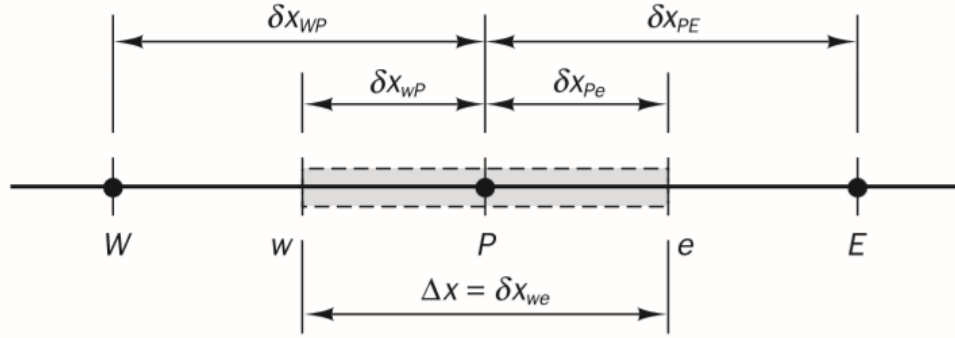
$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \text{div}(\rho\phi u) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (5.3)$$

olarak ifade edilmektedir.

Bir diferansiyel denklemin sayısal çözümlemesi herhangi bir bağımlı değişken olan ϕ 'ye bağımlı bir denklemler grubundan oluşmaktadır. Bunun için öncelikli olarak incelenen sistem ayrık kontrol hacimlerine bölünür. Belirli sayıda düğüm noktaları yerleştirilir. Belirlenen kontrol hacimlerinin yüzeyleri birbirine komşu düğüm noktalarının arasında orta noktada konumlandırılır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin genel düzenlemesi Şekil 5.1'de gösterilmektedir [53].

Burada genel bir düğüm noktası P ile gösterilir ve bir boyutlu geometride düğüm noktasının doğusundaki ve batısındaki komşu düğüm noktaları sırasıyla E ve W ile gösterilmektedir. Kontrol hacminin doğu ve batısındaki yüzeyleri ise sırasıyla e ve w ile gösterilmektedir. W ve P düğüm noktaları arasındaki mesafe δx_{WP} ile

gösterilirken, P ve E düğüm noktaları arasındaki mesafe ise δx_{PE} ile gösterilmektedir. Benzer şekilde kontrol hacminin w yüzeyi ile kontrol hacminin düğüm noktası arasındaki mesafe δx_{wP} ile, e yüzeyi ile kontrol hacminin düğüm noktası arasındaki mesafe ise δx_{Pe} ile gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğindeki genel düzenleme [53].

Sonlu hacimler yönteminde belirlenen kontrol hacmi için ilgili korunum denklemleri yazılmaktadır. Yukarıda P düğüm noktası ile gösterilen kontrol hacmi için,

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) dV + \int_{\Delta V} S dV = \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (5.4)$$

korunum denklemi yazılmaktadır. Burada Γ difüzyon katsayısı, S kaynak terim, A ise kontrol hacmi yüzeyinin kesit alanıdır. Burada, difüzyon terimleri,

$$\left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e = \Gamma_e A_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right) \quad (5.5)$$

$$\left(\Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w = \Gamma_w A_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) \quad (5.6)$$

olarak değerlendirilmektedir. Kaynak terim bağımlı değişkenin bir fonksiyonu olabilir. Böyle durumlarda, sonlu hacimler metodunda kaynak terime lineer formda yaklaşılır ve

$$\bar{S}AV = S_u + S_p \phi_p \quad (5.7)$$

olarak ifade edilir. Denklemlerde yapılan düzenlemelerden sonra terimler genel denklemde yerine konulduğunda,

$$\Gamma_e A_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right) - \Gamma_w A_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) + (S_u + S_p \phi_p) = 0 \quad (5.8)$$

ifadesi elde edilir. Elde edilen bu ifade tekrardan düzenlenirse,

$$\left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e + \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w - S_p \right) \phi_p = \left(\frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w \right) \phi_w + \left(\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e \right) \phi_E + S_u \quad (5.9)$$

halini alır. Katsayılar kullanılarak

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_E \phi_E + S_u \quad (5.10)$$

şeklinde lineer form halinde ifade edilmektedir. Bu şekilde diferansiyel denklem lineer denklem haline dönüştürülmüş olur.

Sistem üzerinde belirlenen her bir düğüm noktası için korunum denklemleri yazılır. Yazılan diferansiyel denklemlerin her biri yukarıdaki gibi lineer denklem formuna dönüştürülür. Elde edilen denklemler matris sistemi oluşturularak çözülmektedir.

5.2. BOYUTSUZ PARAMETRELER

Isı transferi uygulamalarında kullanılan en önemli boyutsuz parametrelerden biri Nusselt sayısıdır. Nusselt sayısı ısı taşınımının ısı iletimine oranı olarak tanımlanmaktadır ve ortalama Nusselt sayısı,

$$Nu_{ort} = \frac{I}{A} \int_A Nu_x dA \quad (5.11)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada Nu_x yerel Nusselt sayısını ifade etmektedir,

$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k} \quad (5.12)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada h_x yerel ısı taşınım katsayısıdır. Yerel ısı taşınım katsayısı,

$$h_x = \frac{q''}{T_{\text{cidar},x} - T_{\text{akışkan},x}} \quad (5.13)$$

olarak yazılabilir. Burada $T_{\text{cidar},x}$ ve $T_{\text{akışkan},x}$ sırasıyla yerel cidar sıcaklığını ve akışkanın yerel sıcaklıklarını ifade etmektedirler. Ortalama ısı taşınım katsayısı ise,

$$h_{\text{ort}} = \frac{1}{A} \int_A h_x dA \quad (5.14)$$

olarak ifade edilmektedir.

Akış sürtünmesini ifade eden yerel ve ortalama Darcy sürtünme faktörü ise sırasıyla,

$$f_x = \frac{8\tau_x}{\rho U^2} \quad (5.15)$$

$$f_{\text{ort}} = \frac{1}{A} \int_A f_x dA \quad (5.16)$$

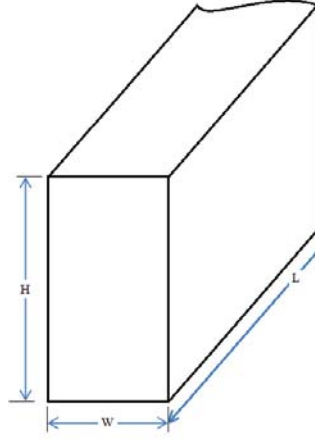
olarak ifade edilmektedirler. Burada τ_x akışın cidarlardaki yerel kayma gerilmesidir. Yapılan bu çalışmada, yerel değerlerin mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğuna göre değişimleri gösterilmiştir. Mikrokanalın boyutsuz eksenel boyutsuz uzunluğu,

$$X = \frac{x}{D_h} \quad (5.17)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır.

5.3. SAYISAL ÇALIŞMA MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Yapılan analizlerde farklı en-boy oranına ($\alpha = 1,0 - 2,0$) sahip dikdörtgen kesitli mikrokanaallar kullanılmıştır. Mikrokanal geometrisi Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2. Mikrokanal geometrisinin şematik gösterimi.

Mikrokanalların hidrolik çapları ve uzunlukları sırasıyla $150 \mu m$ ve $5 mm$ olarak belirlenmiştir. Mikrokanalların yükseklik ve genişlik değerleri ise belirlenen en-boy oranı doğrultusunda,

$$D_h = \frac{4 A_{kesit}}{P} = \frac{2HW}{(H+W)} \quad (5.18)$$

şeklinde tanımlanan hidrolik çap denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 5.18’den elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1’de sunulmaktadır.

Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan mikrokanalların geometrik ölçüleri.

$\alpha(H/W)$	$D_h(\mu m)$	$H(\mu m)$	$W(\mu m)$	$L(mm)$
1,0	150	150	150	50
1,2	150	165	137,5	50
1,4	150	180	128,57	50
1,6	150	195	121,875	50
1,8	150	210	116,67	50
2,0	150	225	112,5	50

5.4. AKIŞIN MATEMATİKSEL MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Akışın matematiksel olarak modellenmesi için Knudsen sayısının hesaplanması gerekmektedir. Etilen glikolün moleküler ortalama serbest yolu (λ) 0,26 nm'dir [54]. Karakteristik uzunluk olarak mikrokanalın hidrolik çapı dikkate alınmıştır. Denklem 2.1 kullanıldığında mikrokanal içerisinde etilen glikol akışının Knudsen sayısı 1.73×10^{-6} olarak elde edilmiştir. Bu durumda akış sürekli ortam akışı tanımına uymakta ve akışın modellenmesinde korunum denklemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, ZnO-EG nanoakışkan akışı tek ve çift fazlı olmak üzere ayrı ayrı modellenmiştir.

5.4.1. Akışın Tek Fazlı Modellenmesi

Nanoakışkan, içeriğinde hem katı hem de sıvı faz barındıran çift-fazlı bir karışımdır. Fakat, nanoakışkanın içeriğindeki katı faz boyutları genellikle 100 nm'den daha küçük olan nanopartiküllerden oluşmaktadır. Nanoakışkan içerisindeki nanopartikül boyutları 100 nm'den daha küçük olduğundan, nanoakışkan bir karışım gibi değil saf bir akışkan gibi davranmaktadır. Bundan dolayı nanoakışkan akışı tek fazlı akış denklemleri kullanılarak modellenebilir [55, 56].

Bir akışkan akışının fiziksel olarak modellenmesinde,

- Kütle korunumu
- Momentum korunumu
- Enerjinin korunumu

olmak üzere üç temel fiziksel prensip kullanılmaktadır. Bu temel fiziksel prensipler basit matematiksel denklemlerle ifade edilmektedir. Bu denklemlere korunum denklemleri denilmektedir.

5.4.1.1. Tek Fazlı Akış Modellemesinde Korunum Denklemleri

Korunum denklemleri kütlenin, momentumun ve enerjinin korunumu prensiplerinden oluşmaktadır. Bu çalışma için (i) akış ve ısı transferi üç boyutlu ve sürekli, (ii) akış laminer ve sıkıştırılmaz (iii) akışkanın termofiziksel özellikleri sıcaklıktan bağımsız, (iv) kaldırma kuvveti, viskoz yayılım ve ısı ışıınımı ihmal edilebilir kabulleri yapılmıştır. Bu kabuller altında tek fazlı akış için korunum denklemleri,

Kütlenin korunumu (Süreklilik denklemi):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.19)$$

x-yönü momentumun korunumu denklemi:

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5.20)$$

y-yönü momentumun korunumu denklemi:

$$\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dy} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5.21)$$

z-yönü momentumun korunumu denklemi:

$$\left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dz} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5.22)$$

Enerjinin korunumu denklemi:

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5.23)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada u , v ve w sırasıyla x , y ve z yönlerindeki hız bileşenlerini ifade etmektedir. ρ ve P ise sırasıyla yoğunluk ve basıncı temsil etmektedir. ν ise kinematik viskozitedir ve

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.24)$$

olarak ifade edilmektedir. μ ise dinamik viskozitedir. Burada α ısı yayılım katsayısını belirtmektedir ve

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (5.25)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada k ve C_p sırasıyla akışkanın ısı iletim katsayısını ve sabit basınçtaki özgül ısıyı temsil etmektedir.

5.4.1.2. Başlangıç Ve Sınır Koşulları

Korunum denklemlerinin çözülebilmesi için oluşturulan modele uygun başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Yapılan analizlerde mikrokanalların bilgisayar çipi gibi herhangi bir elektronik cihazdan üretilen ısının atılması amacıyla sıcak bir yüzey üzerine bağlandığı kabul edilmiştir. Bundan dolayı sınır koşulu olarak mikrokanalın alt yüzeyi için sabit ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır. Isı akısının değeri $q'' = 1000 \text{ W/m}^2$ olarak kabul edilmiştir. Mikrokanalın diğer yüzeylerine ise yalıtım sınır şartı uygulanmıştır.

Çalışma laminer akış koşulları altında gerçekleştirilmiş olup, analizlerde Reynolds sayısının 10 ile 100 aralığında değiştiği kabul edilmiştir. Akışkanın mikrokanala giriş hızları ise tanımlanan Reynolds sayısı aralığı için Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Mikrokanalın cidarlarında ise kaymama koşuluna uygun olarak akışkan hızının sıfır olduğu kabul edilmiştir. Akışkanın mikrokanala giriş sıcaklığı ise 27 °C olarak alınmıştır. Mikrokanalın çıkışında ise etkin basıncın sıfır olduğu kabulü yapılmıştır.

Bu bilgiler altında korunum denklemleri için başlangıç ve sınır koşulları,

Mikrokanal girişi için:

$$u = \frac{\mu Re}{\rho D_h}, v = 0, w = 0 \text{ ve } T_{akışkan} = 27^\circ C$$

Mikrokanal çıkışı için:

$$P_{etkin} = P_{etkin, çıkış} = 0$$

Mikrokanalın alt cidarı için:

$$u = 0, v = 0, w = 0, T_{cidar} = T_{akışkan} \text{ ve } \dot{q}'' = -k_{cidar} \frac{\partial T_{cidar}}{\partial n} = 1000 W / m^2$$

Mikrokanalın yan ve üst cidarları için:

$$u = 0, v = 0, w = 0, T_{cidar} = T_{akışkan} \text{ ve } \dot{q}'' = -k_{cidar} \frac{\partial T_{cidar}}{\partial n} = 0$$

şeklinde ifade edilebilir.

5.4.1.3. ZnO-EG Nanoakışkanının Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Korunum denklemleri çalışma akışkanının yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve viskozitesi gibi termofiziksel özelliklerini içermektedir. Korunum denklemlerinin çözülebilmesi için kullanılan çalışma akışkanının termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada çalışma akışkanı olarak $\varphi = \%1,0 - \%4,0$ nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanları kullanılmıştır.

Nanoakışkanların yoğunluk ve özgül ısı değerleri sırasıyla,

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_{np} \quad (5.26)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_{bf} + \varphi(\rho C_p)_{np} \quad (5.27)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır [8]. Bu denklemler klasik karışım teorisine dayanmaktadır. Etilen glikolün ve ZnO nanopartikülünün özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Etilen glikol ve ZnO nanopartikülünün termofiziksel özellikleri [57,58].

Madde	ρ (kg / m ³)	C_p (J / kgK)	k (W / mK)	μ (kg / ms)
Etilen glikol	1114,4	2415	0,252	0,0157
ZnO	5600	514	15	-

ZnO-EG nanoakışkanın ısı iletim katsayısı Esfe and Saedodin [34] tarafından ZnO-EG nanoakışkanın ısı iletim katsayısını hesaplamak için deneysel olarak elde edilmiş aşağıdaki korelasyon kullanılarak hesaplanmıştır.

$$k_{nf} = (0,24859T^{2,504\varphi^{0,7974}} + 0,7492)k_{bf} \quad (5.28)$$

Burada sıcaklık birimi °C’dir. Korelasyon $\varphi = \%0,0625$ ile $\%5,0$ nanopartikül hacimsel oranı ve $T = 25 - 50$ °C sıcaklık aralıkları için geçerlidir. Bu çalışmada nanoakışkanın sıcaklığı 27 °C olarak alınmıştır.

ZnO-EG nanoakışkanının viskozitesi ise yine Esfe and Saedodin [33] tarafından ZnO-EG nanoakışkanının viskozitesini hesaplamak için deneysel olarak elde edilmiş Denklem 5.29'da verilen korelasyon ile hesaplanmıştır.

$$\mu_{nf} = (0,9118 \text{Exp}(5,49\varphi - 0,00001359T^2) + 0,0303 \text{Ln}(T))\mu_{bf} \quad (5.29)$$

Burada sıcaklık birimi °C'dir. Korelasyon $\varphi = \%0,25 - \%5,0$ nanopartikül hacimsel oranı ve $T = 25 - 50$ °C sıcaklık aralıkları için geçerlidir.

Denklem 26-29 kullanılarak $\varphi = \%1,0 - \%4,0$ nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanının termofiziksel özellikleri Çizelge 5.3 sunulmuştur.

Çizelge 5.3. Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının termofiziksel özellikleri.

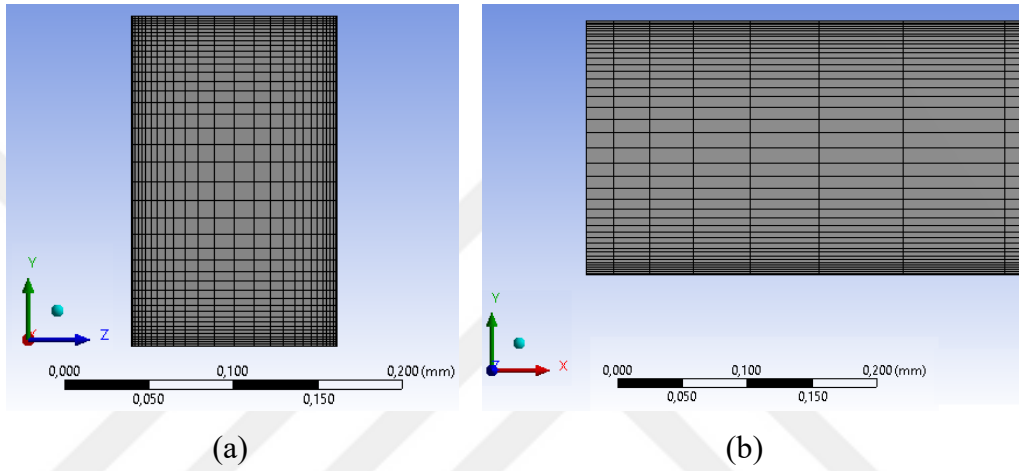
Madde	ρ (kg / m ³)	C_p (J / kgK)	k (W / mK)	μ (kg / ms)
Etilen glikol	1114,4	2415	0,252	0,0157
%1,0 ZnO-EG	1159,3	2323,2	0,2661	0,016542
%2,0 ZnO-EG	1204,1	2238,2	0,279	0,017387
%3,0 ZnO-EG	1249	2159,3	0,2925	0,01828
%4,0 ZnO-EG	1293,8	2085,9	0,3069	0,019224

5.4.1.4. Tek Fazlı Akış İçin Sayısal Modelin Oluşturulması

Sayısal çalışmada öncelikli olarak her bir en-boy oranı için elde edilen ölçülerde dikdörtgen kesitli mikrokanaal geometrileri oluşturulmuştur. Elde edilen üç boyutlu geometrilerin sonlu hacimler metodu yardımıyla dikdörtgen prizması şeklindeki hücreler kullanılarak hücre ağları oluşturulmuştur. Dikdörtgen kesitli mikrokanaalların köşe ve kenarlarındaki bölgelerde sınır tabakanın doğru ve detaylı bir şekilde incelenebilmesi için daha küçük boyutlu hücreler kullanılmıştır. $\alpha = 1,6$ en-boy oranına sahip mikrokanaal kesitindeki hücre dağılımları Şekil 5.3'de örnek olarak verilmiştir.

Oluşturulan hücre ağı için korunum denklemleri belirtilen sınır koşulları ile sayısal olarak çözdürülmüştür. Sayısal çalışma çözümünde ANSYS Fluent 15.0

kullanılmıştır. Akış sıkıştırılmaz kabul edildiği için çözümler sürekli şartlarda basınç tabanlı çözücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korunum denklemlerinin ayrıklaştırılmasında kullanılan taşınım terimleri için ikinci dereceden upwind fark metodu kullanılmıştır. Akış alanının çözümlenmesinde ise Green-Gauss hücre tabanlı metod uygulanmıştır. Basınç hız çiftinin ayrıklaştırılmasında Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations (SIMPLE) algoritması kullanılmıştır [59]. Sayısal çözümlerinde iterasyonların yakınsaklığı 10^{-6} olarak seçilmiştir.



Şekil 5.3. Sayısal uygulama için örnek hücre dağılımı a) mikrokana1 kesiti b) mikrokana1 yan kesiti.

Sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlar üzerinde hücre sayısının etkisini azaltmak amacıyla dikdörtgen kesitli mikrokana1lar farklı hücre sayılarında modellenerek hücre sayısının sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her bir hücre sayısı için ortalama Nusselt sayısı ve ortalama Darcy sürtünme faktörü değerleri hesaplanarak, bu değerlerin hücre sayısı ile değişimi belirlenmiştir.

$\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokana1 için kullanılan hücre sayıları ve elde edilen ortalama Nusselt sayısı ve ortalama Darcy sürtünme faktörü değerleri Çizelge 5.4'de sunulmuştur.

Çizelge 5.4 incelendiğinde, hücre sayısı 621075 olan model ile hücre sayısı 289413 olan modelden elde edilen ortalama Nusselt sayısı değerleri arasındaki farkın %0,10 olduğu, ortalama Darcy sürtünme faktörü değerleri arasındaki farkın ise %0,09

olduğu görülmüştür. Ortalama Nusselt sayısı ve ortalama Darcy sürtünme faktörü için hücre sayısına bağlı olarak elde edilen değişimler 621075 hücre sayısı için çok küçük olduğundan 621075 hücre sayısı kullanılarak oluşturulan modelden elde edilen sonuçların hücre sayısından bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Bundan dolayı, sayısal çalışmada $\alpha = 1,0$ 'lık en-boy oranına sahip mikrokanal için 621075 hücre sayısına sahip model kullanılmıştır.

Çizelge 5.4. $\alpha = 1,0$ 'lık mikrokanal için hücre sayısına bağlı ortalama Nusselt sayısı ve ortalama Darcy sürtünme faktörü değerleri.

Hücre Sayısı	Nu_{ort}	f_{ort}	$\Delta Nu_{ort} (\%)$	$\Delta f_{ort} (\%)$
2950	5,4400	0,522910	-	-
10560	5,6569	0,552705	3,99	5,70
32976	5,7387	0,565266	1,45	2,27
100440	5,7776	0,570724	0,67	0,97
289413	5,7833	0,572326	0,10	0,28
621075	5,7889	0,572847	0,10	0,09

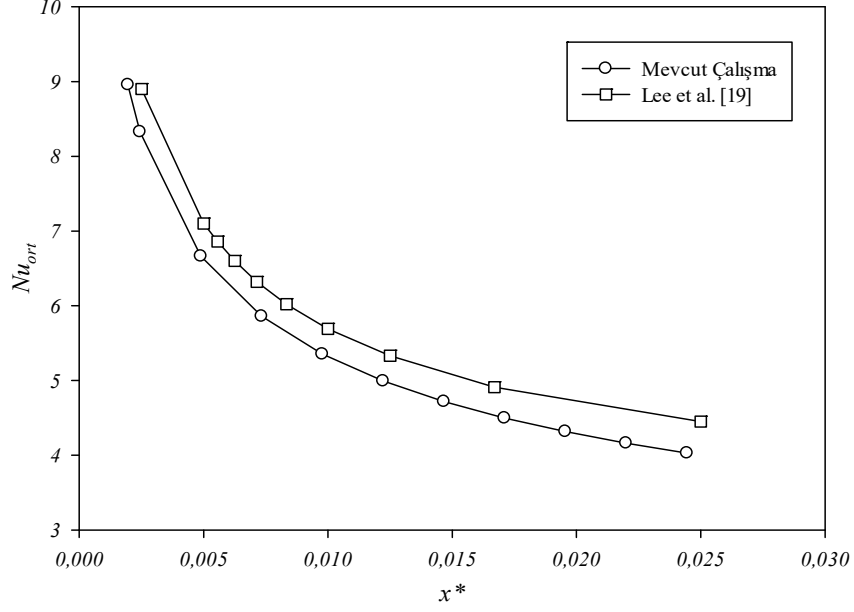
Ortalama Nusselt sayısı ve ortalama Darcy sürtünme faktörü değerlerinin hücre sayısı ile değişimi çalışmada kullanılan her bir mikrokanal en-boy oranı değeri için ayrı ayrı incelenmiştir. Sayısal çalışmada, farklı en-boy oranlarındaki mikrokanallar için kullanılan hücre sayısı değerleri Çizelge 5.5'de sunulmuştur.

Çizelge 5.5. Farklı en-boy oranına sahip mikrokanallar için çalışmada kullanılan hücre sayıları.

α	Hücre Sayısı
1,0	621075
1,2	633150
1,4	492804
1,6	659568
1,8	681408
2,0	766584

Oluşturulan modellerin doğruluğunu tespit etmek amacıyla, sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar literatürdeki mevcut deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. $\alpha = 1,0$ 'lık en-boy oranına sahip mikrokanaldan elde edilen sayısal çalışma sonuçlarının Lee et al. [19] tarafından kare kesitli mikrokanalda ısı olarak gelişmekte olan laminer akış

koşulları için elde ettiği deneysel sonuçlar ile kıyaslanması Şekil 5.4'de görülmektedir.



Şekil 5.4. Mevcut sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların literatürden alınan deneysel sonuçlar ile kıyaslanması.

Şekil 5.4'de görüldüğü üzere, mevcut sayısal çalışmadan elde edilen yerel Nusselt sayısı değerleri Lee et al. [19] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmadan elde edilen yerel Nusselt sayısı değerleri ile iyi bir uyum göstermektedir. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar Lee et al. [19] tarafından elde edilen deneysel sonuçların altında kalmıştır. Maksimum sapma ise %9,45 olarak elde edilmiştir. Burada x^* boyutsuz ısı uzunluğudur ve,

$$x^* = \frac{x}{D_h Re Pr} \quad (5.30)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Denklem 5.30'da yer alan Prandtl sayısı ise momentum yayılımının ısı yayınımına oranı olarak:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (5.31)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

5.4.2. Çift Fazlı Akış Modellemesi

Çok fazlı akışta faz, akışla etkileşimli ve akışa karşı farklı bir ataletle sahip akışın potansiyel alanı içinde belirlenebilen bir madde türü olarak tanımlanabilir. İki fazlı akışta iki farklı faz bulunmaktadır. Bunlar sıvı-sıvı, gaz-sıvı, gaz-katı ve sıvı-katı akışları olmak üzere gruplandırılabilir.

Bu çalışmada, ZnO-EG nanoakışkanının çift fazlı olarak modellenmesinde, akışkan ve katı partikül Euler-Euler yaklaşımı ile Eulerian model kullanılarak modellenmiştir.

Eulerian modelde her bir faz için korunum denklemleri ayrı ayrı yazılmaktadır. Ayrıca, tek bir basınç değeri bütün fazlara paylaştırılmaktadır [60].

5.4.2.1. Çift Fazlı Akış Modellemesinde Korunum Denklemleri

Akışın Eulerian model kullanılarak çift fazlı olarak modellenmesinde, korunum denklemleri her bir faz için ayrı ayrı yazılmaktadır. Bundan dolayı, ZnO-EG nanoakışkanının çift fazlı olarak modellenmesinde korunum denklemleri katı ve sıvı faz için ayrı ayrı yazılmıştır [60].

Kütlenin korunumu (Süreklilik denklemi):

$$\text{sıvı faz:} \quad \frac{\partial(\varphi_{bf} \rho_{bf} u_{bf})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{bf} \rho_{bf} v_{bf})}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_{bf} \rho_{bf} w_{bf})}{\partial z} = 0 \quad (5.32)$$

$$\text{katı faz:} \quad \frac{\partial(\varphi_{np} \rho_{np} u_{np})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{np} \rho_{np} v_{np})}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_{np} \rho_{np} w_{np})}{\partial z} = 0 \quad (5.33)$$

x-yönü momentumun korunumu denklemi:

sıvı faz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi_{bf}\rho_{bf}u_{bf}u_{bf})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{bf}\rho_{bf}v_{bf}u_{bf})}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_{bf}\rho_{bf}w_{bf}u_{bf})}{\partial z} &= -\varphi_{bf}\frac{\partial P}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{bf}\mu_{bf}\frac{\partial u_{bf}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{bf}\mu_{bf}\frac{\partial u_{bf}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{bf}\mu_{bf}\frac{\partial u_{bf}}{\partial z}) &+ (F_d)_x + (F_{vm})_x \end{aligned} \quad (5.34)$$

katı faz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi_{np}\rho_{np}u_{np}u_{np})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{np}\rho_{np}v_{np}u_{np})}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_{np}\rho_{np}w_{np}u_{np})}{\partial z} &= -\varphi_{np}\frac{\partial P}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{np}\mu_{np}\frac{\partial u_{np}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{np}\mu_{np}\frac{\partial u_{np}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{np}\mu_{np}\frac{\partial u_{np}}{\partial z}) & \\ + (F_{col})_x - (F_d)_x - (F_{vm})_x & \end{aligned} \quad (5.35)$$

y-yönü momentumun korunumu denklemi:

sıvı faz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi_{bf}\rho_{bf}u_{bf}v_{bf})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{bf}\rho_{bf}v_{bf}v_{bf})}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_{bf}\rho_{bf}w_{bf}v_{bf})}{\partial z} &= -\varphi_{bf}\frac{\partial P}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{bf}\mu_{bf}\frac{\partial v_{bf}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{bf}\mu_{bf}\frac{\partial v_{bf}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{bf}\mu_{bf}\frac{\partial v_{bf}}{\partial z}) &+ (F_d)_y + (F_{vm})_y \end{aligned} \quad (5.36)$$

katı faz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi_{np}\rho_{np}u_{np}v_{np})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{np}\rho_{np}v_{np}v_{np})}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_{np}\rho_{np}w_{np}v_{np})}{\partial z} &= -\varphi_{np}\frac{\partial P}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{np}\mu_{np}\frac{\partial v_{np}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{np}\mu_{np}\frac{\partial v_{np}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{np}\mu_{np}\frac{\partial v_{np}}{\partial z}) & \\ + (F_{col})_y - (F_d)_y - (F_{vm})_y & \end{aligned} \quad (5.37)$$

z-yönü momentumun korunumu denklemi:

sıvı faz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi_{bf}\rho_{bf}u_{bf}w_{bf})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{bf}\rho_{bf}v_{bf}w_{bf})}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_{bf}\rho_{bf}w_{bf}w_{bf})}{\partial z} &= -\varphi_{bf} \frac{\partial P}{\partial z} \\ + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{bf}\mu_{bf} \frac{\partial w_{bf}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{bf}\mu_{bf} \frac{\partial w_{bf}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{bf}\mu_{bf} \frac{\partial w_{bf}}{\partial z}) &+ (F_d)_z + (F_{vm})_z \end{aligned} \quad (5.38)$$

kati faz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varphi_{np}\rho_{np}u_{np}w_{np})}{\partial x} + \frac{\partial(\varphi_{np}\rho_{np}v_{np}w_{np})}{\partial y} + \frac{\partial(\varphi_{np}\rho_{np}w_{np}w_{np})}{\partial z} &= -\varphi_{np} \frac{\partial P}{\partial z} \\ + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{np}\mu_{np} \frac{\partial w_{np}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{np}\mu_{np} \frac{\partial w_{np}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{np}\mu_{np} \frac{\partial w_{np}}{\partial z}) &+ (F_{col})_z - (F_d)_z - (F_{vm})_z \end{aligned} \quad (5.39)$$

Enerjinin korunumu denklemi:

sıvı faz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{bf}\rho_{bf}u_{bf}Cp_{bf}T_{bf}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{bf}\rho_{bf}v_{bf}Cp_{bf}T_{bf}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{bf}\rho_{bf}w_{bf}Cp_{bf}T_{bf}) \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{bf}k_{eff,bf} \frac{\partial T_{bf}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{bf}k_{eff,bf} \frac{\partial T_{bf}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{bf}k_{eff,bf} \frac{\partial T_{bf}}{\partial z}) - h_v(T_{bf} - T_{np}) \end{aligned} \quad (5.40)$$

kati faz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{np}\rho_{np}u_{np}Cp_{np}T_{np}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{np}\rho_{np}v_{np}Cp_{np}T_{np}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{np}\rho_{np}w_{np}Cp_{np}T_{np}) \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{np}k_{eff,np} \frac{\partial T_{np}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{np}k_{eff,np} \frac{\partial T_{np}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{np}k_{eff,np} \frac{\partial T_{np}}{\partial z}) + h_v(T_{bf} - T_{np}) \end{aligned} \quad (5.41)$$

Korunum denklemlerinde;

$$\varphi_{np} + \varphi_{bf} = 1 \quad (5.42)$$

olarak tanımlanmaktadır. Momentum denklemlerindeki F_d katı ve sıvı faz arasındaki sürüklenme kuvvetini ifade etmektedir ve

$$F_d = -\beta(\vec{V}_{bf} - \vec{V}_{np}) \quad (5.43)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada \vec{V} hız vektörünü belirtmektedir. β ise katı-sıvı değişim katsayısıdır. Bu çalışmada katı-sıvı değişim katsayısı için Wen and Yu modeli [61] kullanılmıştır. Wen and Yu modeline [61] göre katı-sıvı değişim katsayısı,

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\varphi_{np} \varphi_{bf} \rho_{bf} |\vec{V}_{bf} - \vec{V}_{np}|}{d_{np}} \varphi_{bf}^{-2,65} \quad (5.44)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada d_{np} partikül çapını temsil etmektedir. C_D terimi ise sürüklenme katsayısıdır ve bağıl Reynolds sayısına göre değişmektedir. Wen and Yu modeline [61] göre sürüklenme katsayısı,

$$C_D = \frac{24}{\varphi_{bf} Re_{np}} \left[1 + 0,15(\varphi_{bf} Re_{np})^{0,687} \right] \quad (5.45)$$

olarak ifade edilmektedir. Bağıl Reynolds sayısı ise,

$$Re_{np} = \frac{\rho_{bf} d_{np} |\vec{V}_{np} - \vec{V}_{bf}|}{\mu_{bf}} \quad (5.46)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Momentum denklemlerindeki F_{vm} terimi ise sanal kütle kuvvetini ifade etmektedir. Sanal kütle kuvveti katı ve sıvı faz arasındaki bağılıvmelenmeden kaynaklanmaktadır ve

$$F_{vm} = 0,5 \varphi_{np} \rho_{bf} \frac{D}{Dt} (\bar{V}_{bf} - \bar{V}_{np}) \quad (5.47)$$

olarak ifade edilmektedir. Momentum denklemindeki F_{col} terimi katı partiküller arasındaki etkileşim kuvvetini ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$F_{col} = G(\varphi_{bf}) \bar{V}_{bf} \quad (5.48)$$

Burada G terimi katı partiküller arasındaki etkileşim modülüdür ve

$$G = 1,0 \exp(-600[\varphi_{bf} - 0,376]) \quad (5.49)$$

olarak ifade edilmektedir. Enerji denklemlerindeki h_v terimi fazlar arasındaki hacimsel ısı taşınım katsayısıdır ve

$$h_v = \frac{6(1 - \varphi_{bf})}{d_{np}} h_{np} \quad (5.50)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada h_{np} sıvı ve katı faz arasındaki ısı taşınım katsayısıdır ve

$$Nu_{np} = \frac{h_{np} d_{np}}{k_{bf}} = 2 + 1,1 Re_{np}^{0,6} Pr^{1/3} \quad (5.51)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir [60]. Sıvı ve katı fazların etkili ısıl iletkenlikleri ise sırasıyla aşağıda verildiği gibidir.

$$k_{eff, bf} = \frac{k_{b, bf}}{\varphi_{bf}} \quad (5.52)$$

$$k_{eff, np} = \frac{k_{b, np}}{\varphi_{np}} \quad (5.53)$$

burada $k_{b, bf}$ ve $k_{b, np}$ terimleri sırasıyla

$$k_{b, bf} = (1 - \sqrt{(1 - \varphi_{bf})}) k_{bf} \quad (5.54)$$

$$k_{b, np} = \sqrt{(1 - \varphi_{bf})} (\omega A + [1 - \omega] \Gamma) k_{bf} \quad (5.55)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yukarıdaki denklemlerde yer alan Γ , A ve ω katsayıları ise aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$\Gamma = \frac{2}{(1 - \frac{B}{A})} \left\{ \frac{B(A-1)}{A(1 - \frac{B}{A})^2} \ln\left(\frac{A}{B}\right) - \frac{(B-1)}{(1 - \frac{B}{A})} - \frac{B+1}{2} \right\} \quad (5.56)$$

Burada A ve B katsayıları sırasıyla

$$A = \frac{k_{np}}{k_{bf}} \quad (5.57)$$

$$B = 1,25 \left(\frac{[1 - \varphi_{bf}]}{\varphi_{bf}} \right)^{10/9} \quad (5.58)$$

olarak ifade edilmektedir. Küresel katı partiküller için $\omega = 7,26 \times 10^{-3}$ olarak alınabilmektedir [60].

5.4.2.2. Başlangıç Ve Sınır Koşulları

ZnO-EG nanoakışkanının Eulerian model kullanılarak çift fazlı akış koşullarında modellenmesi için yazılan korunum denklemlerinin çözülebilmesi için başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Mikrokanalın alt yüzeyi için sabit ısı akısı sınır koşulu uygulanmıştır. Isı akısının değeri $\dot{q}'' = 1000 \text{ W/m}^2$ olarak kabul edilmiştir. Mikrokanalın diğer yüzeylerine ise yalıtım sınır şartı uygulanmıştır.

Çalışma laminer akış koşulları altında gerçekleştirilmiş olup analizlerde Reynolds sayısının 10 ile 100 aralığında değiştiği kabul edilmiştir. Akışkanın mikrokanala giriş hızları ise tanımlanan Reynolds sayısı aralığı için Denklem 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Nanopartiküllerin mikrokanala giriş hızlarının akışkanın mikrokanala giriş hızı ile aynı olduğu kabul edilmiştir. Mikrokanalın cidarlarında ise kaymama koşuluna uygun olarak akışkan hızının sıfır olduğu kabul edilmiştir. Akışkanın mikrokanala giriş sıcaklığı ise $27 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır. Mikrokanalın çıkışında ise etkin basıncın sıfır olduğu kabulü yapılmıştır.

Çalışma akışkanı olarak %1,0 ile %4,0 nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı kullanıldığından nanopartikül hacimsel oranı değeri $\varphi_{np} = 0,01-0,04$ aralığında değerler almıştır. ZnO nanopartikülünün çapı ise $d_{np} = 18 \text{ nm}$ olarak alınmıştır [33-34]. Başlangıç ve sınır koşulları,

Mikrokanalın girişi için:

$$u_{bf} = u_{np} = \frac{\mu Re}{\rho D_h}, v_{bf} = v_{np} = 0, w_{bf} = w_{np} = 0, T_{bf} = T_{np} = 27^\circ\text{C}$$

$$d_{np} = 18\text{nm}, \varphi_{np} = 0,01 - 0,04$$

Mikrokanalın çıkışı için:

$$P_{etkin} = P_{etkin, çıkış} = 0$$

Mikrokanalın alt cidarı için:

$$u_{bf} = u_{np} = 0, v_{bf} = v_{np} = 0, w_{bf} = w_{np} = 0, T_{bf} = T_{np} = T_{cidar}$$

$$\dot{q}'' = -k_{cidar} \frac{\partial T_{cidar}}{\partial n} = 1000 W / m^2$$

Mikrokanalın yan ve üst cidarları için:

$$u_{bf} = u_{np} = 0, v_{bf} = v_{np} = 0, w_{bf} = w_{np} = 0, T_{bf} = T_{np} = T_{cidar}, \dot{q}'' = -k_{cidar} \frac{\partial T_{cidar}}{\partial n} = 0$$

şeklinde kabul edilmiştir.

5.4.2.3. Etilen Glikol Ve ZnO Nanopartikülünün Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Eulerian yaklaşımda çift-fazlı akış modelinde yazılan korunum denklemlerinin çözülebilmesi için ZnO nanopartiküllerinin ve etilen glikolün termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. ZnO nanopartiküllerinin ve etilen glikolün termofiziksel özellikleri Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Korunum denklemlerindeki μ_{np} terimi katı fazın kayma viskozitesini temsil etmektedir ve

$$\mu_{np} = \mu_{np,col} + \mu_{np,kin} \quad (5.59)$$

olarak yazılabilir. Burada $\mu_{p,col}$ ve $\mu_{p,kin}$ sırasıyla katı fazın kayma viskozitesinin çarpışmadan kaynaklanan kısmını ve kinetik viskoziteyi ifade etmektedir. Katı fazın kayma viskozitesinin çarpışmadan kaynaklanan kısmı,

$$\mu_{np,col} = \frac{4}{5} \varphi_{np} \rho_{np} d_{np} g_{0,pp} (1 + e_{pp}) \left(\frac{\Theta_{np}}{\pi} \right)^{1/2} \varphi_{np} \quad (5.60)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir [62]. Kinetik viskozitenin hesaplanmasında ise Syamlal et al. [63] tarafından önerilen,

$$\mu_{np,kin} = \frac{\varphi_{np} d_{np} \rho_{np} \sqrt{\Theta_{np} \pi}}{6(3 - e_{pp})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{pp}) (3e_{pp} - 1) \varphi_{np} g_{0,pp} \right] \quad (5.61)$$

bağıntısı ile bulunmuştur. Burada $g_{0,pp}$ terimi radyal dağılım katsayısıdır. Radyal dağılım katsayısı,

$$g_{0,pp} = \left[1 - \left(\frac{\varphi_{np}}{\varphi_{np,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (5.62)$$

ile ifade edilir [64]. $\varphi_{np,max}$ maksimum yoğunluk limitini temsil etmektedir ve bu çalışmada 0,63 olarak alınmıştır [60]. e_{pp} terimi ise düzeltme katsayısıdır ve 0,9 olarak kabul edilmiştir [60]. Θ_{np} terimi ise granüler sıcaklıktır. Granüler sıcaklığın hesaplanmasında Syamlal et al. [63] tarafından önerilen,

$$k_{\Theta_{np}} = \frac{15 d_{np} \rho_{np} \varphi_{np} \sqrt{\Theta_{np} \pi}}{4(41 - 33\eta)} \left[1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta - 3) \varphi_{np} g_{0,pp} \right] + \frac{16}{15\pi} (41 - 33\eta) \eta \varphi_{np} g_{0,pp} \quad (5.63)$$

bağıntısı kullanılmıştır [63]. Burada, η terimi,

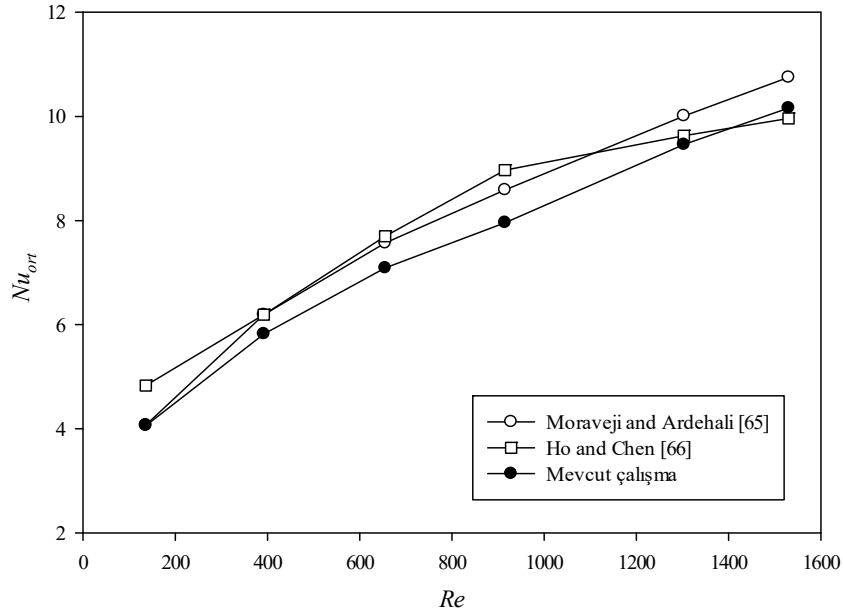
$$\eta = \frac{1}{2} (1 + e_{pp}) \quad (5.64)$$

şeklinde ifade edilmektedir [63].

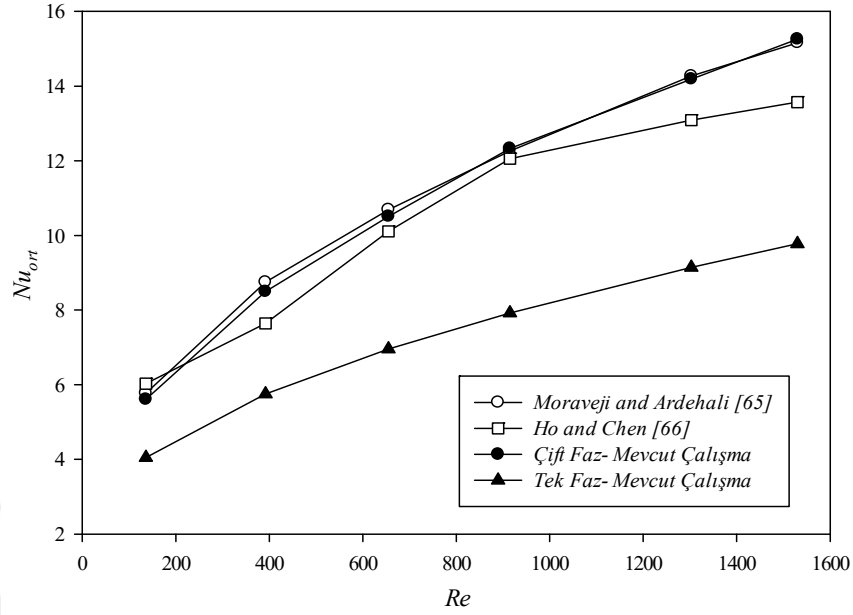
5.4.2.4. Çift Fazlı Akış İçin Sayısal Modelin Oluşturulması

Çift fazlı analizlerde tek fazlı analiz için oluşturulan ve seçilen hücre yapıları kullanılmıştır. Hücre ağı için korunum denklemleri belirtilen sınır koşulları ile sayısal olarak çözdürülmüştür. Korunum denklemlerinin ayrıklaştırılmasında kullanılan taşınım terimleri için birinci dereceden upwind fark metodu kullanılmıştır. Akış alanının çözümlenmesinde ise Green-Gauss hücre tabanlı metot kullanılmıştır. Basınç hız çiftinin ayrıklaştırılmasında ise Phase Coupled Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations (PC-SIMPLE) algoritması kullanılmıştır. Sayısal çözümlerinde iterasyonların yakınsaklığı 10^{-6} olarak seçilmiştir.

Oluşturulan çift fazlı modelin doğruluğu Moraveji and Ardehali [65] tarafından elde edilen sayısal sonuçlar ve Ho and Chen [66] tarafından elde edilen deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Mevcut çalışmada oluşturulan çift fazlı akış modeli $\varphi_{np} = \%0$ ve $\%1,734$ değerleri için Moraveji and Ardehali [65] ve Ho and Chen [66] tarafından elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar $\varphi_{np} = \%0$ ve $\%1,734$ için sırasıyla Şekil 5.5 ve 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5. $\varphi_{np} = \%0$ için mevcut sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlar ile kıyaslanması.



Şekil 5.6. $\varphi_{np} = \%1,734$ için mevcut sayısal çalışmadan elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlar ile kıyaslanması.

Mevcut çalışmada oluşturulan çift fazlı modelden elde edilen sonuçlar Moraveji and Ardehali [65] tarafından oluşturulan çift fazlı model sonuçları ve Ho and Chen [66] tarafından elde edilen deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. $\varphi_{np} = \%0$ için mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar ile Moraveji and Ardehali [65]'nin sonuçları arasındaki ortalama sapma $\%5,15$ iken, Ho and Chen [66] sonuçları ile ortalama sapmanın $\%7,48$ olduğu saptanmıştır. $\varphi_{np} = \%1,734$ için ise mevcut çalışmada oluşturulan çift fazlı modelden elde edilen sonuçlar Moraveji and Ardehali [65] sonuçları ile ortalama $\%1,52$ sapma gösterirken, Ho and Chen [66] sonuçları ile ortalama $\%7,55$ sapma göstermiştir. $\varphi_{np} = \%1,734$ için mevcut çalışmada oluşturulan tek fazlı modelden elde edilen sonuçlar ise Moraveji and Ardehali [65] sonuçları ile ortalama $\%34,29$ sapma gösterirken, Ho and Chen [66] sonuçları ile ortalama $\%30,19$ sapma göstermiştir. Mevcut çalışmada çift fazlı akış modellemesinden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Tek fazlı akış modellemesinden elde edilen sonuçlar ise deneysel ve çift fazlı akış modellemesinden elde edilen sonuçlardan daha düşüktür.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

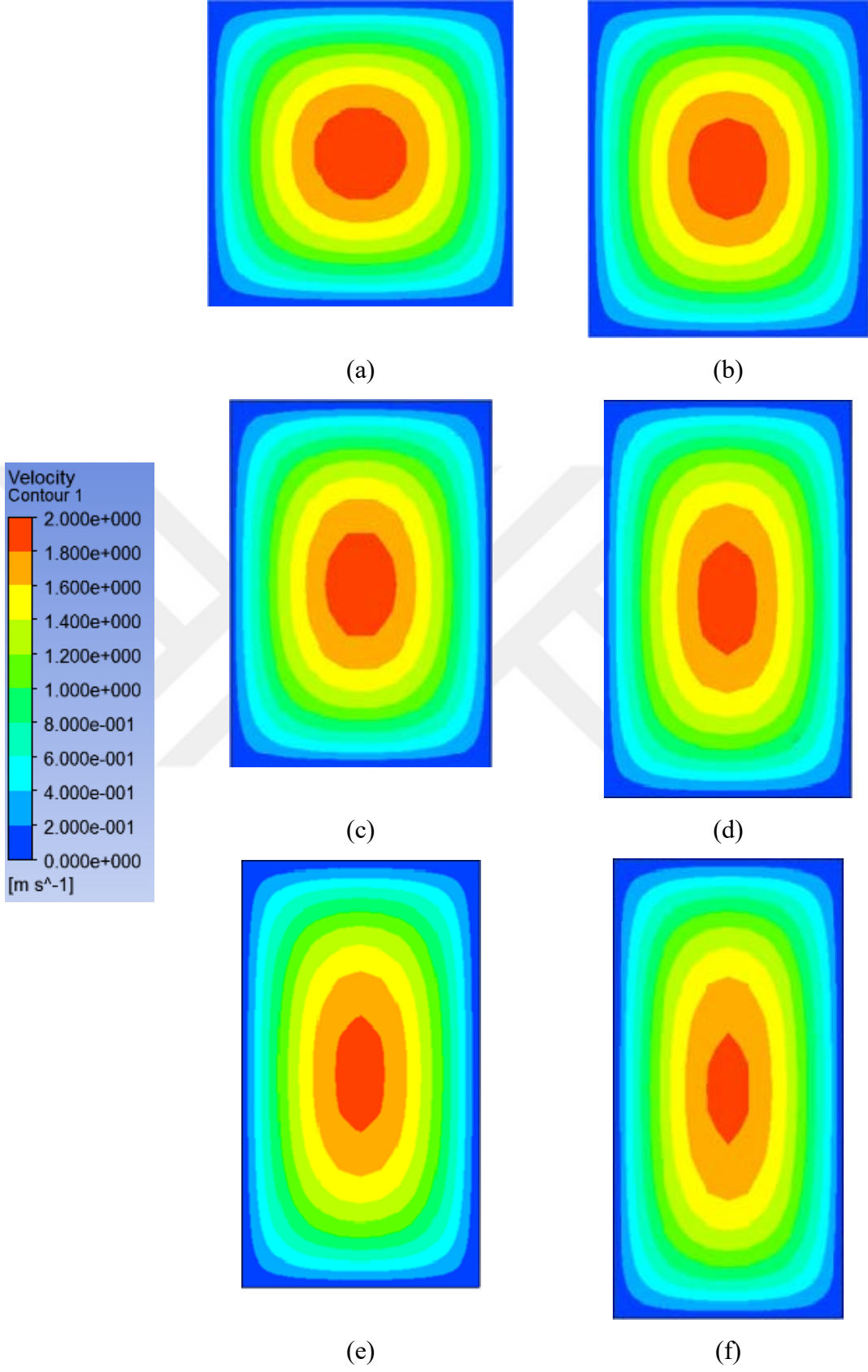
Bu çalışmada, en-boy oranı $\alpha = 1,0$ ile $2,0$ arasında değişen sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda nanopartikül hacimsel oranı $\varphi_{np} = \%1,0$ ile $\%4,0$ arasında değişen ZnO-Etilen glikol nanoakışkanının akış ve zorlanmış ısı taşınım karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Akış üç-boyutlu, sürekli, sıkıştırılamaz, hidrodinamik olarak tam gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan laminar akış şartlarında kabul edilmiştir. Akışın Reynolds sayısı $Re = 10$ ile 100 arasında değiştirilmiştir. Çalışmada, mikrokanalın alt yüzeyinde sabit ısı akısı sınır koşulu uygulanmıştır ve ısı akısının değeri $\dot{q}'' = 1000 \text{ W/m}^2$ olarak belirlenmiştir. Mikrokanalın en-boy oranının akışın ısı ve hidrodinamik performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Akış tek fazlı ve çift fazlı olarak modellenerek elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

6.1. MİKROKANAL EN-BOY ORANININ AKIŞIN ISIL VE HİDRODİNAMİK PERFORMANSINA ETKİSİ

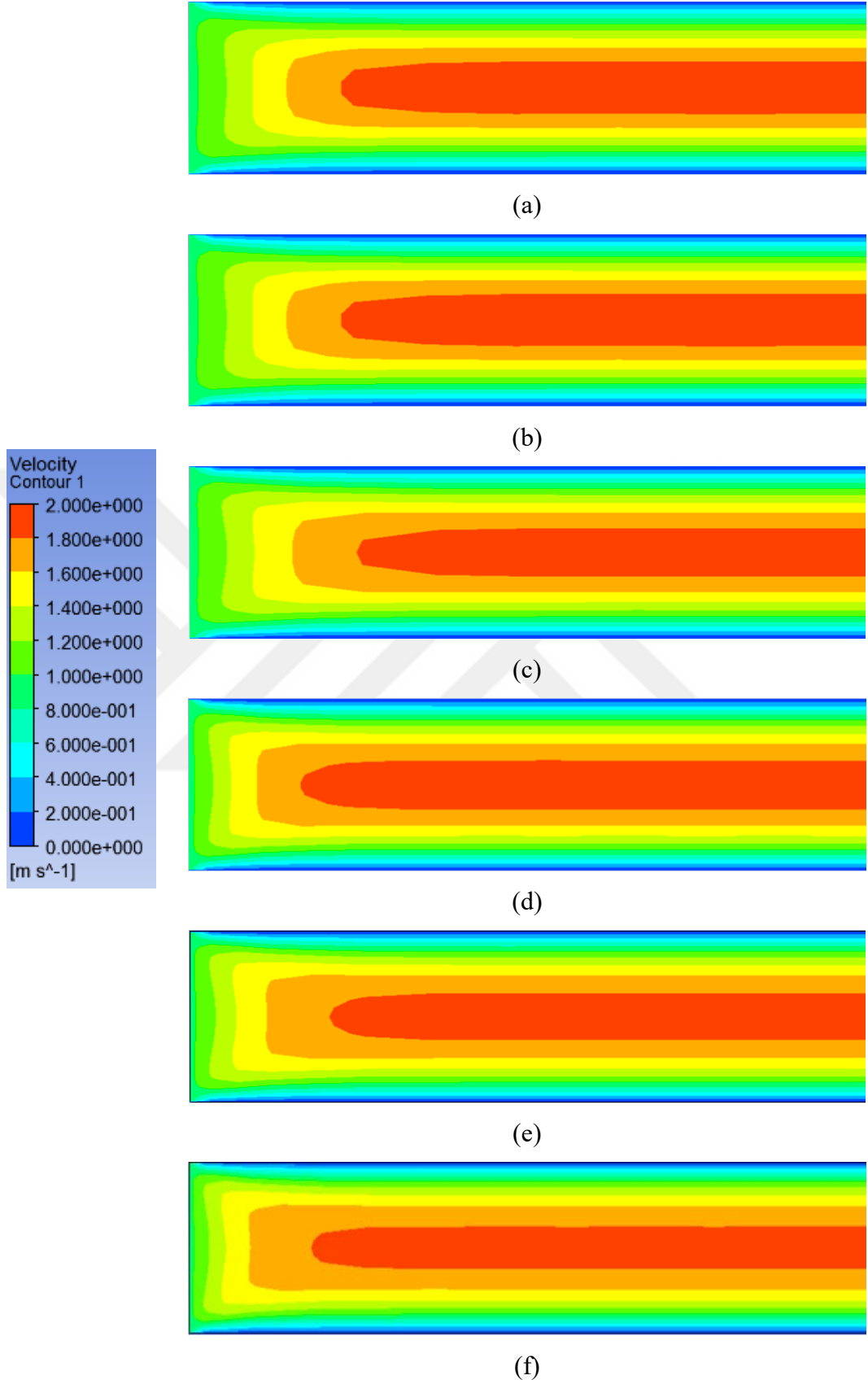
Bu bölümde, hidrolik çapı $150 \mu\text{m}$ ve uzunluğu 5 cm olan dikdörtgen kesitli mikrokanallar, hidrolik çapları sabit kalacak şekilde $\alpha = 1,0$ ile $2,0$ aralığındaki en-boy oranları için ölçülendirilerek modellenmiştir. Çalışma akışkanı olarak saf etilen glikol kullanılarak mikrokanalın en-boy oranının akışın ısı ve hidrodinamik performansı üzerine etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

6.1.1. Hız Ve Sıcaklık Dağılımları

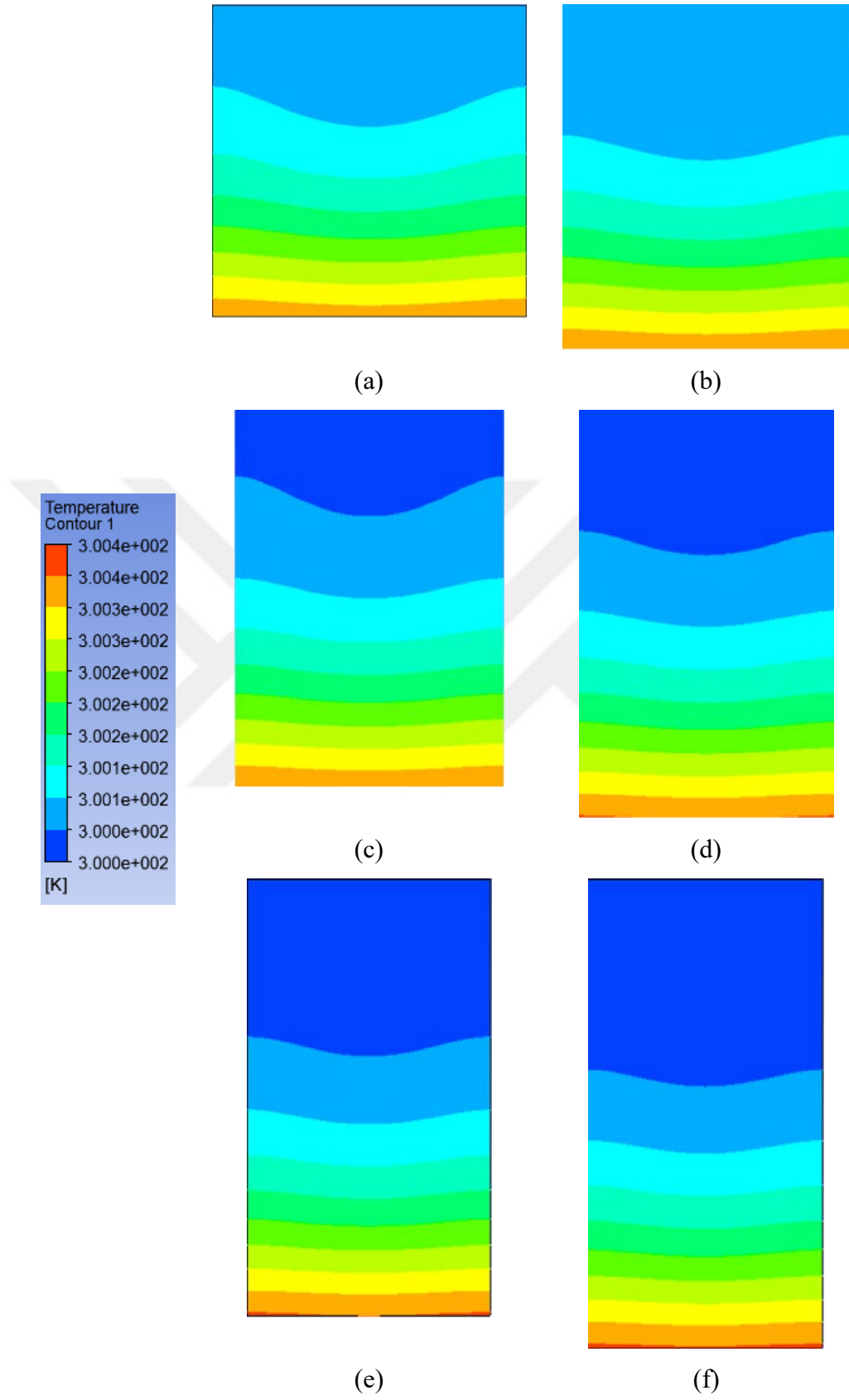
Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanallarda $Re = 10$ için, etilen glikol akışına ait hız dağılımları Şekil 6.1 ve 6.2’de, sıcaklık dağılımları ise Şekil 6.3 ve 6.4’de verilmiştir.



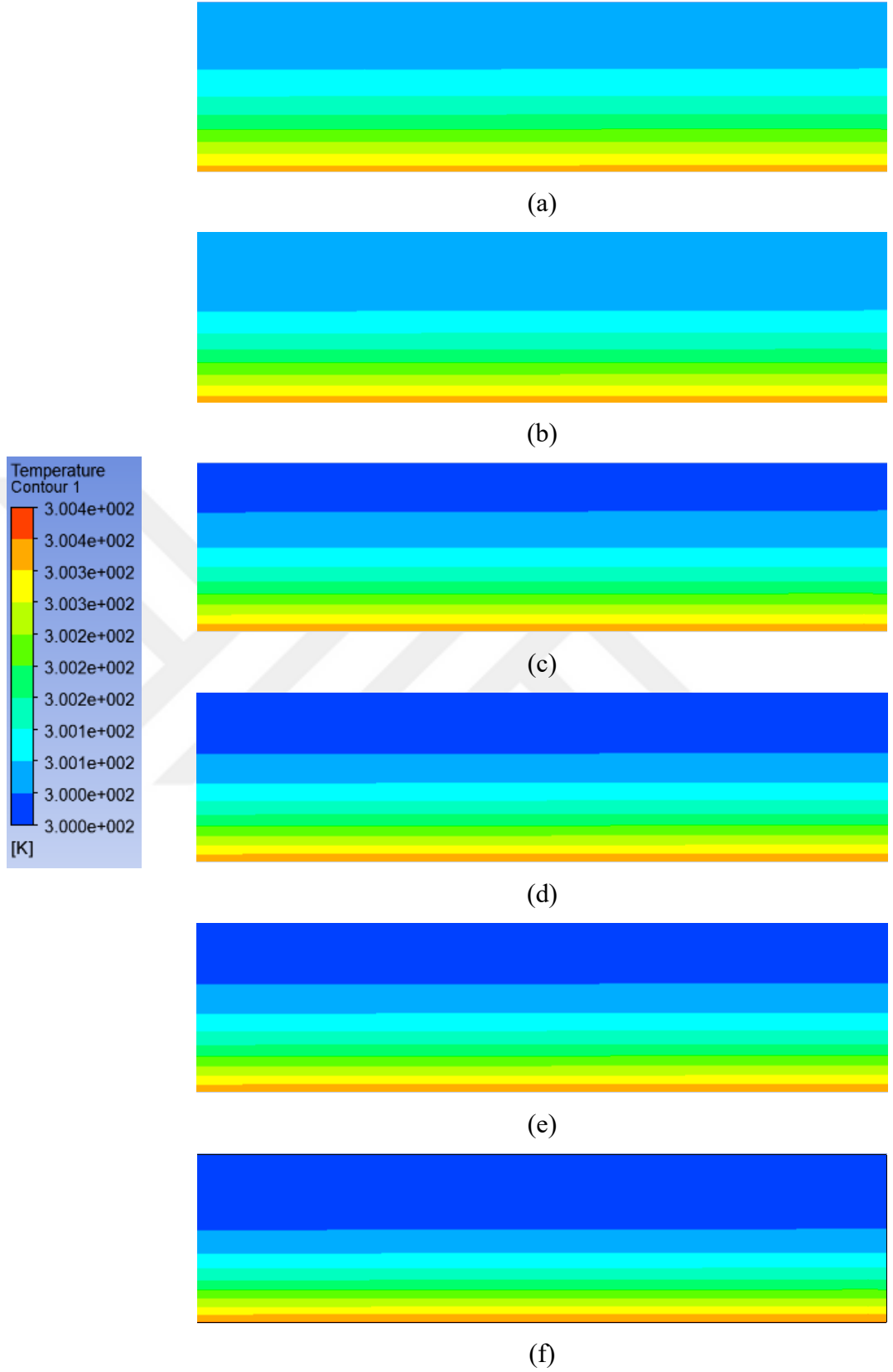
Şekil 6.1. Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanalların çıkış kesitlerindeki hız dağılımları a) $\alpha = 1,0$, b) $\alpha = 1,2$, c) $\alpha = 1,4$, d) $\alpha = 1,6$, e) $\alpha = 1,8$, f) $\alpha = 2,0$.



Şekil 6.2. Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanalların giriş bölgelerinin yan kesitlerindeki hız dağılımları a) $\alpha = 1,0$, b) $\alpha = 1,2$, c) $\alpha = 1,4$, d) $\alpha = 1,6$, e) $\alpha = 1,8$, f) $\alpha = 2,0$.



Şekil 6.3. Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanalların çıkış kesitlerindeki sıcaklık dağılımları a) $\alpha = 1,0$, b) $\alpha = 1,2$, c) $\alpha = 1,4$, d) $\alpha = 1,6$, e) $\alpha = 1,8$, f) $\alpha = 2,0$.



Şekil 6.4. Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanalların çıkış bölgelerinin yan kesitlerindeki sıcaklık dağılımları a) $\alpha = 1,0$, b) $\alpha = 1,2$, c) $\alpha = 1,4$, d) $\alpha = 1,6$, e) $\alpha = 1,8$, f) $\alpha = 2,0$.

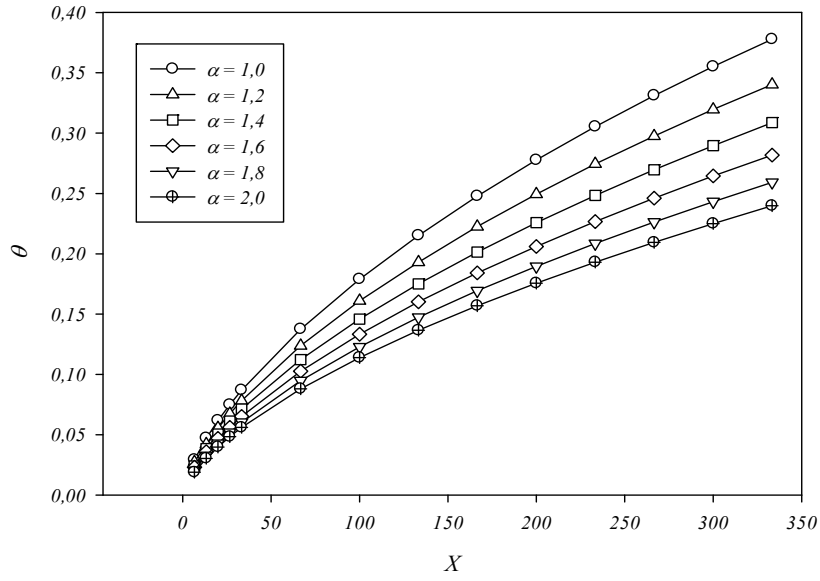
Şekil 6.1'den görüldüğü gibi, mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte mikrokanalın merkezinde oluşan yüksek hız bölgesinin mikrokanalın ısı akısı uygulanan alt yüzeyine olan uzaklığı artmaktadır. Bu durum Şekil 6.3f'den de görüldüğü gibi, mikrokanalın alt yüzey sıcaklıklarının daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Şekil 6.2 incelendiğinde akışın hidrodinamik olarak gelişmiş olduğu, ısıl olarak gelişmekte olan bölgede kaldığı görülmüştür.

Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanallarda saf etilen glikol akışının boyutsuz sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Boyutsuz sıcaklık,

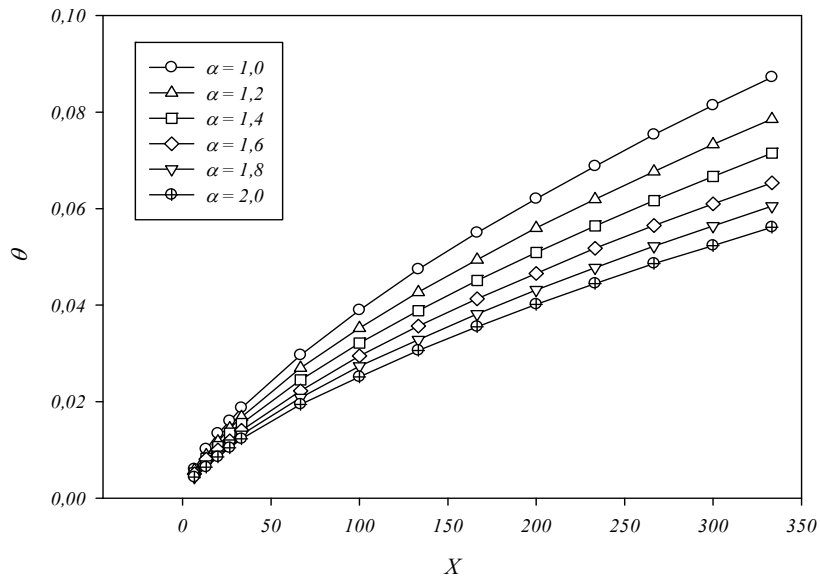
$$\theta = \frac{T - T_{giriş}}{T_{cidar} - T_{giriş}} \quad (6.1)$$

olarak tanımlanmaktadır. Farklı en-boy oranlarındaki mikrokanallar için boyutsuz sıcaklığın mikrokanal uzunluğu boyunca değişimi $Re = 10$ ve $Re = 100$ değerleri için sırasıyla Şekil 6.5a ve 6.5b'de sunulmuştur.

Şekil 6.5a ve 6.5b'den görüldüğü gibi Reynolds sayısının artmasıyla akışın boyutsuz sıcaklık değerleri azalmaktadır. Reynolds sayısının artmasından dolayı artan akış hızı cidar sıcaklığının ve akışkanın sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Fakat akışkan sıcaklığındaki azalma cidar sıcaklığındaki azalmadan daha fazla olmasından dolayı Reynolds sayısının artmasıyla akışın boyutsuz sıcaklık değerleri azalmaktadır. Ayrıca, akışkanın boyutsuz sıcaklık değerinin mikrokanalın boyutsuz uzunluğunun artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Mikrokanalın alt yüzeyinden uygulanan ısı akısından dolayı ısı transferi, mikrokanalın cidarından mikrokanala düşük sıcaklıkta giren etilen glikole doğru gerçekleşmektedir. Bundan dolayı, etilen glikol mikrokanal boyunca hareketine devam ederken sıcaklığı artmaktadır. Aynı zamanda alt yüzeyinden sabit ısı akısına maruz kalan mikrokanalın cidar sıcaklığı da mikrokanal boyunca artmaktadır. Fakat mikrokanal boyunca etilen glikolün sıcaklığında meydana gelen artış cidar sıcaklığında meydana gelen artıştan daha fazladır. Bu nedenle etilen glikolün boyutsuz sıcaklık değeri mikrokanal boyunca artmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 6.5. Boyutsuz sıcaklığın mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak mikrokanalın boyutsuz aksenal uzunluğu ile değişimi a) $Re=10$ ve b) $Re=100$.

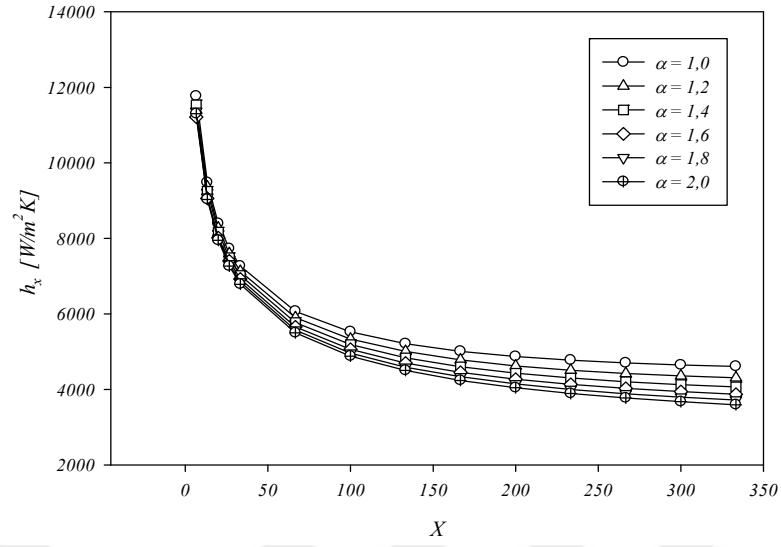
Mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla etilen glikol akışının boyutsuz sıcaklık değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. En-boy oranı $\alpha = 1,0$ olan mikrokanal için mikrokanal çıkışında etilen glikolün boyutsuz sıcaklığı $Re = 100$ için 0,0872 olarak elde edilmiştir. $\alpha = 2,0$ en-boy oranına sahip mikrokanal için ise bu değer 0,0562

olarak bulunmuştur. Mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla etilen glikolün sıcaklığı azalmakta ve aynı zamanda cidar sıcaklığı da artmaktadır. Bundan dolayı mikrokanalın en-boy oranının artması boyutsuz sıcaklığın azalmasına neden olmaktadır. Çizelge 5.1'den de görüldüğü gibi, farklı en-boy oranlarındaki mikrokanalların kesitleri ölçülendirilirken hidrolik çapın her bir durum için sabit tutulması mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla mikrokanal yüksekliğinin artmasına, mikrokanal genişliğinin ise azalmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, en-boy oranının artmasıyla mikrokanalın alt cidarından uygulanan ısı miktarı azalmakta ve akış merkezinin ısı akısı uygulanan yüzeye olan uzaklığı artmaktadır. Bu durum mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla daha düşük akışkan sıcaklığı ve daha yüksek cidar sıcaklığı elde edilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla akışkanın boyutsuz sıcaklığı azalmaktadır.

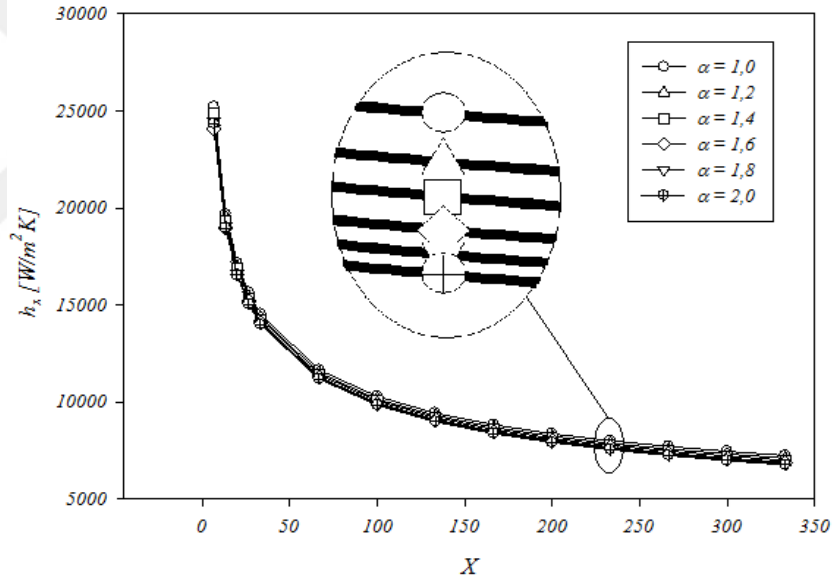
6.1.2. Isı Taşınım Katsayısı

Farklı en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda etilen glikol akışının farklı Reynolds sayıları için yerel ve ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri sırasıyla Denklem 5.13 ve 5.14 kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı en-boy oranlarındaki dikdörtgen kesitli mikrokanallarda yerel ısı taşınım katsayısının boyutsuz uzunluk ile değişimi $Re = 10$ ve $Re = 100$ için sırasıyla Şekil 6.6a ve 6.6b'de sunulmuştur.

Mikrokanalın giriş bölgesinde yerel ısı taşınım katsayısı değerlerinin yüksek olduğu ve mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu boyunca azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum mikrokanalın giriş bölgesinde cidar sıcaklığı ile etilen glikolün sıcaklığı arasındaki farkın çok küçük olması ve mikrokanal boyunca aradaki bu fark değerinin artmasından kaynaklanmaktadır.



(a)



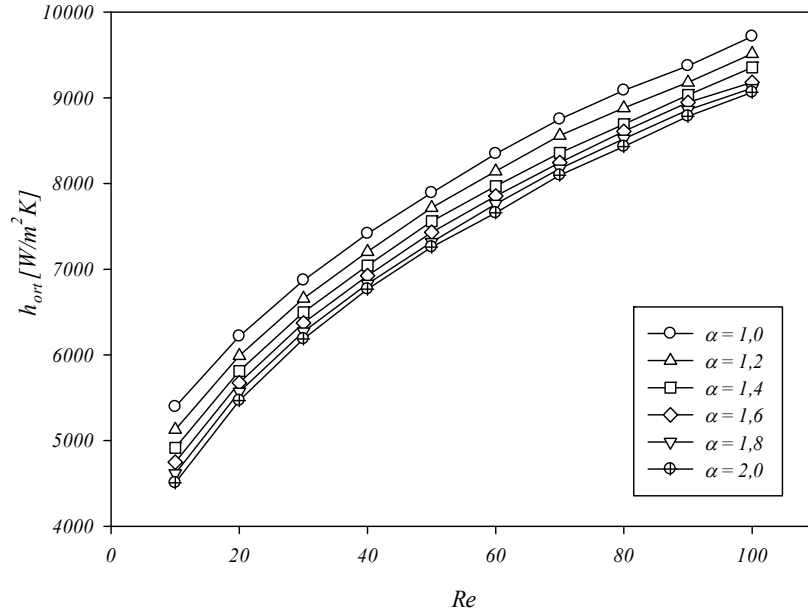
(b)

Şekil 6.6. Yerel ısı taşınım katsayısının mikrok kanalın en-boy oranına bağlı olarak mikrok kanalın boyutsuz aksel uzunluğu ile değişimi a) $Re=10$ ve b) $Re=100$.

Farklı en-boy oranlarına sahip dikdörtgen kesitli mikrok kanalda ortalama ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi ise Şekil 6.7'de gösterilmiştir.

Şekil 6.7'den görüldüğü üzere, etilen glikolün ortalama ısı taşınım katsayısı Reynolds sayısının artmasıyla artmaktadır. Reynolds sayısının artmasından

kaynaklanan akış hızındaki artış, etilen glikolün sıcaklığının ve cidar sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Fakat cidar sıcaklığındaki azalma akışkan sıcaklığındaki azalmadan daha fazladır. Bundan dolayı, Reynolds sayısının artmasıyla cidar sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki fark azalmaktadır. Bu durum ısı taşınım katsayısının artmasına neden olmaktadır



Şekil 6.7. Ortalama ısı taşınım katsayısının mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte sabit Reynolds sayısında ısı taşınım katsayısının azaldığı tespit edilmiştir. $Re = 10$ için, $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda ortalama ısı taşınım katsayısı $5393,97 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak elde edilirken, $\alpha = 2,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda $4506,74 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak elde edilmiştir. Bu değerlere göre, $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değeri, $\alpha = 2,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değerine göre % 19,69 daha fazladır. $Re = 100$ için ise, $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda ortalama ısı taşınım katsayısı $9718,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak elde edilirken, $\alpha = 2,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda $9066,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak elde edilmiştir. Buna göre, $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değeri $\alpha =$

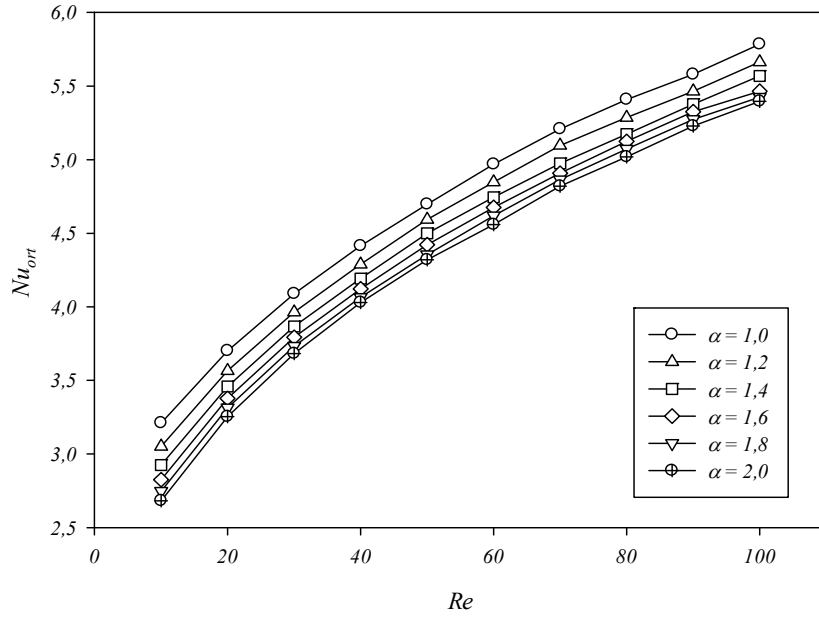
2,0'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değerine göre % 7,18 daha büyük olduğu görülmüştür.

Mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla etilen glikolün sıcaklığı azalmakta, cidar sıcaklığı ise artmaktadır. Dolayısıyla, cidar sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı arasındaki fark artmaktadır. Bu durum ortalama ısı taşınım katsayısının azalmasına neden olmaktadır.

6.1.3. Nusselt Sayısı

Farklı en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda etilen glikol akışımın ortalama Nusselt sayısı değerleri Denklem 5.11 kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir en-boy oranı için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.8'de gösterilmiştir.

Ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Bu durum Reynolds sayısındaki artışla birlikte ortalama ısı taşınım katsayısının artmasından kaynaklanmaktadır. Aynı şekilde, mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte ortalama ısı taşınım katsayısının azalmasından dolayı ortalama Nusselt sayısı da azalmaktadır. $Re = 10$ 'da $\alpha = 1,0$ ve $\alpha = 2,0$ için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değerleri sırasıyla 3,21 ve 2,68 iken, $Re = 100$ 'de elde edilen ortalama Nusselt sayısı değerleri ise sırasıyla 5,78 ve 5,40'dır.



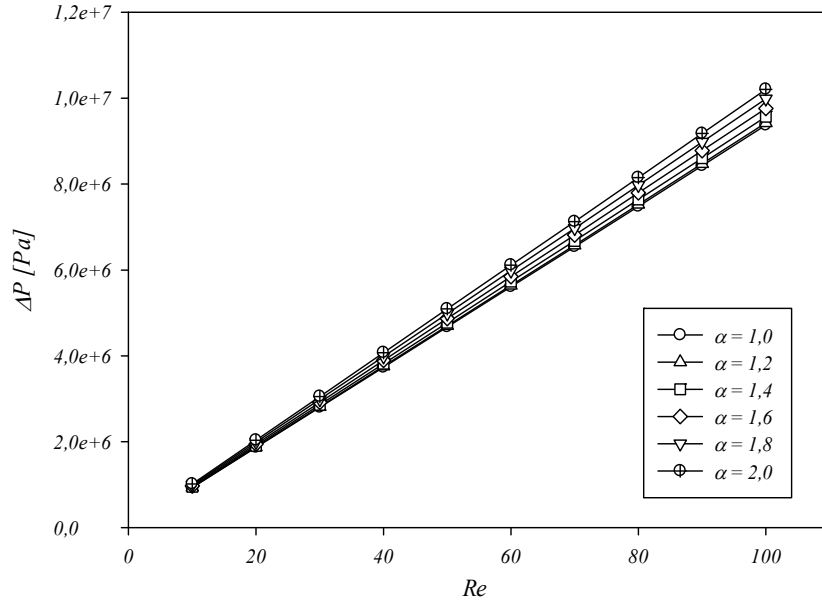
Şekil 6.8. Ortalama Nusselt sayısının mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

6.1.4. Basınç Düşümü

Farklı en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda etilen glikol akışı için basınç düşümünün Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.9’da verilmiştir.

Mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte etilen glikol akışının basınç düşümü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. $\alpha = 2,0$ değerine sahip mikrokanalda elde edilen basınç düşümü değerleri $\alpha = 1,0$ değerine sahip mikrokanaldaki değerlere kıyasla $Re=10$ için %9,05, $Re=100$ için ise %8,91 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, sabit hidrolik çapta mikrokanalın en-boy oranının artırılması sonucu mikrokanalın toplam yüzey alanının artmasından kaynaklanmaktadır.

Mikrokanalda etilen glikol akışının basınç düşümü değerlerinin Reynolds sayısının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Basınç düşümündeki bu artış Reynolds sayısının artması sonucu artan akış hızından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.9. Basınç düşümünün mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

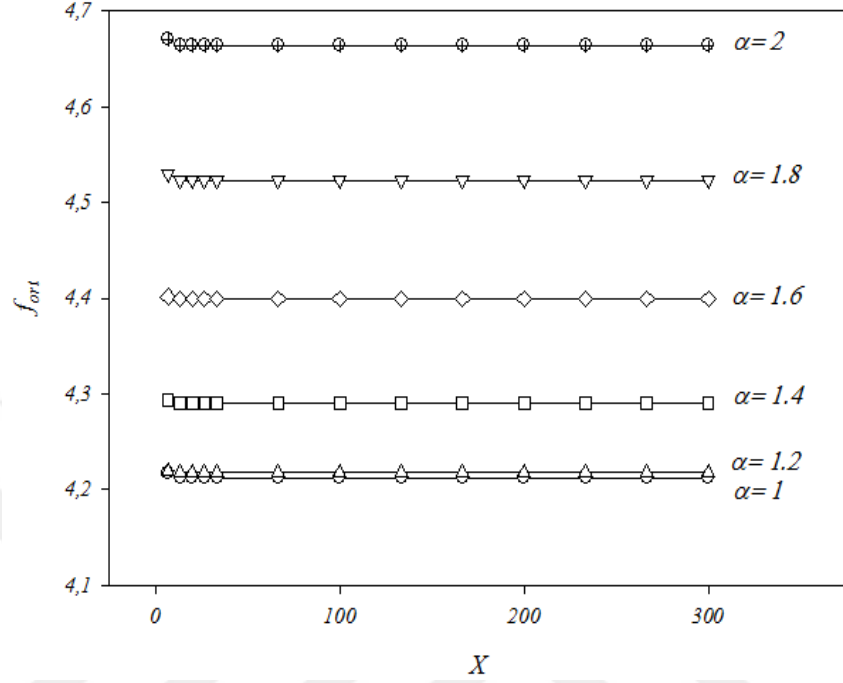
6.1.5. Darcy Sürtünme Faktörü

Farklı en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda yerel ve ortalama Darcy sürtünme faktörü değerleri Denklem 5.15 ve 5.16 kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir en-boy oranındaki mikrokanal için hesaplanan yerel Darcy sürtünme faktörü değerlerinin mikrokanalın aksenal boyutsuz uzunluğu ile değişimi, $Re = 10$ ve $Re = 100$ için sırasıyla Şekil 6.10a ve 6.10b'de gösterilmiştir.

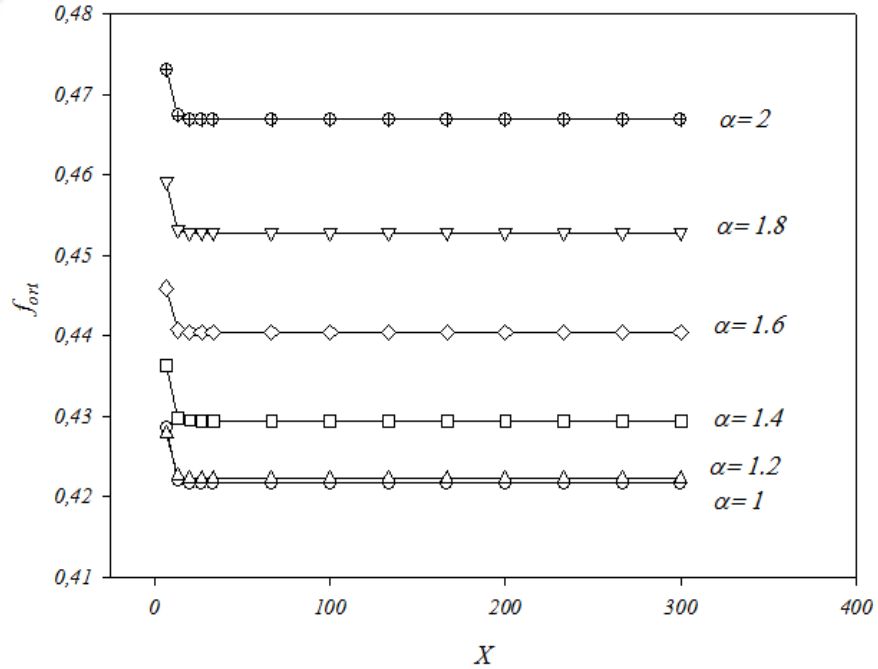
Şekil 6.10a ve 6.10b'den de görüldüğü gibi, mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte etilen glikolün yerel Darcy sürtünme faktörü değerleri artmaktadır. Bu artış, mikrokanalın en-boy oranının artması sonucu akışın basınç düşümü değerinin artmasından kaynaklanmaktadır.

Akışın yerel Darcy sürtünme faktörünün Reynolds sayısının artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir. Artan Reynolds sayısı değerlerine karşılık gelen hız değerleri de artmaktadır. Akış hızındaki artış akışın basınç düşümü ve kayma gerilmesi değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Fakat, Denklem 5.15'e göre hızdaki artış

değerinin etkisi kayma gerilmesindeki artışın etkisinden daha fazla olduğundan yerel Darcy sürtünme faktörü değeri Reynolds sayısının artmasıyla azalmaktadır.



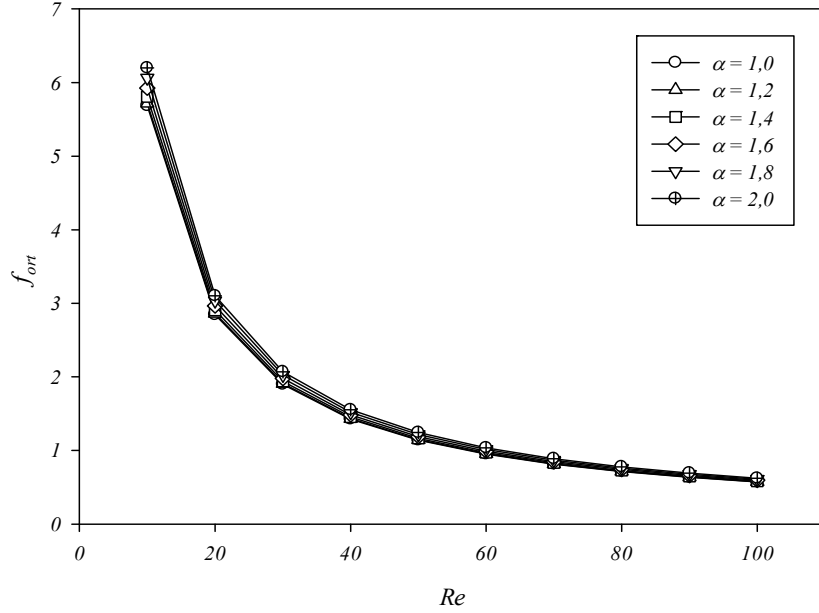
(a)



(b)

Şekil 6.10. Yerel Darcy sürtünme faktörünün mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak mikrokanalın boyutsuz aksenal uzunluğu ile değişimi a) $Re=10$ ve b) $Re=100$.

Farklı en-boy oranlarına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanalda ortalama Darcy sürtünme faktörü değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.11’de gösterilmektedir.



Şekil 6.11. Ortalama Darcy sürtünme faktörünün mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla akışın ortalama Darcy sürtünme faktörü artmaktadır. En yüksek ortalama Darcy sürtünme faktörü değerleri $\alpha = 2,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda elde edilmiştir. $\alpha = 2,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda elde edilen ortalama Darcy sürtünme faktörü değerleri $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda elde edilen değerlerden $Re = 10$ 'da %9,05, $Re = 100$ 'de %8,91 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

6.1.6. Isıl Direnç Ve Pompalama Gücü

Akışın ısı direnci ve akışın gerçekleştirilmesi için gerekli olan pompalama gücü sırasıyla,

$$R_{th} = \frac{T_{cidar} - T_{giriş}}{\dot{Q}_{giriş}} \quad (6.2)$$

$$\dot{W}_p = U_{giriş} A_{kesit} \Delta P \quad (6.3)$$

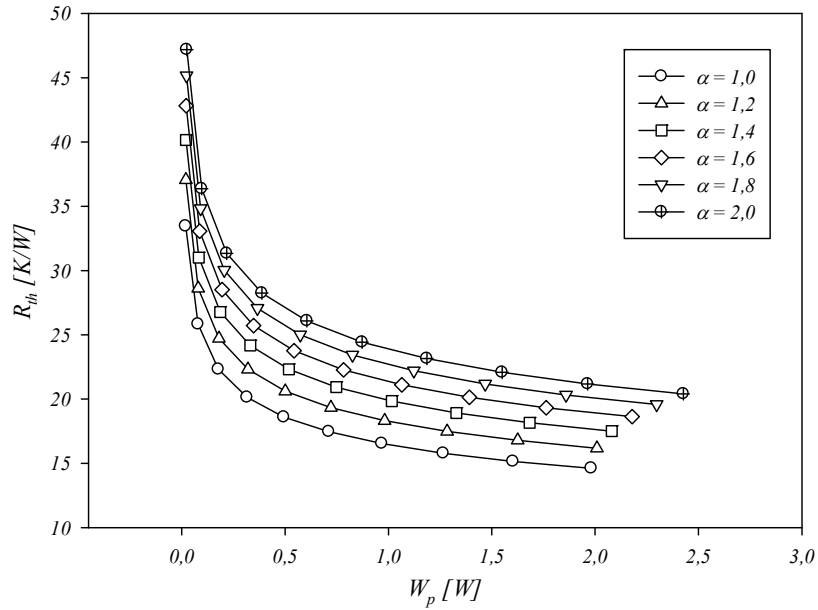
şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $\dot{Q}_{giriş}$ cidardan akışkana birim zamanda transfer edilen ısı miktarını ifade etmektedir ve,

$$\dot{Q}_{giriş} = \dot{q}'' A_{yüzey} \quad (6.4)$$

olarak yazılabilir.

Her bir en-boy oranındaki mikrokanallar için belirlenen Reynolds sayısı aralığında akışın ısıl direnci ve gerekli olan pompalama gücü değerleri hesaplanmıştır. Farklı en-boy oranına sahip mikrokanallardaki akışın ısıl direncinin pompalama gücüne göre değişimi Şekil 6.12’de gösterilmiştir.

Şekil 6.12’den de görüldüğü gibi, belirlenen bir pompalama gücüne karşılık gelen ısıl direnç değeri mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte artmaktadır. En düşük ısıl direnç değerleri $\alpha = 1,0$ ’lik en-boy oranına sahip mikrokanal için elde edilmiştir.



Şekil 6.12. Mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak pompalama gücüne karşılık gelen ısıl direnç değerleri.

6.1.7. Entropi Üretimi

Entropi moleküler düzensizliğin bir ölçüsüdür. Entropi analizi termodinamiğin ikinci yasasına dayanmaktadır ve herhangi bir ısı sistemini performansının doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Entropi üretimi akış sürtünmesi ve ısı transferinden kaynaklanan tersinmezlikler hakkında da bilgi vermektedir [67].

Bir akışta meydana gelen toplam entropi üretimi akışta meydana gelen ısı transferinden ve akış sürtünmesinden kaynaklanan entropi üretimlerinden oluşmaktadır ve,

$$\dot{S}'_{\text{üretim, toplam}} = \dot{S}'_{\text{üretim, ısı transferi}} + \dot{S}'_{\text{üretim, akış sürtünmesi}} \quad (6.5)$$

şeklinde ifade edilir. Akıştaki ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi,

$$\dot{S}'_{\text{üretim, ısı transferi}} = \frac{q''^2 \pi D_h^2}{k T_{\text{ort}}^2 Nu} \quad (6.6)$$

olarak ifade edilmektedir [67,68]. Akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi ise,

$$\dot{S}'_{\text{üretim, akış sürtünmesi}} = \frac{8 \dot{m}^3}{\pi^2 \rho^2 T_{\text{ort}}} \frac{f}{D_h^5} \quad (6.7)$$

olarak tanımlanmaktadır [67,68]. Burada \dot{m} akışın kütleli debisidir ve,

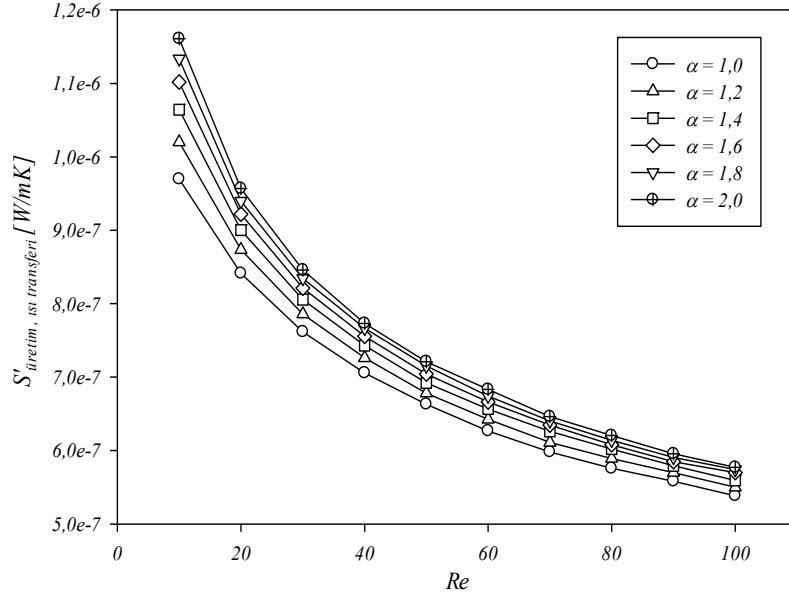
$$\dot{m} = \rho A_{\text{kesit}} U_{\text{giriş}} \quad (6.8)$$

şeklinde yazılabilir. Akışın Bejan sayısı ise

$$Be = \frac{\dot{S}'_{\text{üretim,ısı transferi}}}{\dot{S}'_{\text{üretim,ısı transferi}} + \dot{S}'_{\text{üretim,akış sürtünmesi}}} \quad (6.9)$$

olarak ifade edilmektedir. Bejan sayısı ısı transferinden kaynaklanan tersinmezliklerin toplam tersinmezliğe oranını ifade etmektedir.

Farklı en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda etilen glikol akışının ısı transferinden kaynaklanan entropi üretimi Denklem 6.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Isı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.13'de gösterilmiştir.



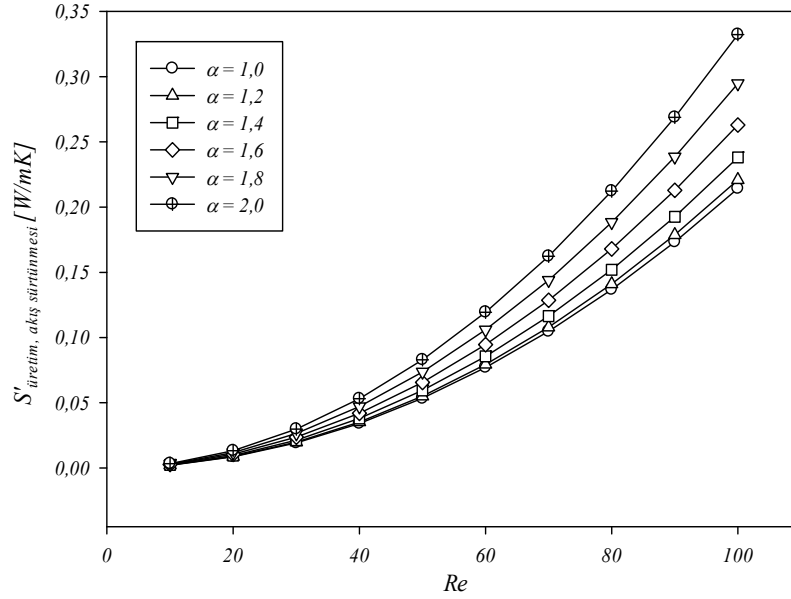
Şekil 6.13. Isı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Şekil 6.13'den de görüldüğü üzere, Reynolds sayısının artmasıyla birlikte ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi azalmaktadır. Sabit Reynolds sayısı değerlerinde, mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri artmaktadır. $Re = 10$ 'da, $\alpha = 1,0$ ve $\alpha = 2,0$ en-boy oranına sahip mikrokanallarda elde edilen ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri sırasıyla $9,6979 \times 10^{-7}$ W/mK ve $1,1609 \times 10^{-6}$ W/mK'dir. $\alpha = 2,0$ en-boy

oranına sahip mikrokanal için elde edilen ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanal için elde edilen değerlerden $Re = 10$ için %19,71, $Re = 100$ için ise %7,19'daha fazladır.

Mikrokanalın en-boy oranının artması sonucunda akışın ortalama sıcaklığı ve ortalama Nusselt sayısı değerleri azalmaktadır. Bunun sonucunda, mikrokanalın en-boy oranının artması ile akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri artmaktadır.

Farklı en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda etilen glikol akışının akış sürtünmesinden kaynaklanan entropi üretimi Denklem 6.7 kullanılarak hesaplanmıştır. Akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.14'de verilmiştir.



Şekil 6.14. Akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

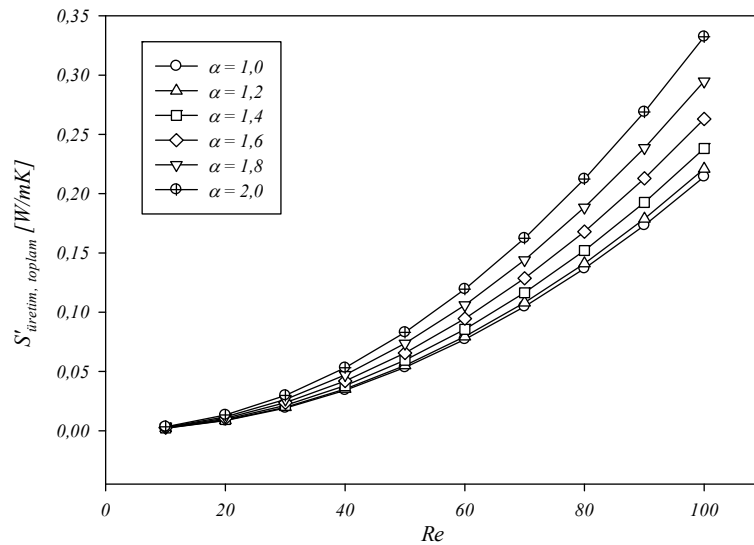
Akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi Reynolds sayısının artmasıyla birlikte artmaktadır. Bu durum, Reynolds sayısının artmasıyla

birlikte etilen glikolün ortalama sıcaklığının azalmasından ve esasen akışın hız değerlerinin artmasından kaynaklanmaktadır.

Akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte artmaktadır. $Re = 100$ 'de, $\alpha = 1,0$ ve $\alpha = 2,0$ en-boy oranına sahip mikrokanallarda elde edilen akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri sırasıyla $0,2143 \text{ W/mK}$ ve $0,3323 \text{ W/mK}$ 'dir. $\alpha = 2,0$ 'lık en-boy oranına sahip mikrokanal için elde edilen akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri $\alpha = 1,0$ için elde edilen değerlerden $Re = 10$ 'da %55,29, $Re = 100$ 'de ise %55,06 daha fazladır.

Mikrokanalın en-boy oranının artması sonucunda etilen glikolün ortalama sıcaklığı azalmaktadır. Ayrıca, mikrokanalın en-boy oranının artması ortalama Darcy sürtünme faktörünün artmasına neden olmaktadır. Mikrokanalın en-boy oranının artması sonucu meydana gelen bu etkiler akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimini arttırmaktadır.

Her bir en-boy oranı için elde edilen birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerleri ise Şekil 6.15'de sunulmuştur.

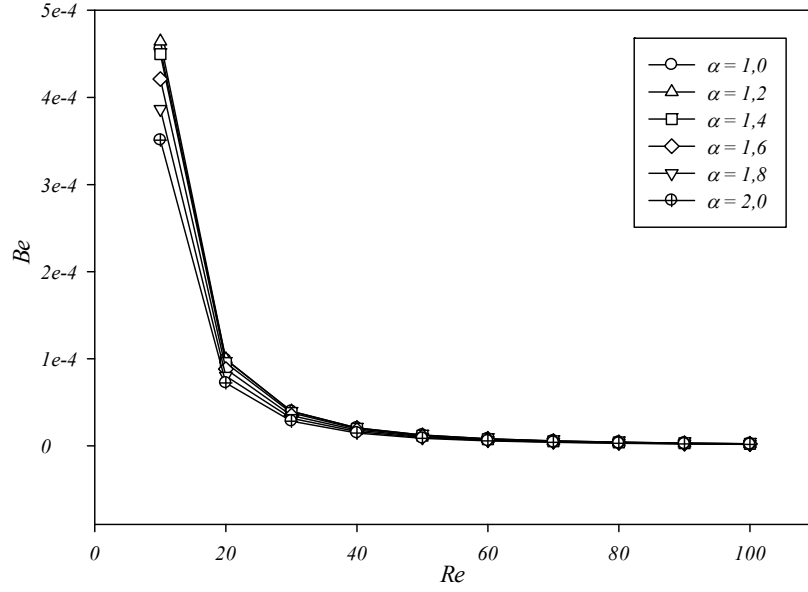


Şekil 6.15. Birim uzunluk başına toplam entropi üretiminin mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Şekil 6.15'den de görüldüğü üzere, akışın birim uzunluk başına toplam entropi üretimi mikrok kanalın en-boy oranının artmasıyla artmaktadır. Birim uzunluk başına toplam entropi üretimi için elde edilen değerler akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi için elde edilen değerler ile aynıdır. Isı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerlerine kıyasla çok küçüktür. Bundan dolayı, ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri birim uzunluk başına toplam entropi üretiminin hesaplanmasında etkisiz kalmıştır. Bu durum, mikrok kanalların hidrolik çaplarının çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimini ifade eden Denklem 6.7'nin payda terimlerinde hidrolik çapın beşinci dereceden kuvveti yer almaktadır. Çalışmada kullanılan mikrok kanal hidrolik çapı değeri $150 \mu m$ gibi küçük bir değer olmasından dolayı, birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değeri için akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değeri baskın hale gelmiştir. Bu durum, Sohel et al. [68] tarafından yapılan çalışmada da belirtilmiştir.

Farklı en-boy oranlarındaki dikdörtgen kesitli mikrok kanallarda etilen glikol akışı için elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrok kanalın performans olarak çalışmada kullanılan diğer mikrok kanallardan üstün olduğu tespit edilmiştir. En yüksek ısı taşınım katsayılarının ve ortalama Nusselt sayılarının elde edildiği $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrok kanal için ısıl açıdan çalışmada kullanılan diğer mikrok kanallara kıyasla daha yüksek performans elde edilmiştir. $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrok kanal çalışmada kullanılan diğer mikrok kanallara göre en düşük basınç düşümü ve Darcy sürtünme faktörü değerlerine sahip olmasından dolayı diğer mikrok kanallara kıyasla hidrodinamik olarak da daha avantajlıdır.

Farklı en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrok kanallarda etilen glikol akışının Bejan sayısı değerleri Denklem 6.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Bejan sayısının Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.16'da sunulmuştur.



Şekil 6.16. Bejan sayısının mikrokanal en-boy oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte akışın Bejan sayısı azalmaktadır. Bu durum, mikrokanalın en-boy oranının artmasıyla birlikte ısı transferinden kaynaklanan entropi üretimi değerinin toplam entropi üretimi içerisindeki payının azaldığını ifade etmektedir.

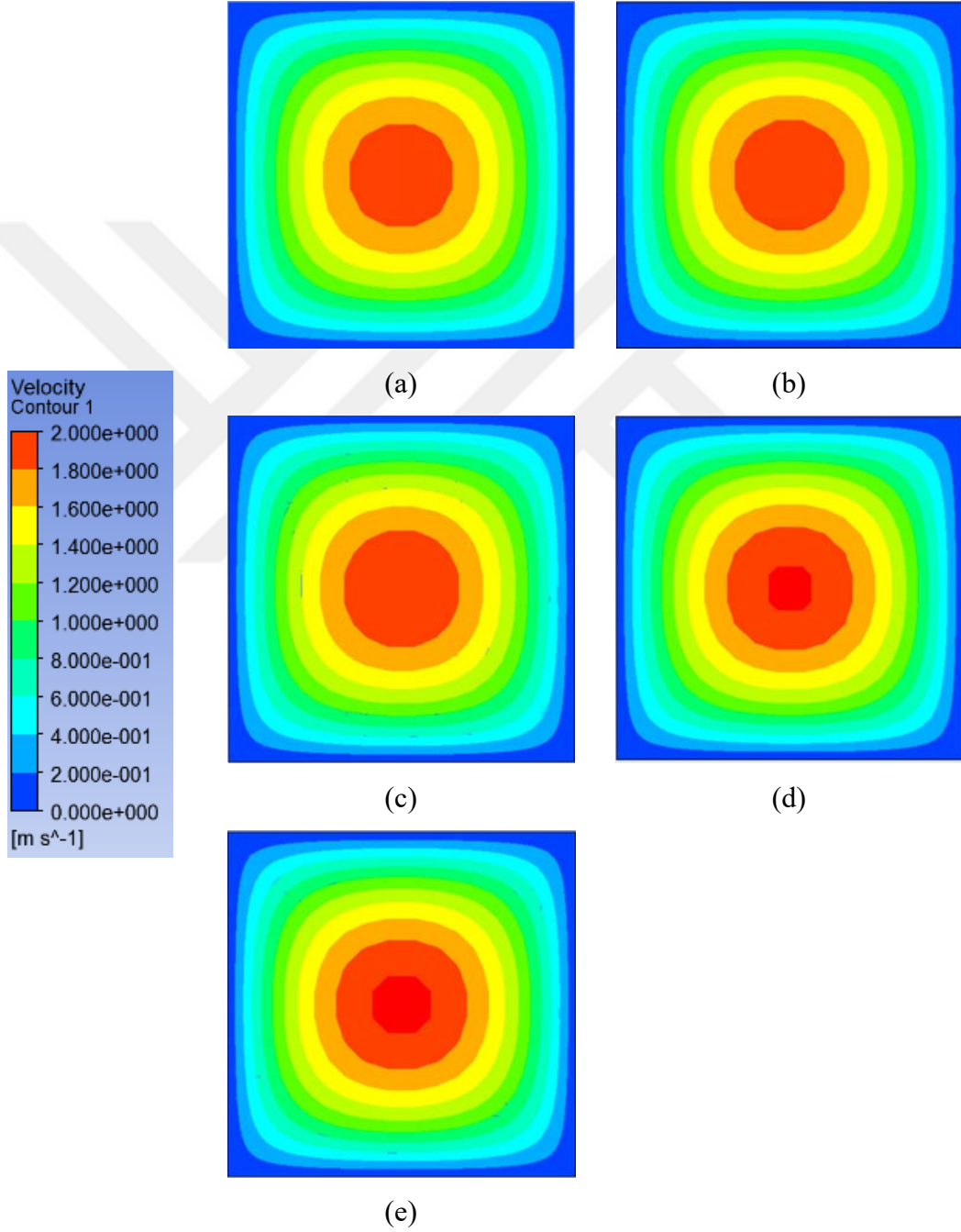
6.2. MİKROKANALDA ZnO-EG NANOAKIŞKAN AKIŞININ TEK FAZLI OLARAK MODELLENMESİ

Çalışmanın bu kısmında, $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda çalışmada kullanılan diğer mikrokanallara kıyasla daha iyi performans elde edilmesinden dolayı sadece $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanal için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

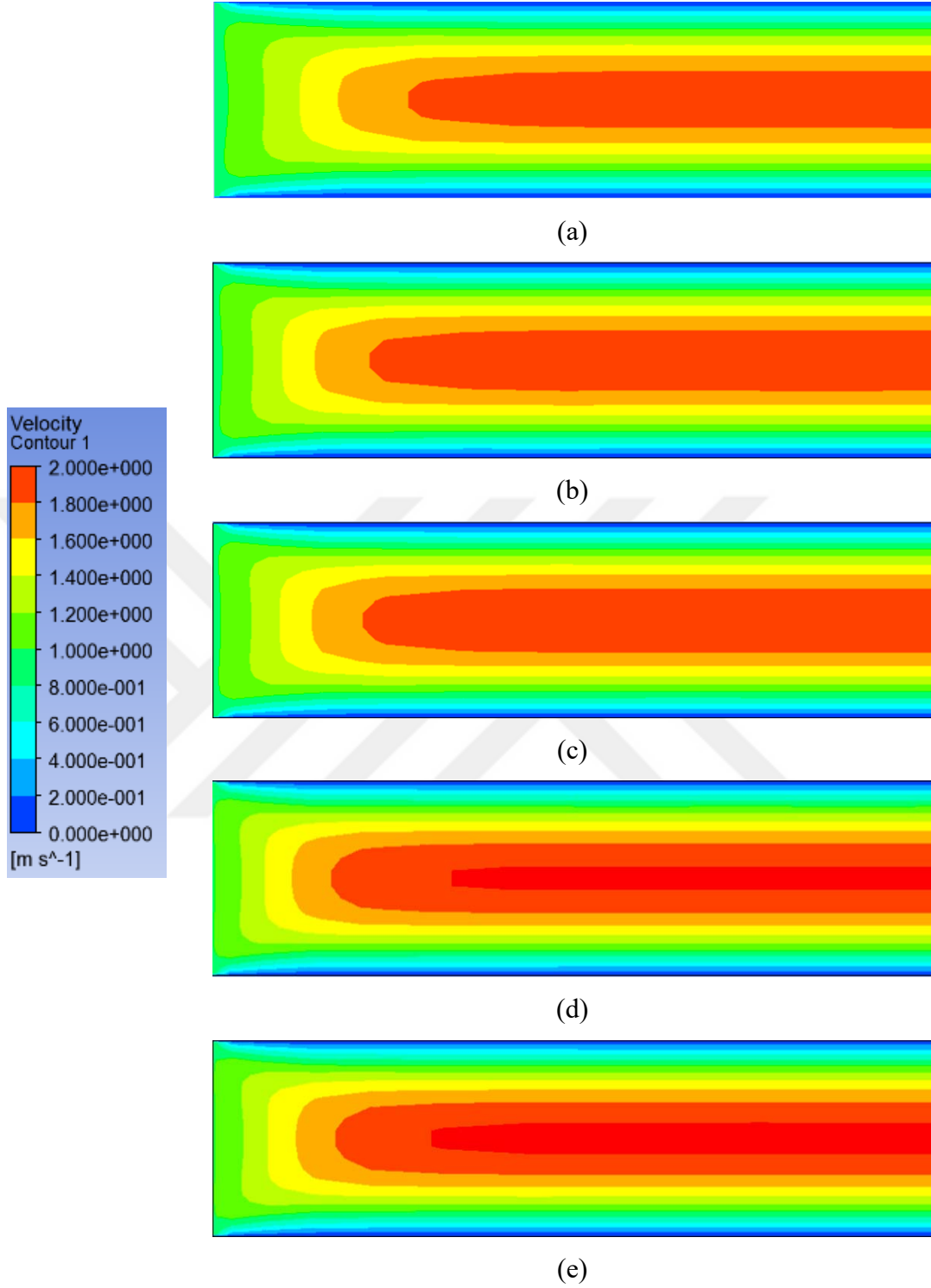
$\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanalda farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ($\varphi_{np} = \%1,0 - \%4,0$) ZnO-EG nanoakışkanlarının akış ve ısı taşınım karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir.

6.2.1. Hız Ve Sıcaklık Dağılımları

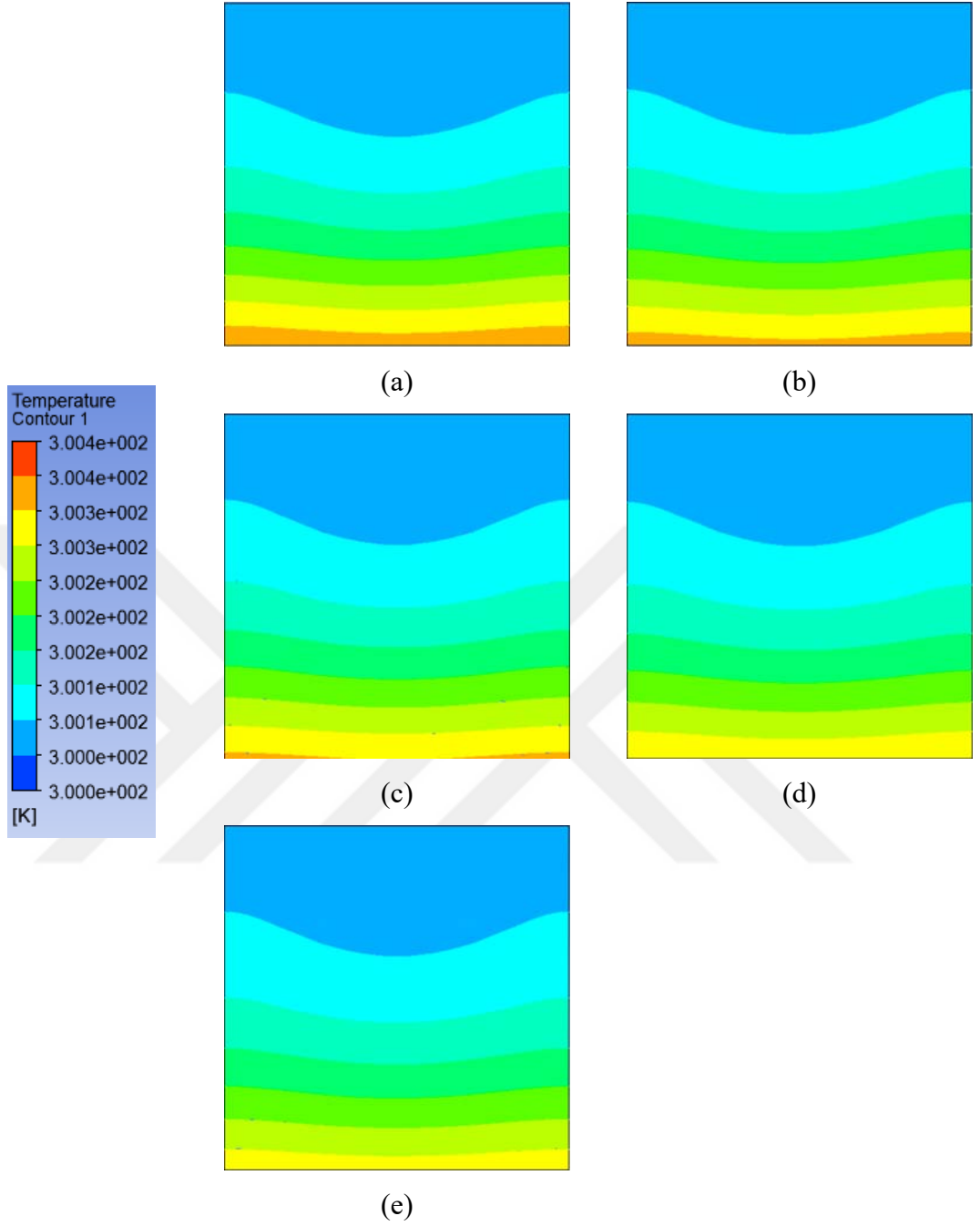
Re = 10 için, $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanalda farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanına ait hız dağılımları Şekil 6.17 ve 6.18'de, sıcaklık dağılımları ise Şekil 19 ve 20'de gösterilmiştir.



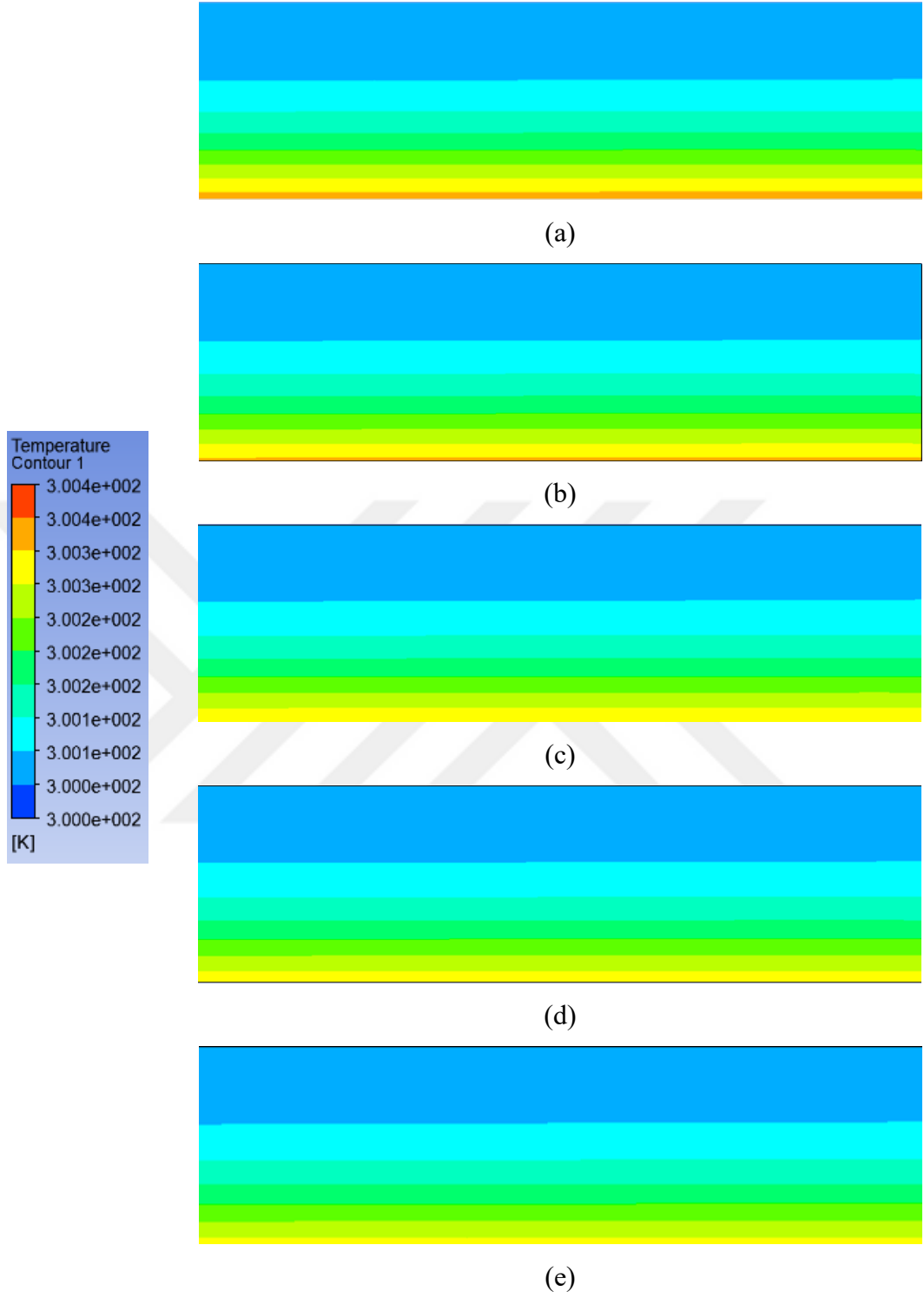
Şekil 6.17. Tek fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış kesitindeki hız dağılımları a) $\varphi_{np} = \%0$, b) $\varphi_{np} = \%1,0$, c) $\varphi_{np} = \%2,0$, d) $\varphi_{np} = \%3,0$, e) $\varphi_{np} = \%4,0$.



Şekil 6.18. Tek fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal giriş bölgesinin yan kesitindeki hız dağılımları a) $\varphi_{np} = \%0$, b) $\varphi_{np} = \%1,0$, c) $\varphi_{np} = \%2,0$, d) $\varphi_{np} = \%3,0$, e) $\varphi_{np} = \%4,0$.



Şekil 6.19. Tek fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımları a) $\varphi_{np} = \%0$, b) $\varphi_{np} = \%1,0$, c) $\varphi_{np} = \%2,0$, d) $\varphi_{np} = \%3,0$, e) $\varphi_{np} = \%4,0$.



Şekil 6.20. Tek fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış bölgesinin yan kesitindeki sıcaklık dağılımları a) $\varphi_{np} = \%0$, b) $\varphi_{np} = \%1,0$, c) $\varphi_{np} = \%2,0$, d) $\varphi_{np} = \%3,0$, e) $\varphi_{np} = \%4,0$.

Şekil 6.17 ve 6.18'den görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın hız değerleri artmaktadır. Tek fazlı modellemede, nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte yoğunluk ve viskozite değerleri artmaktadır. Yapılan çalışmada, etilen glikole ZnO nanopartikülü ilavesi ile nanoakışkanının viskozitesinde meydana gelen artışın yoğunluğunda meydana gelen artıştan daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı, belirli bir Reynolds sayısı için yapılan analizlerde, nanoakışkanın nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte Reynolds sayısına karşılık gelen hız değerleri artmaktadır.

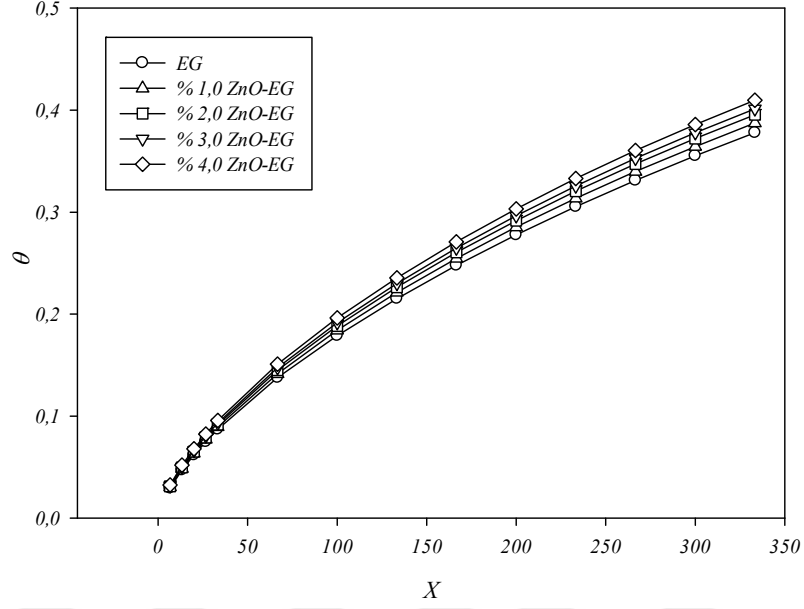
Şekil 6.19 ve 6.20'de gösterilen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte mikrokanalın ısı akısı uygulanan alt yüzeyinin sıcaklığının azaldığı görülmektedir.

$\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanal, farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının boyutsuz sıcaklık değerleri Denklem 6.1 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanal için, farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının $Re = 10$ 'da ve $Re = 100$ 'de boyutsuz sıcaklık değerlerinin mikrokanalın boyutsuz aksenal uzunluğu boyunca değişimi sırasıyla Şekil 6.21a ve 6.21b'de gösterilmiştir.

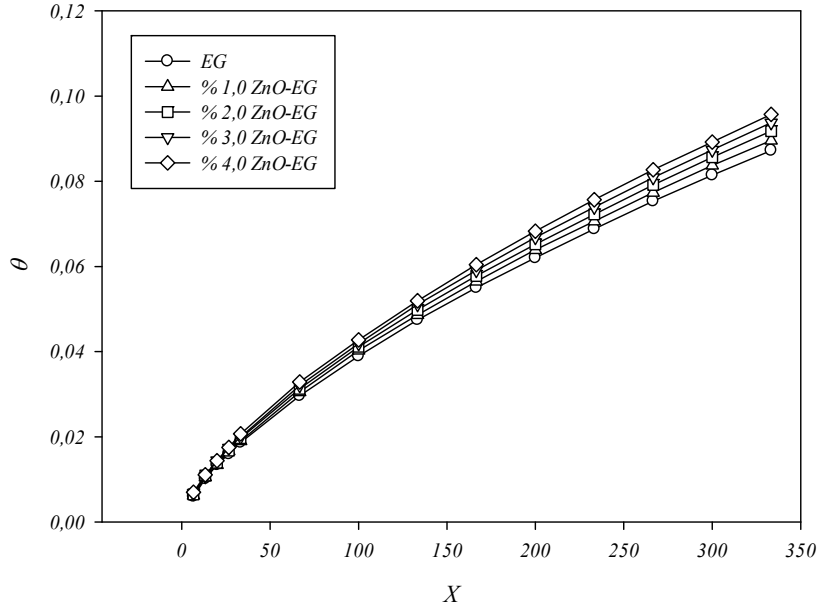
Şekil 6.21a ve 6.21b'de görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla nanoakışkanın boyutsuz sıcaklık değerlerinin arttığı görülmüştür. Akışkana nanopartikül ilavesi akışkanın sıcaklığı ve cidar sıcaklığı değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Cidar sıcaklığında meydana gelen azalmanın akışkanın sıcaklığında meydana gelen azalmadan daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı etilen glikole ZnO nanopartikül ilavesi akışkanın boyutsuz sıcaklığının artmasına neden olmuştur.

Şekil 6.21a ve 6.21b'de görüldüğü gibi, akışın Reynolds sayısının artmasıyla ZnO-EG nanoakışkanının boyutsuz sıcaklık değerleri azalmıştır. Reynolds sayısının artmasına bağlı olarak artan akış hızı nanoakışkanın sıcaklığının ve cidar sıcaklığının

azalmasına neden olmuştur. Fakat akışkan sıcaklığında meydana gelen azalma cidar sıcaklığında meydana gelen azalmadan daha fazla olduğundan Reynolds sayısının artması sonucunda nanoakışkanın boyutsuz sıcaklık değerleri azalmıştır.



(a)



(b)

Şekil 6.21. Tek fazlı akış modellemesi için boyutsuz sıcaklığın ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak mikrokana1ın boyutsuz aksenal uzunluğu ile değişimi a) Re=10 ve b) Re=100.

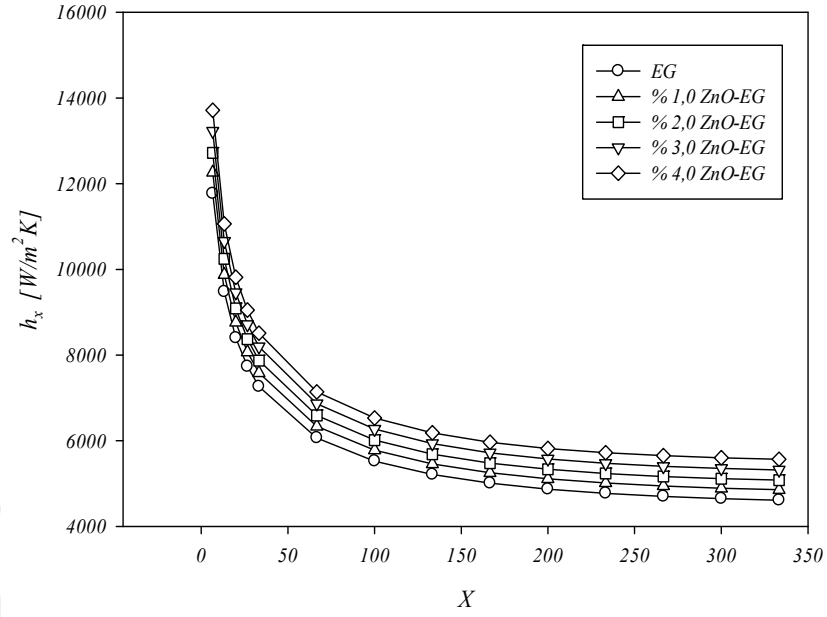
Şekil 6.21a ve 6.21b’de görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının boyutsuz sıcaklığı mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu boyunca artmıştır. Mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu boyunca nanoakışkanın sıcaklığının ve cidar sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir. Fakat, nanoakışkanın sıcaklığında meydana gelen artış cidar sıcaklığında meydana gelen artıştan daha fazla olduğundan, mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu boyunca nanoakışkanın boyutsuz sıcaklık değeri artmıştır.

6.2.2. Isı Taşınım Katsayısı

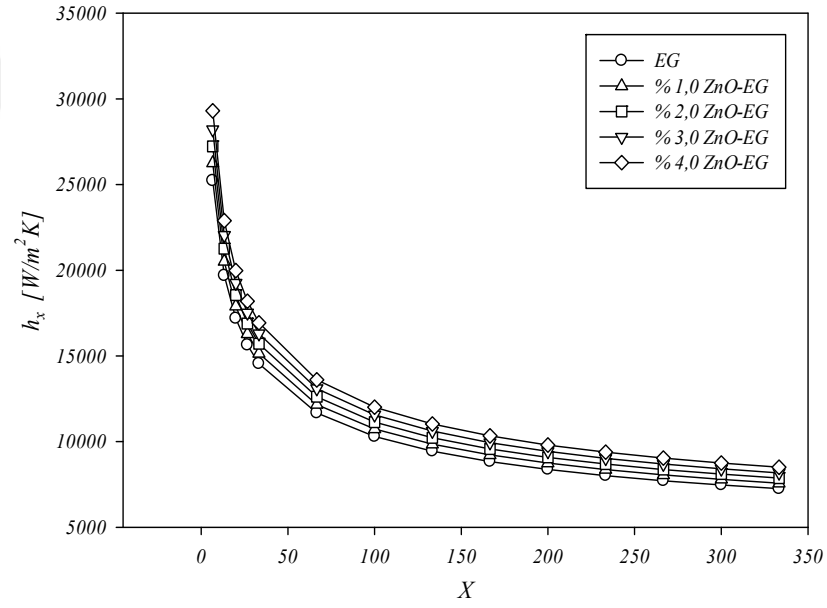
Farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanının yerel ısı taşınım katsayısı değerleri Denklem 5.13 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen yerel ısı taşınım katsayısı değerinin mikrokanal boyutsuz eksenel uzunluğu boyunca değişimi $Re = 10$ ve $Re = 100$ için sırasıyla Şekil 6.22a ve 6.22b’de gösterilmiştir.

Şekil 6.22a ve 6.22b’den de görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın yerel ısı taşınım katsayısı değerleri artmaktadır. Akışkana ZnO nanopartikülü ilavesi akışkanın sıcaklığı ve cidar sıcaklığı değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Cidar sıcaklığında meydana gelen azalma akışkanın sıcaklığında meydana gelen azalmadan daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum nanoakışkanın sıcaklığı ve cidar sıcaklığı arasındaki farkın azalmasına, dolayısıyla yerel ısı taşınım katsayısı değerlerinin artmasına neden olmuştur.

Mikrokanalın giriş bölgesinde ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen yerel ısı taşınım katsayısı değerlerinin mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu boyunca azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum mikrokanalın giriş bölgesinde cidar sıcaklığı ile etilen glikolün sıcaklığı arasındaki farkın çok küçük olması ve mikrokanal boyunca aradaki bu fark değerinin artmasından kaynaklanmaktadır.



(a)

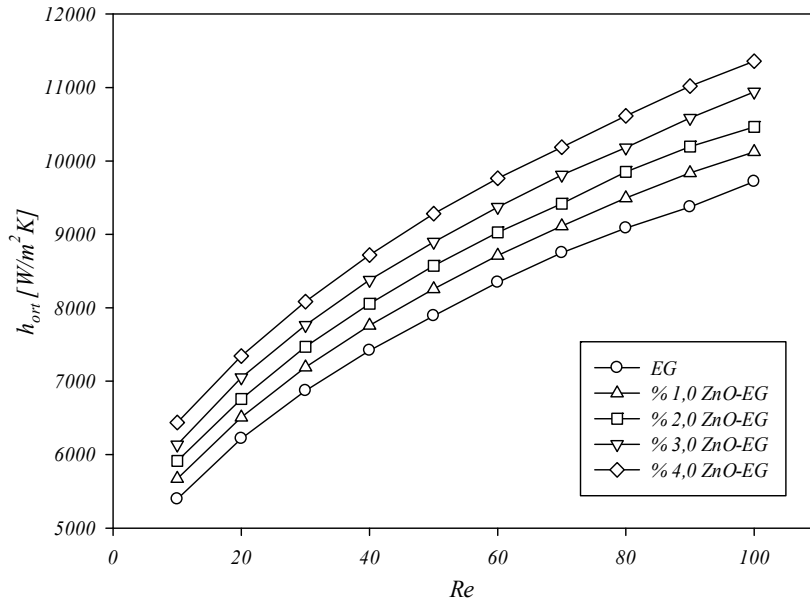


(b)

Şekil 6.22. Tek fazlı modellemesi için yerel ısı taşınım katsayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak mikrokanalın boyutsuz eksenel uzunluğu ile değişimi a) $Re=10$ ve b) $Re=100$.

ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal içerisindeki akışının yerel ısı taşınım değerlerinin Reynolds sayısının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Reynolds sayısının artması sonucu belirlenen Reynolds sayısına karşılık gelen hız değerleri de artmaktadır. Akış hızının artması ise nanoakışkanının sıcaklığının ve cidar sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Fakat, cidar sıcaklığında meydana gelen azalma nanoakışkan sıcaklığında meydana gelen azalmadan daha fazla olduğundan, nanoakışkan sıcaklığı ve cidar sıcaklığı arasındaki fark azalmakta ve dolayısıyla yerel ısı taşınım katsayısı değerleri artmaktadır.

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri Denklem 5.14 kullanılarak elde edilmiştir. $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda ZnO-EG nanoakışkanının ortalama ısı taşınım katsayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.23’de gösterilmektedir.



Şekil 6.23. Tek fazlı akış modellemesi için ortalama ısı taşınım katsayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Şekil 6.23’den de görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri artmaktadır. En yüksek ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanını için elde edilmiştir. $Re = 10$ ve $Re = 100$ ’de etilen

glikol için elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri sırasıyla 5393,97 W/m²K ve 9718,15 W/m²K iken, aynı Reynolds sayılarında %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri sırasıyla 6436,52 W/m²K ve 11359,59 W/m²K'dir. Buna göre etilen glikole hacimsel olarak %4,0 oranında ZnO nanopartikülü ilavesi akışın ortalama ısı taşınım katsayısı değerini Re = 10'da %19,33, Re = 100'de %16,89 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.

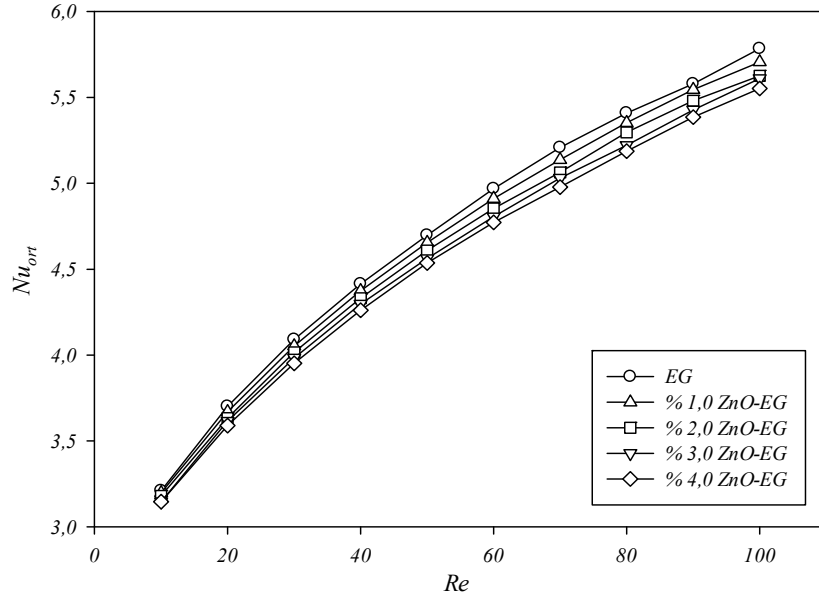
Etilen glikole ZnO nanopartikülü ilavesi akışın sıcaklığını ve cidar sıcaklığının azalmasına neden olmaktadır. Fakat, cidar sıcaklığındaki azalma nanoakışkanının sıcaklığında meydana gelen azalmadan daha fazladır ve dolayısıyla nanoakışkan sıcaklığı ve sıcaklığı arasındaki fark azalmaktadır. Bu durum etilen glikole ZnO nanopartikülü ilave edilmesiyle akışın ortalama ısı taşınım katsayısının artmasına neden olmaktadır.

6.2.3. Nusselt Sayısı

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarında ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal içerisindeki akışının ortalama Nusselt sayısı değerleri Denklem 5.11 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.24'de gösterilmektedir.

Şekil 6.24'den de görüldüğü gibi, etilen glikole ZnO nanopartikülü ilavesi sabit Reynolds sayısında akışın ortalama Nusselt sayısı değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. En yüksek ortalama Nusselt sayısı değerleri etilen glikol için elde edilmiştir. Re = 100'de etilen glikol için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değeri 5,78 iken, %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG için elde edilen ortalama Nusselt sayısı ise 5,55'dir. Re = 10'da ise etilen glikol için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değeri 3,21 iken, %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG için elde edilen ortalama Nusselt sayısı ise 3,15'dir. Etilen glikole hacimsel olarak %4,0 oranında ZnO nanopartikülü ilavesi akışın ortalama Nusselt sayısının Re = 10'da %1,87, Re = 100'de ise %3,98 oranında azalmasına neden olmuştur.

Ortalama Nusselt sayısındaki bu azalma, etilen glikole ZnO ilave edilmesi sonucunda akışkanın ısı iletim katsayısında meydana gelen artışın akışın ısı iletim katsayısında meydana gelen artıştan daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. $Re = 10$ için, etilen glikole farklı nanopartikül hacimsel oranlarında ZnO nanopartikülünün ilave edilmesi sonucunda etilen glikolün ısı iletim katsayısı ve ısı taşınım katsayısında meydana gelen yüzdesel değişimler Çizelge 6.1’de gösterilmektedir.



Şekil 6.24. Tek fazlı akış modellemesi için ortalama Nusselt sayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Çizelge 6.1. ZnO nanopartikülü ilavesi ile etilen glikolün ısı iletim katsayısı ve ısı taşınım katsayısında meydana gelen yüzdesel değişimler.

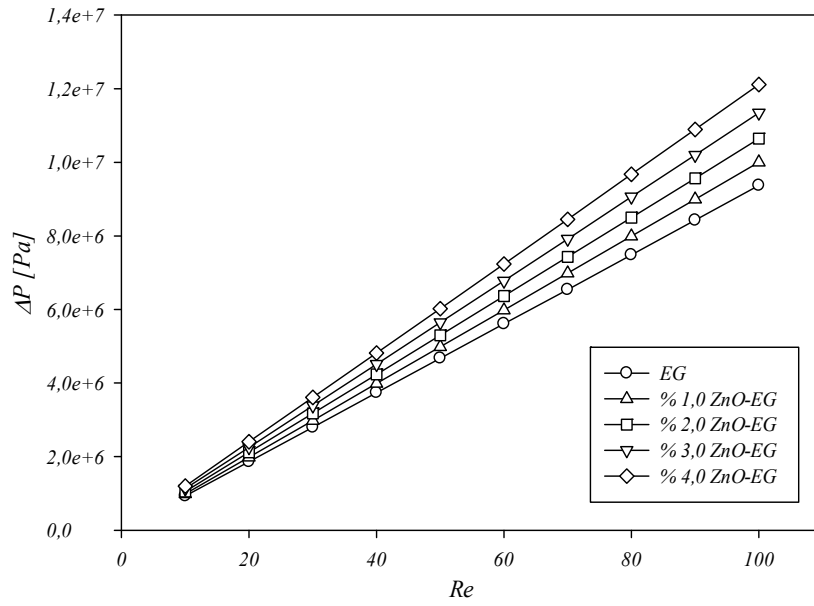
φ (%)	Δk (%)	Δh (%)
1,0	5,6	5,17
2,0	10,71	9,65
3,0	16,07	13,75
4,0	21,79	19,33

Çizelge 6.1’den de görüldüğü gibi, bütün nanopartikül hacimsel oranlarında etilen glikole ZnO nanopartikülü ilave edilmesi sonucunda, akışkanın ısı iletim katsayısında meydana gelen artış akışkanın ısı taşınım katsayısında meydana gelen

artıştan daha fazladır. Bundan dolayı, etilen glikole ZnO nanopartikülü ilavesi akışın ortalama Nusselt sayısının azalmasına neden olmaktadır.

6.2.4. Basınç Düşümü

$\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanını için elde edilen basınç düşümü değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi şekil 6.25’de gösterilmektedir.

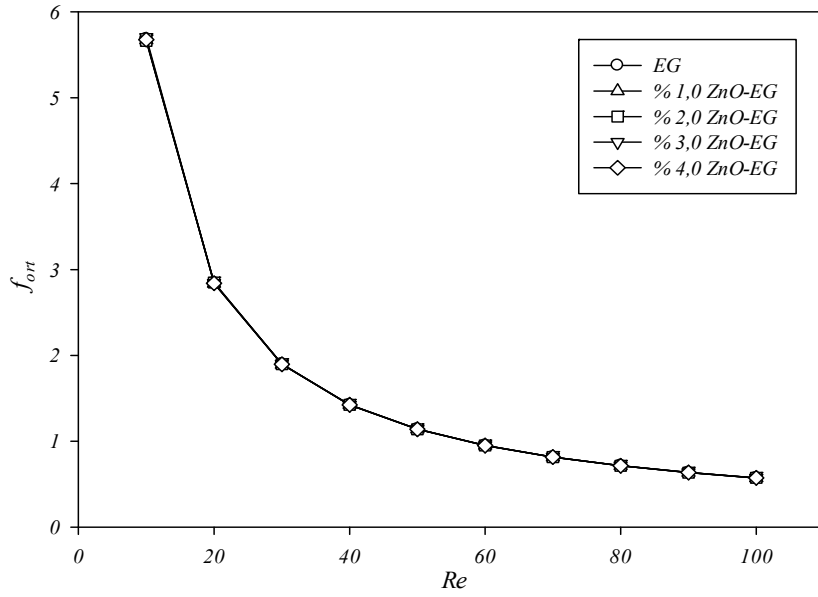


şekil 6.25. Tek fazlı akış modellemesi için basınç düşümünün ZnO-EG nanoakışkanını nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

ZnO-EG nanoakışkanını nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın basınç düşümü artmaktadır. %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanını için elde edilen basınç düşümü değerleri etilen glikol için elde edilen değerlerden $Re = 10$ ’da % 28,96, $Re = 100$ ’de ise %29,23 daha fazladır. ZnO-EG nanoakışkanını nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte nanoakışkanını viskozite değerlerinin artması sonucunda, ZnO-EG nanoakışkanını nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın basınç düşümü değerleri artmaktadır.

6.2.5. Darcy Sürtünme Faktörü

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarında ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal içerisindeki akışının Darcy sürtünme faktörü değerleri Denklem 5.16 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen Darcy sürtünme faktörü değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.26’da gösterilmektedir.

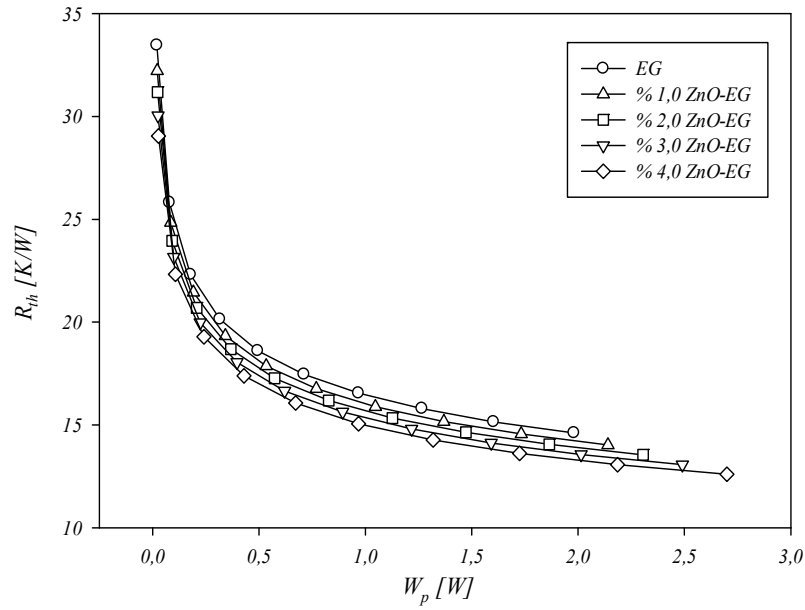


Şekil 6.26. Tek fazlı akış modellemesi için ortalama Darcy sürtünme faktörünün ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Şekil 6.26 incelendiğinde, etilen glikole ZnO nanopartikülü ilavesi akışın Darcy sürtünme faktörü değerini etkilemediği görülmektedir. Etilen glikole ZnO nanopartikülü ilavesi akışkanın viskozitesini arttırmışından dolayı akışın basınç düşümünü arttırmaktadır. Fakat, sabit Reynolds sayısında yapılan analizlerde, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte dikkate alınan Reynolds sayısına karşılık gelen hız değerleri de artmaktadır. Basınç düşümü ve hız değerlerindeki bu artış birbirini dengelediğinden etilen glikol akışının Darcy sürtünme faktörü değeri ZnO nanopartikülü ilavesinden etkilenmemiştir.

6.2.6. Isıl Direnç Ve Pompalama Gücü

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının ısı direnç ve gerekli pompalama gücü değerleri sırasıyla Denklem 6.2 ve 6.3 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen gerekli pompalama gücüne karşılık gelen ısı direnç değerleri Şekil 6.27’de gösterilmektedir.



Şekil 6.27. Tek fazlı akış modellemesi için ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak pompalama gücüne karşılık gelen ısı direnç değerleri.

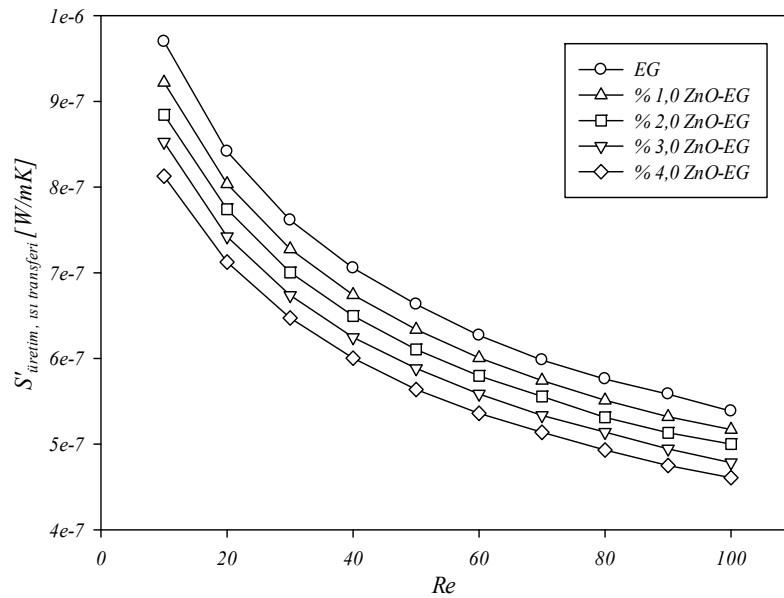
Analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi, etilen glikole ZnO nanopartikülü ilavesi akışın ısı taşınım katsayısını arttırarak ısı performansının iyileşmesine neden olurken, aynı zamanda akışkanın viskozite değerini arttırmasından dolayı basınç düşümünü arttırarak hidrodinamik performansı üzerine olumsuz etkide bulunmaktadır. Bu tür durumlarda, akışkana yapılan müdahalenin genel anlamda olumlu ya da olumsuz sonuçlanıp sonuçlanmadığını anlamak için gerekli pompa gücüne karşılık gelen ısı direnç değerleri büyük fayda sağlamaktadır.

Şekil 6.27 incelendiğinde, belirlenen herhangi bir pompalama gücüne karşılık gelen ısı direnç değerleri için en yüksek ısı direnç değeri etilen glikol için elde edilirken,

ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın ısı direnç değerleri azalmaktadır. En düşük ısı direnç değerleri %4,0'lük nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilmiştir. Belirlenen bir pompalama gücünde en düşük ısı direncin elde edildiği %4,0'lük nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı çalışmada kullanılan diğer nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanlarına ve etilen glikole kıyasla daha üstündür.

6.2.7. Entropi Üretimi

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri Denklem 6.6 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri Şekil 6.28'de gösterilmektedir.

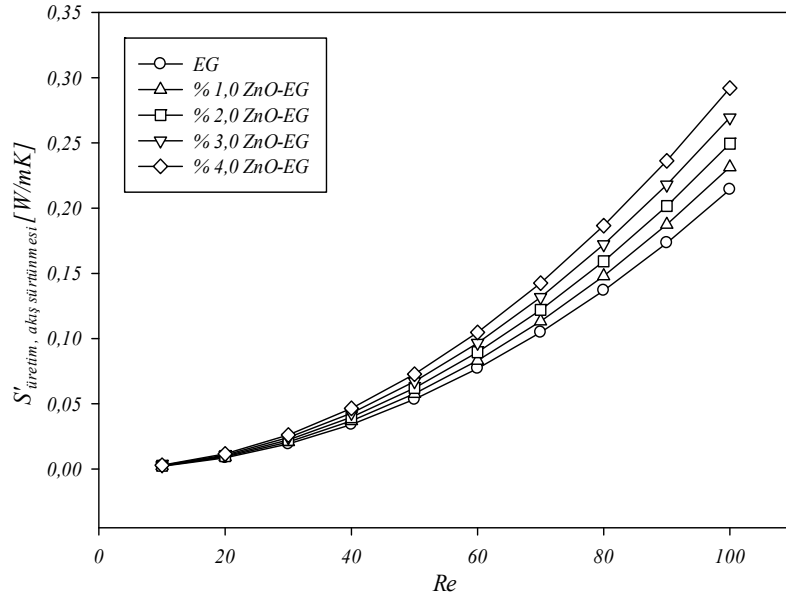


Şekil 6.28. Tek fazlı akış modellemesi için ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Şekil 6.28'den de görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değeri azalmaktadır. Etilen glikole ZnO nanopartikülü ilavesi akışın ortalama sıcaklığının ve ortalama Nusselt sayısının azalmasına neden olmaktadır. Bu etkiler akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerinin artmasına neden olacak olgulardır. Fakat, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artması sonucunda akışın ısı iletim katsayısında meydana gelen artış, akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerinin artmasına neden olan etkilere kıyasla baskın gelerek akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerinin azalmasına neden olmuştur. Bundan dolayı, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi azalmaktadır.

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri Denklem 6.7 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri Şekil 6.29'da gösterilmektedir.

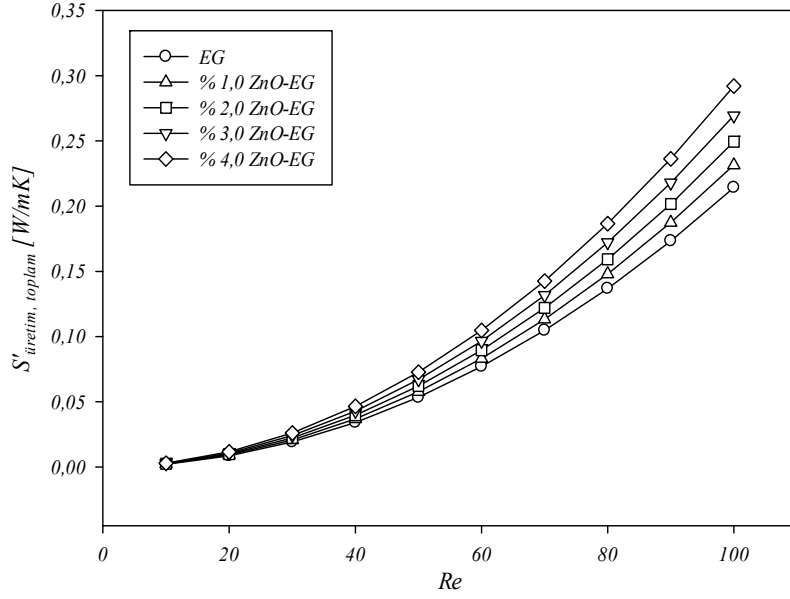
ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri artmaktadır. ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın ortalama sıcaklığı ve yoğunluğu artmaktadır. Ayrıca, sabit Reynolds sayısında yapılan analizlerde, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın viskozitesi artmakta ve dolayısıyla Reynolds sayısına karşılık gelen akış hızı değerleri artmaktadır. ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artması sonucunda meydana gelen bu olgulardan dolayı akışın akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri artmaktadır.



Şekil 6.29. Tek fazlı akış modellemesi için akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerleri Denklem 6.5 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerleri Şekil 6.30'da gösterilmektedir.

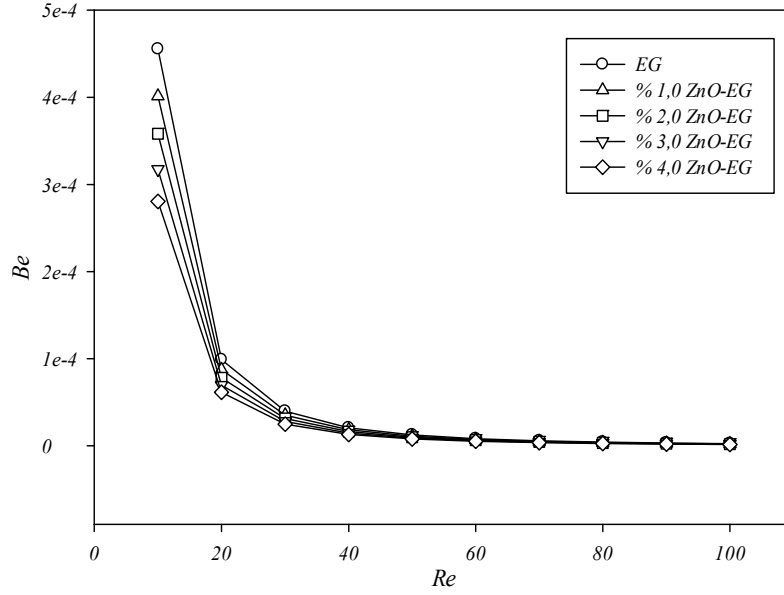
Şekil 6.30'dan da görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerleri artmaktadır. $Re = 100$ 'de saf etilen glikol için elde edilen birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değeri $0,2143 \text{ W/mK}$ iken, %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için $0,2920 \text{ W/mK}$ 'lik değer elde edilmiştir. Bu değere göre, etilen glikole %4,0 nanopartikül hacimsel oranında ZnO nanopartikülü ilavesi akışın birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerini $Re = 100$ 'de %36,26 oranında artmasına neden olmuştur.



Şekil 6.30. Tek fazlı akış modellemesi için birim uzunluk başına toplam entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerleri akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri ile hemen hemen aynıdır. Isı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerlerine kıyasla çok küçük olduğundan, birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerleri elde edilirken etkisiz kalmıştır. Birim uzunluk başına toplam entropi üretiminde akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerlerinin baskın olması çalışmada kullanılan hidrolik çap değerinin çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır.

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının Bejan sayısı Denklem 6.9 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen Bejan sayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.31'de gösterilmektedir.



Şekil 6.31. Tek fazlı akış modellemesi için Bejan sayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın Bejan sayısı değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla ısı transferinden kaynaklanan entropi üretiminin toplam entropi üretimi içindeki payının azaldığını ifade etmektedir. $Re = 10$ 'da etilen glikol için elde edilen Bejan sayısı değeri $4,5533 \times 10^{-4}$ iken, %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için ise $1,2921 \times 10^{-5}$ değeri elde edilmiştir. Ayrıca, Reynolds sayısının artmasıyla birlikte Bejan sayısının azaldığı görülmektedir. Reynolds sayısının artmasıyla birlikte akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi artarken, ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değeri azalmaktadır. Bundan dolayı, Reynolds sayısının artması sonucunda Bejan sayısı azalmaktadır.

6.3. MİKROKANALDA ZnO-EG NANOAKIŞKAN AKIŞININ ÇİFT FAZLI OLARAK MODELLENMESİ

Çalışmanın bu kısmında, farklı en-boy oranlarındaki dikdörtgen kesitli mikrokanallarda farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ($\varphi_{np} = \%1,0 - \%4,0$)

ZnO-EG nanoakışkanının akış ve ısı taşınım karakteristikleri Eulerian yaklaşımda çift fazlı olarak modellenerek sayısal olarak incelenmiştir.

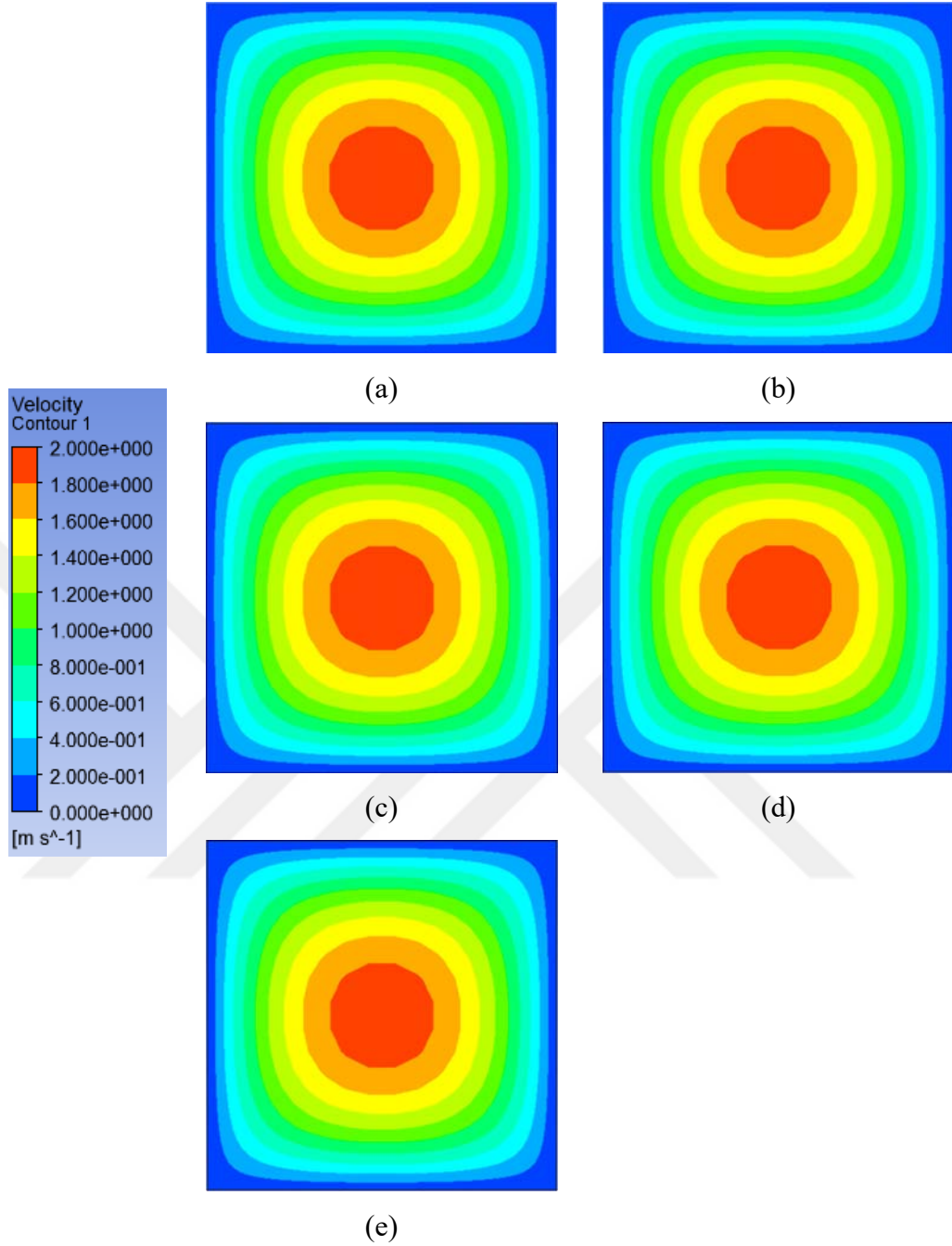
$\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokana1 çalışmada kullanılan diğerk mikrokana1lara kıyasla daha iyi performans gösterdiğinden sadece $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokana1 için elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

6.3.1. Hız Ve Sıcaklık Dağılımları

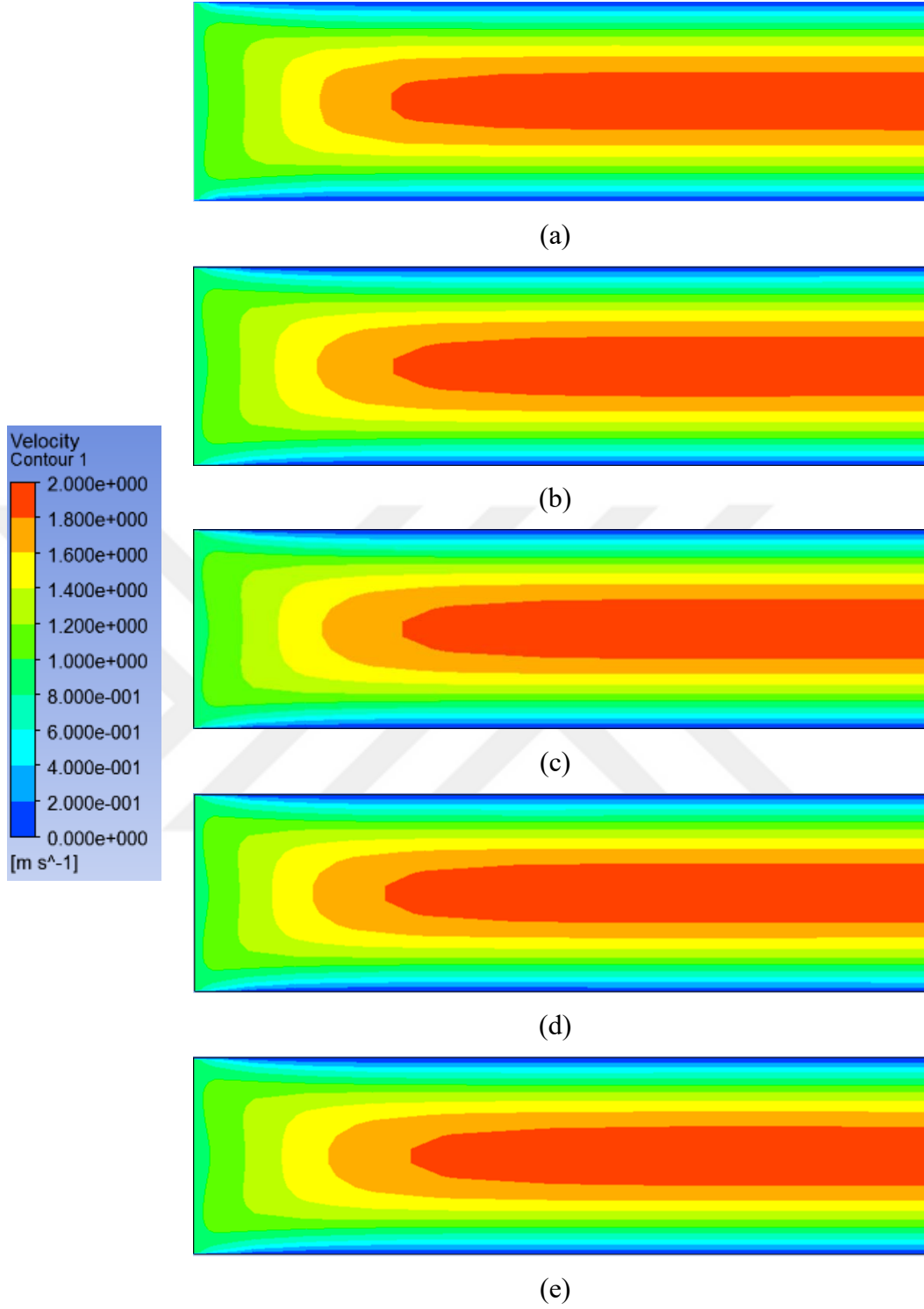
$Re = 10$ için, $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokana1da farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanına ait hız dağılımları Şekil 6.32 ve 6.33'de, sıcaklık dağılımları ise Şekil 6.34 ve 6.35'de gösterilmektedir.

Çift fazlı modellemede, mikrokana1 girişindeki hız ve sıcaklık değerleri sıvı ve katı fazlar için aynı kabul edilmiştir. Bundan dolayı, fazlar arası belirgin bir hız ve sıcaklık farklılığı elde edilmemiştir. Bundan dolayı fazlar için tek bir hız ve sıcaklık dağılımı sunulmuştur.

Şekil 6.32 ve 6.33'den de görüldüğü gibi, çift fazlı modellemede, katı ve sıvı fazlar ayrı ayrı modellendiğinden belirlenen Reynolds sayısına karşılık gelen hız değerleri farklılık göstermemektedir.

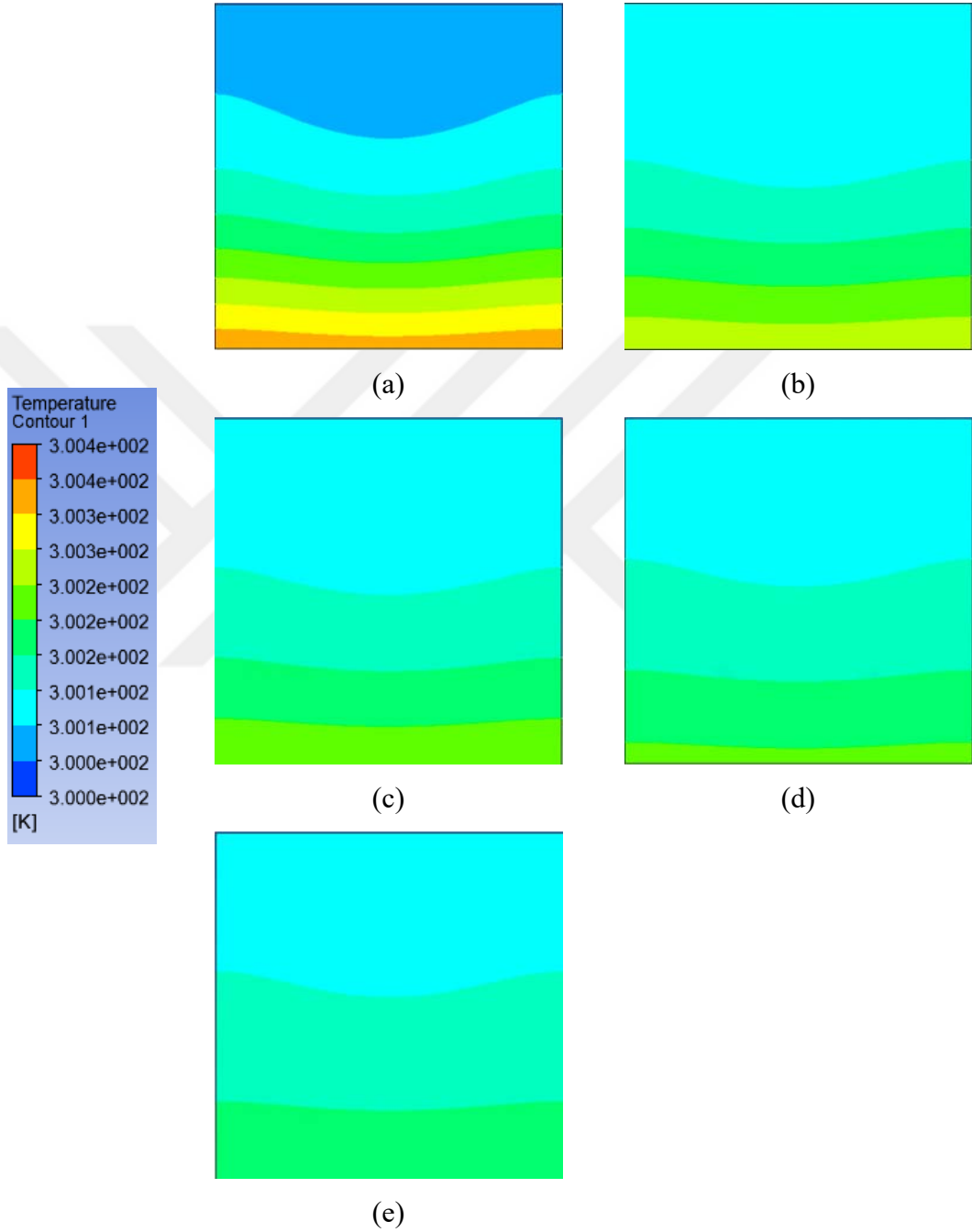


Şekil 6.32. Çift fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış kesitindeki hız dağılımları a) $\phi_{np} = \%0$, b) $\phi_{np} = \%1,0$, c) $\phi_{np} = \%2,0$, d) $\phi_{np} = \%3,0$, e) $\phi_{np} = \%4,0$.

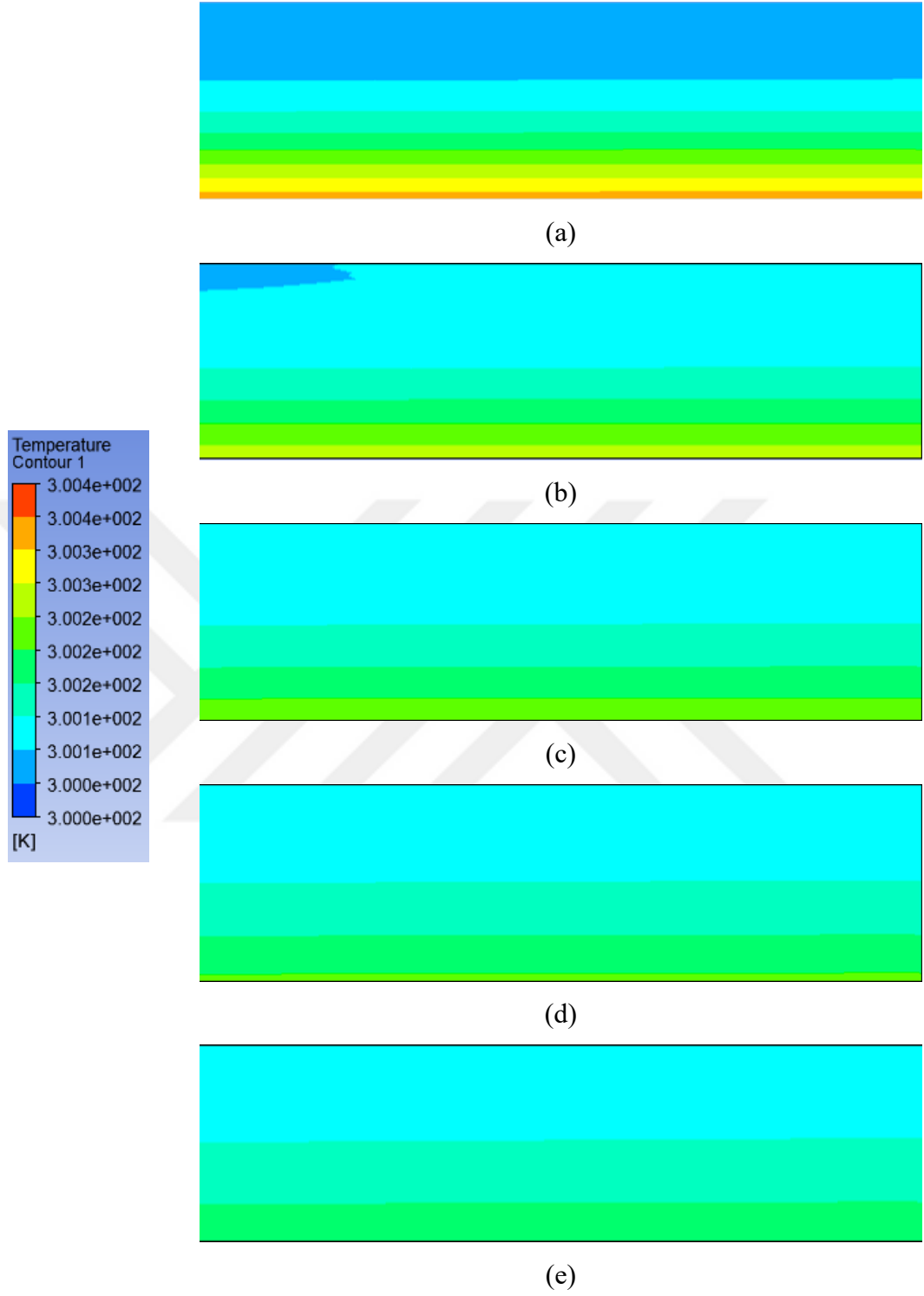


Şekil 6.33. Çift fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal giriş bölgesinin yan kesitindeki hız dağılımları a) $\varphi_{np} = \%0$, b) $\varphi_{np} = \%1,0$, c) $\varphi_{np} = \%2,0$, d) $\varphi_{np} = \%3,0$, e) $\varphi_{np} = \%4,0$.

Şekil 6.34 ve 6.35’den görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte mikrokanalın ısı akısı uygulanan alt yüzeyinin sıcaklığı azalmaktadır.



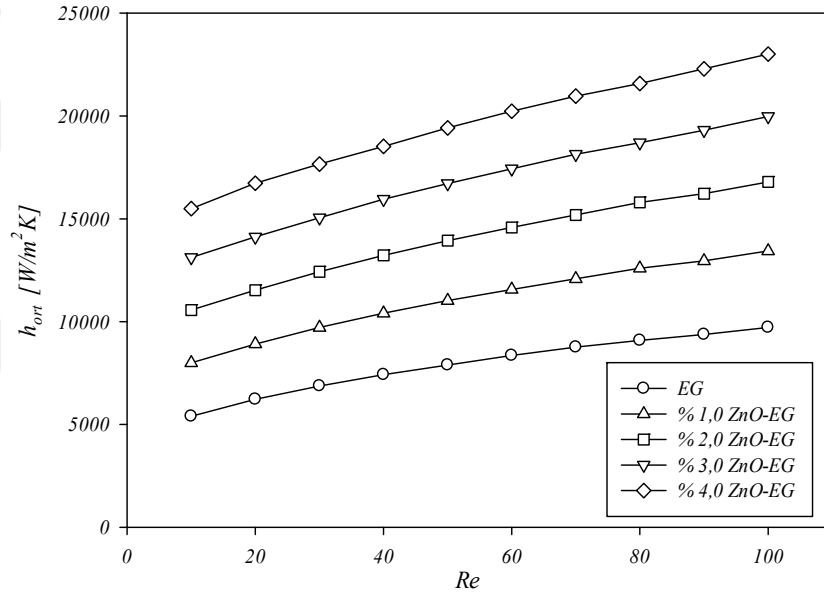
Şekil 6.34. Çift fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanal çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımları a) $\varphi_{np} = \%0$, b) $\varphi_{np} = \%1,0$, c) $\varphi_{np} = \%2,0$, d) $\varphi_{np} = \%3,0$, e) $\varphi_{np} = \%4,0$.



Şekil 6.35. Çift fazlı akış modellemesi için farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının mikrokanaal çıkış bölgesinin yan kesitindeki sıcaklık dağılımları a) $\varphi_{np} = \%0$, b) $\varphi_{np} = \%1,0$, c) $\varphi_{np} = \%2,0$, d) $\varphi_{np} = \%3,0$, e) $\varphi_{np} = \%4,0$.

6.3.2. Isı Taşınım Katsayısı

Çift fazlı analizden elde edilen sonuçlara göre farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının ortalama ısı taşınım katsayısı Denklem 5.14 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.36'da gösterilmektedir.



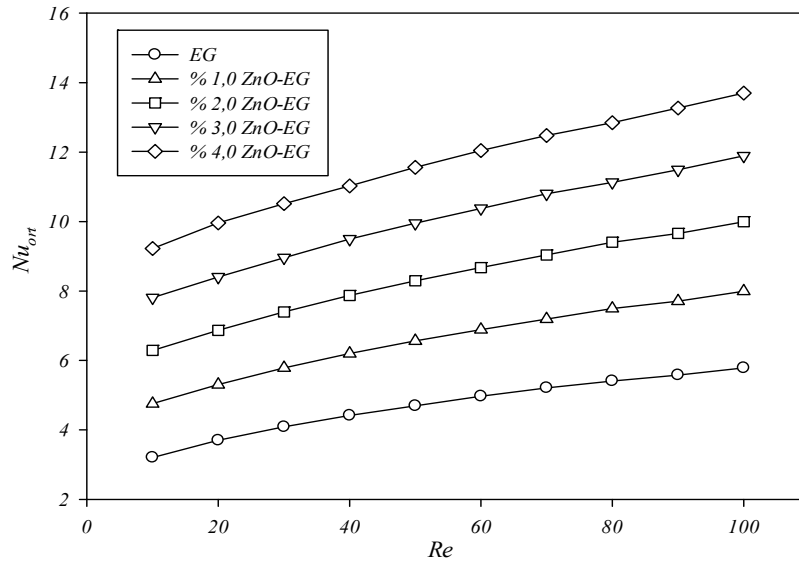
Şekil 6.36. Çift fazlı akış modellemesi için ortalama ısı taşınım katsayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Şekil 6.36'dan da görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın ortalama ısı taşınım katsayısı artmaktadır. $Re = 10$ 'da etilen glikol için elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değeri $5393,97 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken, %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için $15500,31 \text{ W/m}^2\text{K}$ değeri elde edilmiştir. $Re = 100$ 'de ise etilen glikol için elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değeri $9718,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken, %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen değer ise $23010,79 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir. Bu değerler ışığında, etilen glikole hacimsel olarak %4,0 oranında ZnO

nanopartiküli ilavesi akışın ortalama ısı taşınım katsayısının $Re = 10$ 'da %187,36, $Re = 100$ 'de ise %136,78 oranlarında artmasına neden olmuştur. %4,0'lük nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen etilen glikole kıyasla yüksek ortalama ısı taşınım katsayısı değerleri, etilen glikole ZnO nanopartiküli ilavesinin neden olduğu cidar sıcaklığında meydana gelen aşırı azalmadan dolayı meydana gelmektedir.

6.3.3. Nusselt Sayısı

Çift fazlı analizden elde edilen sonuçlara göre her bir nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının ortalama Nusselt sayısı Denklem 5.11 kullanılarak hesaplanmıştır. $\alpha = 1,0$ 'lik en-boy oranına sahip mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.37'de gösterilmektedir.



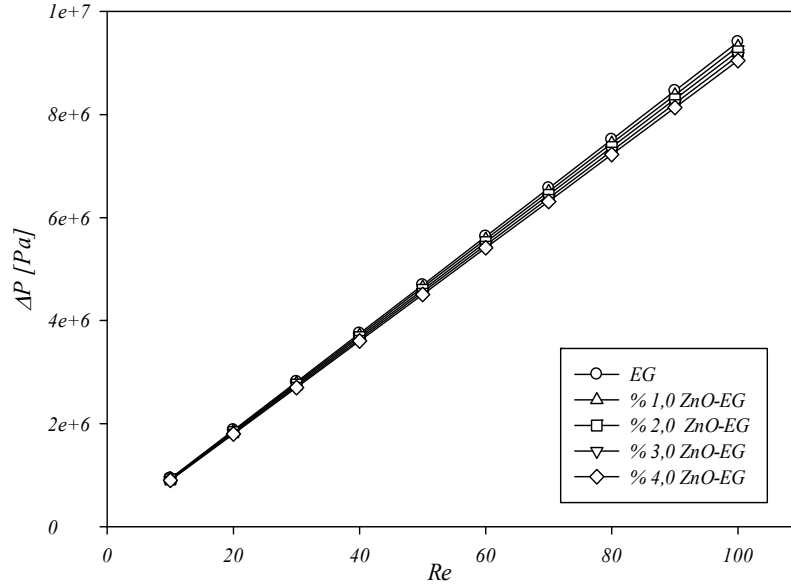
Şekil 6.37. Çift fazlı akış modellemesi için ortalama Nusselt sayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Şekil 6.37'den de görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın ortalama Nusselt sayısı değeri artmaktadır. $Re = 10$ 'da etilen glikol için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değeri 3,21 iken, %4,0

nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen ortalama Nusselt sayısı değeri ise 9,23'dür. $Re = 100$ 'de ise, etilen glikol için ortalama Nusselt sayısı 5,78 olarak elde edilirken, %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanın ortalama Nusselt sayısı değeri için 13,70 değeri elde edilmiştir.

6.3.4. Basınç Düşümü

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen basınç düşümü değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.38'de gösterilmektedir.

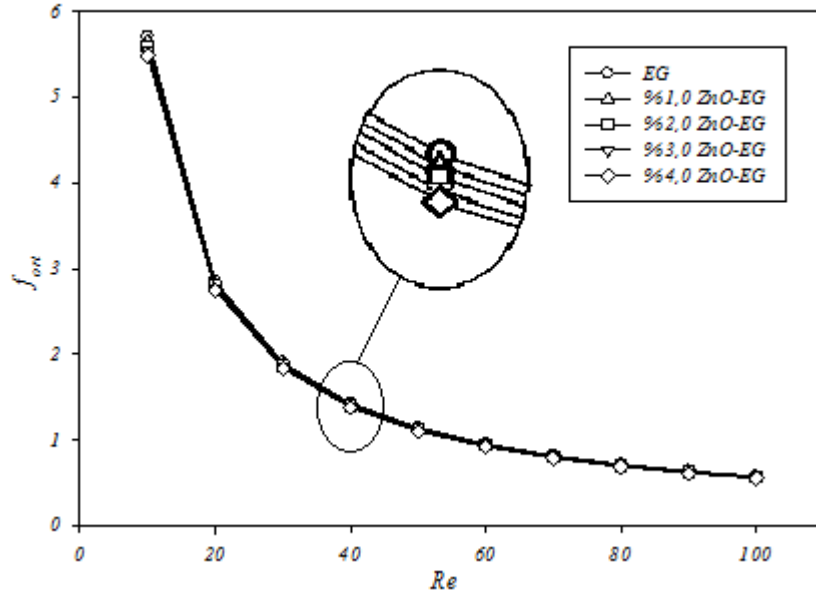


Şekil 6.38. Çift fazlı akış modellemesi için basınç düşümünün ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın basınç düşümünün azaldığı tespit edilmiştir. %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen basınç düşümü değeri etilen glikol için elde edilen değerden $Re = 10$ ve $Re = 100$ 'de sırasıyla %3,98 ve %3,85 daha düşük olduğu belirlenmiştir.

6.3.5. Darcy Sürtünme Faktörü

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için Darcy sürtünme faktörü değerleri Denklem 5.16 kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen Darcy sürtünme faktörü değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.39'da gösterilmektedir.



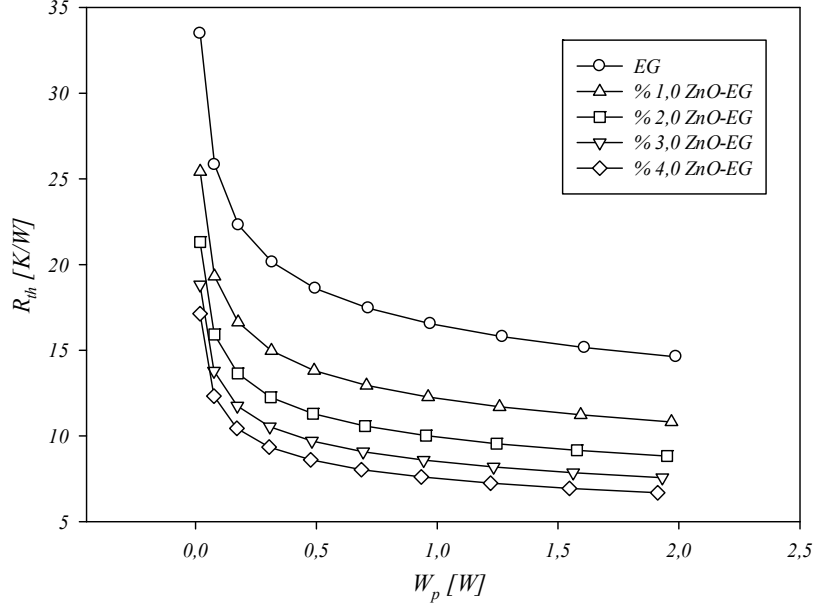
Şekil 6.39. Çift fazlı akış modellemesi için ortalama Darcy sürtünme faktörünün ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

Şekil 6.39'dan da görüldüğü gibi, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranlarının artmasıyla birlikte akışın Darcy sürtünme faktörü azalmaktadır. Darcy sürtünme faktöründeki bu azalma ZnO-EG nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın basınç düşümünün azalmasından kaynaklanmaktadır.

6.3.6. Isıl Direnç Ve Pompalama Gücü

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için ısı direnç ve pompalama gücü değerleri sırasıyla Denklem 6.2 ve 6.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı

için gerekli pompalama gücüne karşılık gelen ısıl direnç değerleri Şekil 6.40'da gösterilmektedir.



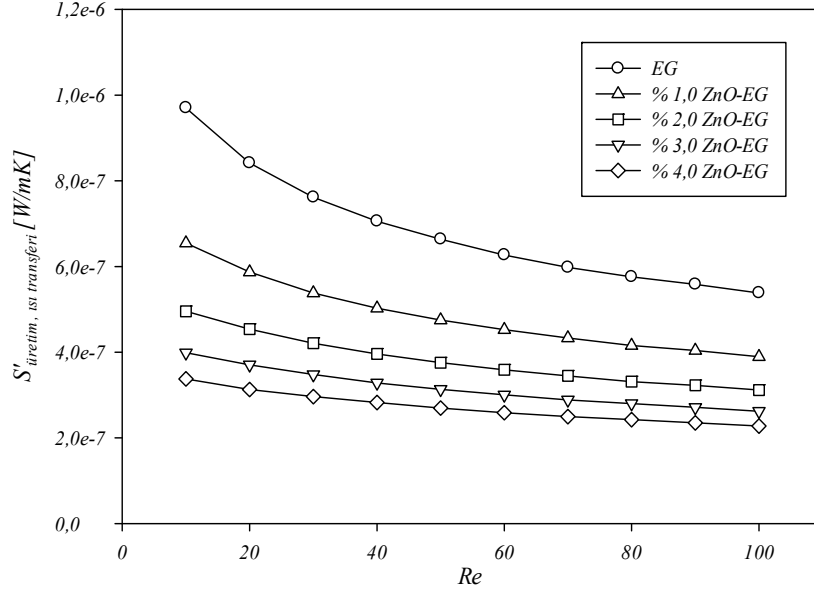
Şekil 6.40. Çift fazlı akış modellemesi için ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak pompalama gücüne karşılık gelen ısıl direnç değerleri.

ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artması sonucunda belirli bir pompalama gücüne karşılık gelen akışın ısıl direnç değerleri azalmaktadır. ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla nanoakışkanın sıcaklığı ve cidar sıcaklığında azalma meydana gelmektedir. Cidar sıcaklığında meydana gelen azalma nanoakışkanın sıcaklığında meydana gelen azalmadan daha fazla olduğundan cidar sıcaklığı ile nanoakışkan sıcaklığı arasındaki fark azalmaktadır. Bundan dolayı, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın ısıl direnci azalmaktadır.

6.3.7. Entropi Üretimi

ZnO-EG nanoakışkanının farklı nanopartikül hacimsel oranları için ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi Denklem 6.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı

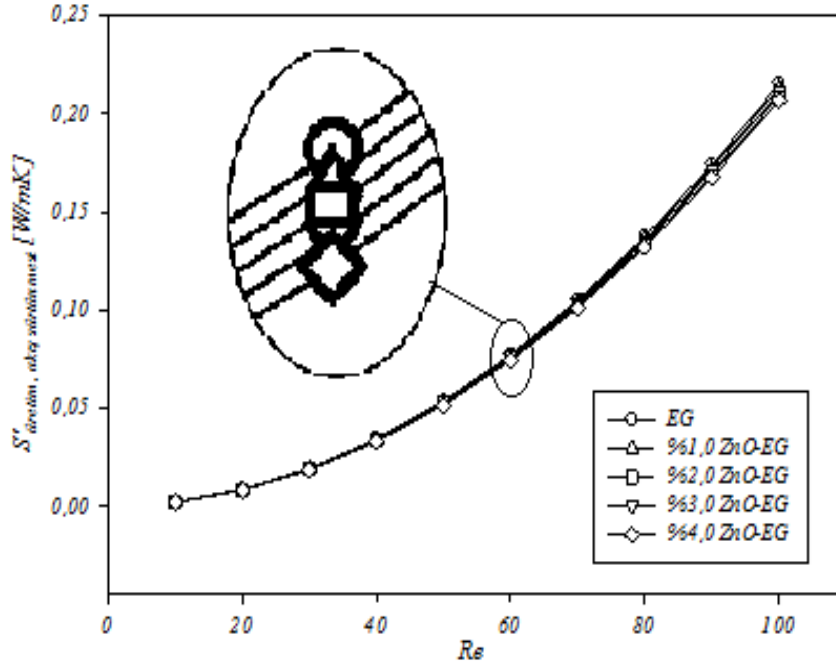
için elde edilen ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri Şekil 6.41’de gösterilmektedir.



Şekil 6.41. Çift fazlı akış modellemesi için ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değeri azalmaktadır. $Re = 10$ 'da etilen glikol için elde edilen ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi $9,7032 \times 10^{-7}$ W/mK, %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen değer ise $5,3849 \times 10^{-7}$ W/mK'dir. Etilen glikole ilave edilen ZnO nanopartikülünün hacimsel oranının artmasıyla akışın ortalama sıcaklığı azalmaktadır. Bu azalma akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerini artıracak bir etkidir. Fakat, nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla artan ortalama Nusselt sayısı akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin azalmasına neden olacak bir etkidir ve ortalama sıcaklığındaki azalmadan kaynaklanan entropi üretimindeki artışa baskın gelerek genel olarak akışın ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerinin azalmasına neden olmaktadır.

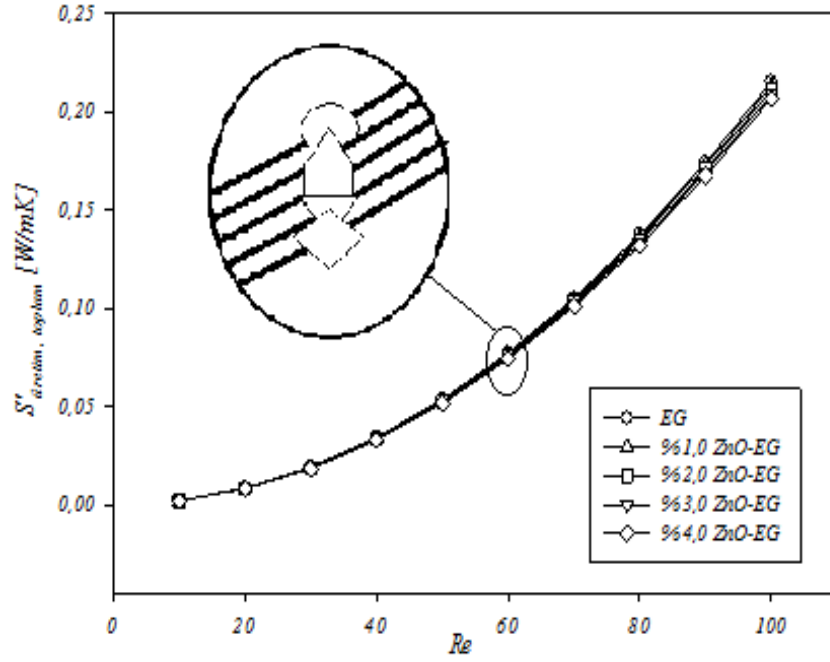
Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri Denklem 6.7 kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri Şekil 6.42’de gösterilmektedir.



Şekil 6.42. Çift fazlı akış modellemesi için akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerleri azalmaktadır. Etilen glikol içeriğinde ZnO nanopartikülünün hacimsel oranının artması sonucunda akışın Darcy sürtünme faktörü azalmaktadır. Darcy sürtünme faktöründeki bu azalma da akışın akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimi değerinin azalmasına neden olmaktadır.

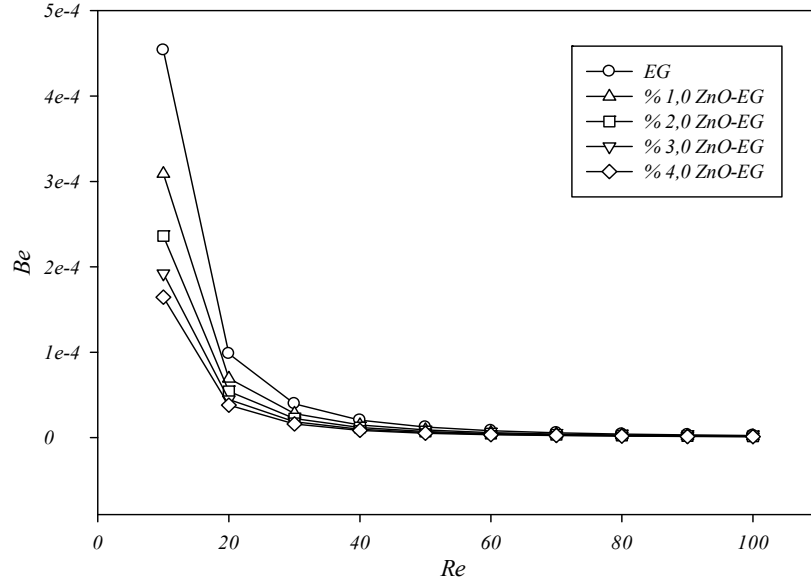
Her bir nanopartikül hacimsel oranındaki ZnO-EG nanoakışkanının birim uzunluk başına toplam entropi üretimi ise Denklem 6.5 kullanılarak hesaplanmıştır. Nanoakışkanların birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.43’de gösterilmektedir.



Şekil 6.43. Çift fazlı akış modellemesi için birim uzunluk başına toplam entropi üretiminin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değeri artmaktadır. Birim uzunluk başına toplam entropi üretimindeki baskın etken mikrokanalların hidrolik çaplarının çok küçük olmasından dolayı akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimidir. ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminde meydana gelen azalma birim uzunluk başına toplam entropi üretiminin azalmasına neden olmaktadır.

Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanının Bejan sayısı değerleri Denklem 6.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için elde edilen Bejan sayısı değerlerinin Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 6.44'de gösterilmektedir.



Şekil 6.44. Çift fazlı akış modellemesi için Bejan sayısının ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimi.

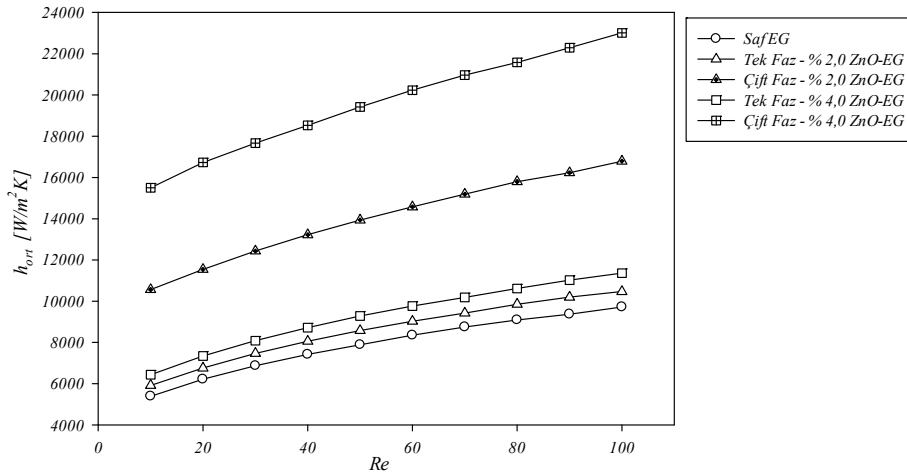
ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın Bejan sayısı azalmaktadır. Bu durum, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminin toplam entropi üretimindeki payının azaldığı ifade etmektedir. ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla ısı transferinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretimindeki azalma oranının akış sürtünmesinden kaynaklanan birim uzunluk başına entropi üretiminde meydana gelen azalma oranından daha fazla olmasından dolayı Bejan sayısı ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artması sonucunda azalmaktadır.

6.4. TEK VE ÇİFT FAZLI AKIŞ MODELLEMELERİ İÇİN ELDE EDİLEN SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Farklı en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanallarda farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanının akış ve ısı transferi karakteristikleri tek ve çift fazlı modeller ayrı ayrı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Etilen glikol kullanılarak farklı en-boy oranlarının akışın akış ve ısı transferi karakteristiklerine etkisi incelendiğinde $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip

dikdörtgen kesitli mikrokanalın çalışmada kullanılan diğer en-boy oranlarındaki mikrokanallara kıyasla ısı ve hidrodinamik olarak daha üstün olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı, ZnO-EG nanoakışkanının akış ve ısı transferinin karakteristiklerinin belirlenmesinde akışın hem tek fazlı hem de çift fazlı modellenmesinde $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanal için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Çalışmanın bu kısmında da, $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip mikrokanalda ZnO-EG nanoakışkan akışının tek fazlı ve çift fazlı olarak modellenmesinden elde edilen sonuçların kıyaslaması yapılmaktadır.

$\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için tek fazlı ve çift fazlı analizlerden elde edilen sonuçlara göre hesaplanan ısı taşınım katsayısı değerleri Şekil 6.45’de gösterilmektedir.

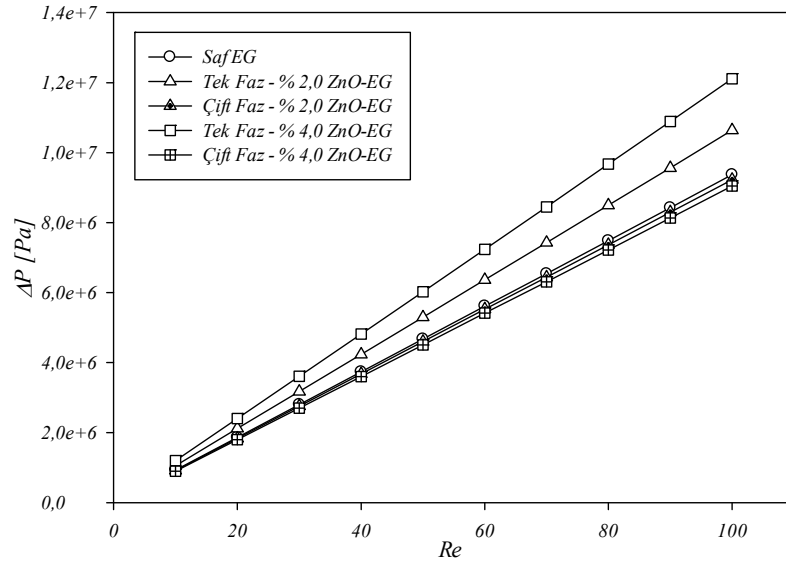


Şekil 6.45. Tek ve çift fazlı akış modellemelerinden elde edilen ortalama ısı taşınım katsayısı değerlerinin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimlerinin kıyaslanması.

Şekil 6.45’den de görüldüğü gibi, çift fazlı analiz sonuçlarından elde edilen ısı taşınım katsayısı değerleri tek fazlı analiz sonuçlarından elde edilen değerlere kıyasla oldukça yüksektir. %4,0 nanopartikül hacimsel oranına sahip ZnO-EG nanoakışkanının tek fazlı ve çift fazlı analiz sonuçlarından elde edilen ısı taşınım katsayısı değerleri $Re = 10$ ’da sırasıyla $6436,52 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $15500,31 \text{ W/m}^2\text{K}$ iken, $Re = 100$ ’de ise sırasıyla $11359,59 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $23010,79 \text{ W/m}^2\text{K}$ ’dir. Tek ve çift fazlı

analiz sonucunda ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla cidar sıcaklığının azaldığı tespit edilmiştir. Fakat, çift fazlı analiz sonucunda elde edilen cidar sıcaklığı değerleri tek fazlı analiz sonucunda elde edilen cidar sıcaklıklarından daha düşüktür. Bundan dolayı, ZnO-EG nanoakışkanının çift fazlı modellemesinden elde edilen ısı taşınım katsayısı değerleri tek fazlı modellemeden elde edilen değerlere kıyasla daha büyüktür. Oluşturulan akış modellerinin doğrulanmasında çift fazlı akış modelinden elde edilen sonuçların tek fazlı akış modellemesine kıyasla deneysel sonuçlara daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

Tek fazlı ve çift fazlı analizlerden elde edilen sonuçlara göre, $\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanalda farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için hesaplanan basınç düşümü değerleri Şekil 6.46'da gösterilmektedir.

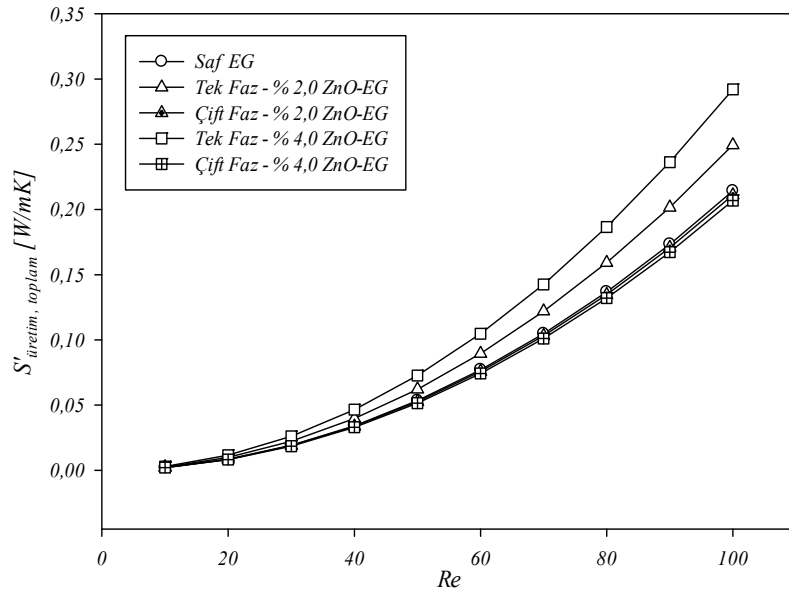


Şekil 6.46. Tek ve çift fazlı akış modellemelerinden elde edilen basınç düşümü değerlerinin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimlerinin kıyaslanması.

Şekil 6.46'dan görüldüğü gibi, tek fazlı analiz sonucundan elde edilen basınç düşümü değerleri ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla artmaktadır. Fakat, çift fazlı analizden elde edilen sonuçlar incelendiğinde basınç düşümünün nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Tek

fazlı modellemede, ZnO-EG nanoakışkanı için tanımlanan viskozite değeri nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte artmaktadır. Nanoakışkan viskozitede meydana gelen artış, sabit Reynolds sayısı için, akışın hızının artmasına ve basınç düşümünün artmasına neden olmaktadır. Çift fazlı modellemede ise, sıvı fazın ve katı fazın viskozite değerleri ayrı ayrı ele alınmaktadır. Bundan dolayı, basınç düşümü eğiliminde farklılık meydana gelmektedir.

$\alpha = 1,0$ en-boy oranına sahip dikdörtgen kesitli mikrokanalda, farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı için tek fazlı ve çift fazlı analiz sonuçlarına göre hesaplanan birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerleri Şekil 6.47’de gösterilmektedir.



Şekil 6.47. Tek ve çift fazlı akış modellemelerinden elde edilen birim uzunluk başına toplam entropi üretimi değerlerinin ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranına bağlı olarak Reynolds sayısı ile değişimlerinin kıyaslanması.

Tek fazlı analizden elde edilen sonuçlara göre, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın birim uzunluk başına toplam entropi üretimi artmaktadır. Fakat çift fazlı analizden elde edilen sonuçlara göre, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranıyla akışın birim uzunluk başına toplam entropi üretimi arasında ters orantı vardır.

Mikrokanallarda toplam entropi üretimi akış sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Tek fazlı analiz sonuçlarına göre, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla akışın basınç düşümü artarken; çift fazlı analiz sonuçlarına göre, akışın basınç düşümü azalmaktadır. Basınç düşümü eğilimindeki bu farklılıktan dolayı, akışın birim uzunluk başına toplam entropi üretimi eğilimi farklılık göstermektedir.



BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elektronik cihazların boyutlarının küçültülmesi ve kapasitelerinin artırılması sonucunda meydana gelen aşırı ısınma problemini önlemek amacıyla, elektronik cihaz ve devrelerin soğutulmasında kullanılan mikrokanalların en-boy oranı ve çalışma akışkanı olarak farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki ZnO-EG nanoakışkanı kullanılarak geometrik ve akışkan özelliklerinin akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

Çalışmada, dikdörtgen kesitli mikrokanalın en-boy oranı $\alpha = 1,0 - 2,0$ aralığında olmak üzere altı farklı dikdörtgen kesitli mikrokanal kullanılmıştır. Akış hızı gibi ısı ve hidrodinamik performansı doğrudan etkileyen bir parametrenin sabit kalması amacıyla, çalışmada kullanılan her bir mikrokanalın hidrolik çapı $150 \mu m$ olarak aynı alınmış ve analizler Reynolds sayısının $10 \leq Re \leq 100$ aralığında yapılmıştır.

Tek fazlı akış modellemesinden elde edilen sonuçlara göre, sadece mikrokanalın en-boy oranı değiştirilerek akışın ısı taşınım katsayısında %19,69'luk bir artma, basınç düşümünde ise %9,05'lik bir azalma elde edilmiştir. Bundan dolayı, yapılacak tasarımlarda bu tür basit geometrik düzenlemelerin akışın ısı ve hidrodinamik performansı üzerine etkilerinin dikkate alınması gerektiği kanaatine varılmıştır.

Çalışma akışkanı olarak, $\varphi_{np} = \%1,0 - \%4,0$ aralığında farklı nanopartikül hacimsel oranlarına sahip ZnO-EG nanoakışkanı kullanılarak akış ve ısı transferi karakteristikleri tek fazlı ve çift fazlı akış modelleri kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir.

Tek fazlı akış analizinden elde edilen sonuçlara göre, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte, akışın ısı taşınım katsayısı değeri artarken, aynı zamanda akışın basınç düşümü değerinin de arttığı görülmüştür. Bu tür durumlarda, nanoakışkanlarının belirlenen bir pompalama gücüne karşılık gelen ısı direnç değerleri tasarımcıyı yönlendirmede etkili bir parametredir. Çalışmada, sabit pompalama gücünde, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla birlikte akışın ısı direncinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, çalışma akışkanı olarak etilen glikol yerine ZnO-EG nanoakışkanı kullanımının mikrokanalın performansını arttıracığını ifade etmektedir. Mikrokanalın performansındaki bu artış miktarı, ZnO-EG nanoakışkanının nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla doğru orantılıdır. Fakat, uygulamada nanoakışkanların nanopartikül hacimsel oranlarının artmasıyla birlikte, nanopartiküllerin temel akışkan içerisinde topaklanarak çökmesi, nanoakışkanın kullanıldığı sistemdeki pompa ve kanal gibi ekipmanlarda aşınma ve özellikle mikrokanallar gibi küçük hidrolik çaplara sahip kanallarda tıkanma gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı, uygulamada kullanılacak nanoakışkanların nanopartikül hacimsel oranları bu tür problemler göz önüne alınarak belirlenmesi öngörülmektedir.

Nanoakışkan kullanımında ısı taşınım katsayısının artmasına neden olan etken, çalışma akışkanı olarak nanoakışkan kullanıldığında akışın cidar sıcaklığı ile ortalama akışkan sıcaklığı arasındaki farkın azalmasıdır. Çift fazlı akış analizi sonuçlarından elde edilen ısı taşınım katsayısı iyileşmesi, tek fazlı akış analizi sonuçlarından elde edilen ısı taşınım katsayısı iyileşmesine kıyasla çok daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum, çift fazlı akış analizi sonuçlarından elde edilen cidar sıcaklığı değerlerinin tek fazlı akış analizi sonuçlarından elde edilen değerlere kıyasla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde çeşitli çalışmalar, nanoakışkanların çift fazlı akış modellemesinden elde edilen sonuçların tek fazlı akış modellemesinden elde edilen sonuçlara kıyasla deneysel olarak elde edilen değerlere daha yakın olduğunu ve dolayısıyla daha doğru bir yaklaşım olduğunu belirtmektedir.

Mikrokanallarda akışın toplam entropi üretiminde akış sürtünmesinden kaynaklanan entropi üretiminin etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu durum mikrokanalların hidrolik

aplarının çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Akışın toplam entropi üretiminin azaltılabilmesi için, akış sürtünmesine neden olan etkenlere odaklanması gerektiği belirlenmiştir.

Genel olarak ZnO-EG nanoakışkanı, etilen glikole akışkanına kıyasla daha üstün performans gösterdiği tespit edilmiştir. Isı taşınım katsayısını iyileştirmelerinden ve mikrokanalın cidar sıcaklığının azalmasına neden olmalarından dolayı, elektronik devrelerin ve çiplerin mevcut aşırı ısınma problemlerine çözüm getirecek ve gelecekte daha yüksek kapasiteli ve yoğun çiplerin üretimine imkan sağlayacak potansiyele sahip oldukları kanaatine varılmıştır.



KAYNAKLAR

1. Burks, A. W., “Electronic computing circuits of the ENIAC”, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 35 (8): 756-767 (1947).
2. Feynman, R. P., “There’s plenty of room at the bottom-An invitation to enter a new field of physics”, *Caltech Engineering and Science*, 23 (5): 22-36 (1960).
3. Spiegel, J. V, Tau, J., Alailima, T. and Ang, L. P., “The ENIAC-History, Operation and Reconstruction in VLSI”, *The First Computers History and Architectures*, 121-178 (2000).
4. Kandlikar, S. G., Garimella, S., Li, D., Colin, S. and King, M., “Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels 2nd ed.”, *Elsevier*, Waltham, 1-8 (2014).
5. Kandlikar, S. G. and Grande, W. J., “Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology”, *Heat Transfer Engineering*, 24 (1): 3-17 (2003).
6. Choi, S. U. S. and Eastman, J. A., “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles”, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Francisco, 99-103 (1995).
7. Maxwell, J. C., “A Treatise on Electricity and Magnetism 2nd ed.”, *Clarendon Press Series*, Oxford, 1-435 (1881).
8. Das, S. K, Choi, S. U. S., Yu, W. and Pradeep, T., “Nanofluids Science and Technology”, *John Wiley and Sons*, New Jersey, 1-32 (2008).
9. Zhu, H., Lin, Y. and Yin, Y., “A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 277 (1): 100-103 (2004).
10. Tuckerman, D. B. and Pease, R. F. W., “High-performance heat sinking for VLSI”, *IEEE Electron Device Letters*, 2 (5): 126-129 (1981).
11. Peng, X. F. and Peterson, G. P., “Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39 (12): 2599-2608 (1996).
12. Harms, T. M., Kazmierczak, M. J. and Gerner, F. M., “Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20 (2): 149-157 (1999).

13. Qu, W., Mala, G. M. and Li, D., "Heat transfer for water flow in trapezoidal silicon microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43 (21): 3925-3936 (2000).
14. Qu, W., Mala, G. M. and Li, D., "Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43 (3): 353-364 (2000).
15. Judy, J., Maynes, D. and Webb, B. W., "Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (17): 3477-3489 (2002).
16. Zhao, C. Y and Lu, T. J., "Analysis of microchannel heat sinks for electronics cooling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (24): 4857-4869 (2002).
17. Wu, H. Y. and Cheng, P., "Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 (14): 2519-2525 (2003).
18. Wu, H. Y. and Cheng, P., "An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 (14): 2547-2556 (2003).
19. Lee, P. S., Garimella, S. V. and Liu, D., "Investigation of heat transfer in rectangular microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (9): 1688-1704 (2005).
20. Lee, P. S. and Garimella, S. V., "Thermally developing flow and heat transfer in rectangular microchannels of different aspect ratios", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (17-18): 3060-3067 (2006).
21. Zhuo, L., Wen-Quan, T. and Ya-Ling, H., "A numerical study of laminar convective heat transfer in microchannel with non-circular cross-section", *International Journal of Thermal Sciences*, 45 (12): 1140-1148 (2006).
22. Chen, Y., Zhang, C., Shi, M. and Wu, J., "Three-dimensional numerical simulation of heat and fluid flow in noncircular microchannel heat sinks", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36: 917-920 (2009).
23. Hasan, M. I., Rageb, A. A., Yaghoubi, M. and Homayoni, H., "Influence of channel geometry on the performance of a counter flow microchannel heat exchanger", *International Journal of Thermal Sciences*, 48: 1607-1618 (2009).
24. Wang, G., Hao, L. and Cheng, P., "An experimental and numerical study of forced convection in a microchannel with negligible axial heat conduction", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52: 1070-1074 (2009).

25. Gunnasegaran, P., Mohammed, H. A., Shuaib, N. H and Saidur, R., “The effect of geometrical parameters on heat transfer characteristics of microchannels heat sink with different shapes”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: 1078-1086 (2010).
26. McHale, J. P. and Garimella, S. V., “Heat transfer in trapezoidal microchannels of various aspect ratios”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53: 365-375 (2010).
27. Dharaiya, V. V. and Kandlikar, S. G., “Numerical investigation of heat transfer in rectangular microchannels under H2 boundary condition during developing and fully developed laminar flow”, *ASME Journal of Heat Transfer*, 134 (020911): 1-10 (2012).
28. Alfaryjat, A. A., Mohammed, H. A., Adam, N. M., Ariffin, M. K. A and Najafabadi, M. I., “Influence of geometrical parameters of hexagonal, circular, and rhombus microchannel heat sinks on the thermohydraulic characteristics”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52: 121-131 (2014).
29. Yu, W., Xie, H., Chen, L. and Li, Y., “Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid”, *Thermochimica Acta*, 491: 92-96 (2009).
30. Jeong, J., Li, C., Kwon, Y., Lee, J., Kim, S.H. and Yun, R., “Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids”, *International Journal of Refrigeration*, 36: 2233-2241 (2013).
31. Halefadi, S., Mare, T., Estelle, P. and Mohd-Ghazali, N., “Experimental investigation of rheological behavior and pressure drop of aqueous suspensions of carbon nanotubes in a horizontal tube”, *Procedia Engineering*, 56: 344-349 (2013).
32. Halefadi, S., Mare, T. and Estelle, P., “Efficiency of carbon nanotubes water based nanofluids as coolants”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53: 104-110 (2014).
33. Esfe, M. H. and Saedodin, S., “An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO-EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 55: 1-5 (2014).
34. Esfe, M. H. and Saedodin, S., “Experimental investigation and proposed correlations for temperature-dependent thermal conductivity enhancement of ethylene glycol based nanofluid containing ZnO nanoparticles”, *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, 1: 47-54 (2014b).

35. Pastoriza-Gallego, M. J., Lugo, L., Cabaleiro, D., Legido, J. L. and Pineiro, M. M., “Thermophysical profile of ethylene glycol-based ZnO nanofluids”, *Journal of Chemical Thermodynamics*, 73: 23-30 (2014).
36. İlbilgi, L., “Nanoakışkanlı bir tüp içerisinde zorlanmış konveksiyonla ısı transferinin sayısal incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-216 (2010).
37. Suresh, S., Chandrasekar, M. and Selvakumar, P., “Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of CuO/water nanofluid under laminar flow in a helically dimpled tube”, *Heat Mass Transfer*, 48: 683-694 (2012).
38. Ahmed, M. A., Yusoff, M. Z. and Shuaib, N. H., “Effects of geometrical parameters on the flow and heat transfer characteristics in trapezoidal-corrugated channel using nanofluid”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 42: 69-74 (2013).
39. Madhesh, D. and Kalaiselvan, S., “Experimental study on the heat transfer and flow properties of Ag-ethylene glycol nanofluid as a coolant”, *Heat Mass Transfer*, 50: 1597-1607 (2014).
40. Suganthi, K.S., Vinodhan, V. L. and Rajan, K. S., “Heat transfer performance and transport properties of ZnO-ethylene glycol and ZnO-ethylene glycol-water nanofluid coolants”, *Applied Energy*, 135: 548-559 (2014).
41. Cabaleiro, D., Colla, L., Agresti, F., Lugo, L. and Fedele, L., “Transport properties and heat transfer coefficients of ZnO/(ethylene glycol+water) nanofluids”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89: 433-443 (2015).
42. Tsai, T. H. and Chein, R., “Performance analysis of nanofluid-cooled microchannel heat sinks”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28: 1013-1026 (2007).
43. Jung, J. Y., Oh, H. S. and Kwak, H. Y., “Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52: 466-472 (2009).
44. Mohammed, H. A., Gunnasegaran, P. and Shuaib, N. H., “Heat transfer in rectangular microchannels heat sink using nanofluids”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: 1496-1503 (2010).
45. Chen, C. H. and Ding, C. Y., “Study on the thermal behavior and cooling performance of a nanofluid-cooled microchannel heat sink”, *International Journal of Thermal Sciences*, 50: 378-384 (2011).
46. Mohammed, H. A., Gunnasegaran, P. and Shuaib, N. H., “The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance”,

- International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38: 767-773 (2011).
47. Lelea, D., "The performance evaluation of Al₂O₃/water nanofluid flow and heat transfer in microchannel heat sink", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (17-18): 3891-3899 (2011).
 48. Ijam, A., Saidur, R. and Ganesan, P., "Cooling of minichannel heat sink using nanofluids" *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39 (8): 1188-1194 (2012).
 49. Ijam, A. and Saidur, R., "Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices)", *Applied Thermal Engineering*, 32: 76-82 (2012).
 50. Mital, M., "Analytical analysis of heat transfer and pumping power of laminar nanofluid developing flow in microchannels", *Applied Thermal Engineering*, 50 (1): 429-436 (2013).
 51. Salman, B. H., Mohammed, H. A. and Kherbeet, A. Sh., "Numerical and experimental investigation of heat transfer enhancement in a microtube using nanofluids", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 59: 88-100 (2014).
 52. Sivakumar, A., Alagumurthi, N. and Senthilvelan, T., "Experimental and numerical investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/water and CuO/EG in a serpentine shaped microchannel heat sink", *International Journal of Heat and Technology*, 33 (1): 155-160 (2015).
 53. Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method 2nd Edition", *Pearson Education Limited*, London, 1-143 (2007).
 54. Savithiri, S., Pattamatta, A. and Das, S. K., "Scaling analysis for the investigation of slip mechanisms in nanofluids", *Nanoscale Research Letters*, 6 (1): 471-485 (2011).
 55. Xuan, Y. and Roetzel, W., "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43 (19): 3701-3707 (2000).
 56. Kumar, S., Prasad, S. K. and Banerjee, J., "Analysis of flow and thermal field in nanofluid using a single phase thermal dispersion model", *Applied Mathematical Modeling*, 34 (3): 573-592 (2010).
 57. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S., "Introduction to Heat Transfer 5th Edition", *John Wiley and Sons*, New Jersey, 857 (2007).

58. Vajjha, R. S. and Das, D. K., “Specific heat measurement of three nanofluids and development of new correlations”, *Journal of Heat Transfer*, 131 (7): 071601-071608 (2009).
59. Patankar, S. V., “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow 1st Edition”, *Hemisphere Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences*, New York, 126-130 (1980).
60. ANSYS, “ANSYS Fluent Theory Guide”, *ANSYS, Inc.*, Southpointe, 465-601 (2013).
61. Wen, C. Y. and Hu, Y. H., “Mechanics of Fluidization”, *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 100-111 (1966).
62. Gidaspow, D., Bezburuah, R. and Ding, J., “Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach”, *Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*, Chicago, 75-82 (1992).
63. Syamlal, M., Rogers, W. and O’Brien, T. J., “MFIX Documentation Theory Guide”, *National Technical Information Service*, Springfield, 1-39 (1993).
64. Ogawa, S., Umemura, A. and Oshima, N., “On the equation of fully fluidized granular materials”, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 31: 483 (1980).
65. Moraveji, M. K. and Ardehali, R. M., “CFD modeling (comparing single and two-phase approaches) on thermal performance of Al₂O₃/water nanofluid in mini-channel heat sink”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44: 157-164 (2013).
66. Ho, C. J. and Chen, W. C., “An experimental study on thermal performance of Al₂O₃/water nanofluid in a minichannel heat sink”, *Applied Thermal Engineering*, 50 (1): 516-522 (2013).
67. Bejan, A., “Entropy Generation through Heat and Fluid Flow 1st Edition”, *John Wiley and Sons*, 1-248 (1982).
68. Sohel, M. R., Saidur, R., Hassan, N. H., Elias, M. M., Khaleduzzaman, S. S. and Mahbubul, I. M., “Analysis of entropy generation using nanofluid flow through the circular microchannel and minichannel heat sink”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 46: 85-91 (2013).

ÖZGEÇMİŞ

Cüneyt UYSAL 1987 yılında Eskişehir’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2004 yılında Eskişehir Gazi Lisesi’nden mezun oldu. 2008 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Uşak Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden fakülte birincisi olarak mezun oldu. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Bilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2011 yılında Yükseköğretim Kurulu Yurtdışı Yüksek Lisans Tez Araştırma Bursu kapsamında Chung-Ang Üniversitesi (Güney Kore) Makine Mühendisliği Bölümü’nde Misafir Araştırmacı olarak 2 ay süre ile görev yaptı. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’ndan yüksek lisans derecesini aldı. Halen Karabük Üniversitesi’nde araştırma görevlisi olarak görevine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

Tel : (370) 433 20 21 Dahili: 3978

E-posta : cuneytuysal@karabuk.edu.tr