SİLİNDİRİK KANALLARDA NANOAKIŞKANLARLA LAMİNER ZORLANMIŞ TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL ANALİZİ

İSMAİL OZAN SERT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2012

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

_____

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

_____

Prof. Dr. Ünver KAYNAK

Anabilim Dalı Başkanı

İsmail Ozan SERT tarafından hazırlanan "Silindirik Kanallarda Nanoakışkanlarla Laminer Zorlanmış Taşınımla Isı Transferinin Sayısal Analizi" adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER-UZOL	Prof. Dr. Sadık KAKAÇ
Birinci Tez Danışma	İkinci Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Üye : Prof. Dr. Sadık KAKAÇ _____

Üye : Yrd.Doç. Dr. Nilay SEZER-UZOL _____

Üye : Doç. Dr. Almıla G. YAZICIOĞLU _____

(Orta Doğu Teknik Üniversitesi)

Üye : Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şule ERGÜN _____

(Hacettepe Üniversitesi)

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İsmail Ozan SERT

Üniversitesi : **TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi**

Enstitüsü : **Fen Bilimleri**

Anabilim Dalı : **Makine Mühendisliği**

Birinci Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER-UZOL**

İkinci Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Sadık KAKAÇ**

Tez Türü ve Tarihi : **Yüksek Lisans - Aralık 2012**

İSMAİL OZAN SERT

SİLİNDİRİK KANALLARDA NANOAKIŞKANLARLA LAMİNER ZORLANMIŞ TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL ANALİZİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, nanoakışkanların zorlanmış taşınımla ısı transferi özellikleri silindirik kanal içerisinde zamana bağlı, laminer akış için duvar sıcaklığında ve ısı akısındaki ani değişim sınır koşulları altında sayısal analizler yapılarak incelenmiştir. Hidro-dinamik olarak tam gelişmiş akış için sistemin ısıl tepkileri enerji denkleminin çözülmesiyle hem zamana bağlı hem de daimi rejimde elde edilmiştir. Sayısal analizlerde Al_2O_3/su nanoakışkanı homojen tek-fazlı akış olarak kabul edilmiştir. Nanoakışkanın etkin ısıl iletim katsayısı için sıcaklık ve nanoparçacığın çapının etkisini hesaba katan Brownian hareketini de göz önünde bulunduran Koo-Kleinstreuer modeli kullanılmıştır. Isıl iletim katsayısındaki değişimler sonucu meydana gelen ısı transferindeki artış; farklı zaman adımlarında belirtilen Peclet sayısı ve nanoparçacık çapı için nanoparçacık hacimsel oranının bir fonksiyonu olarak bulunmuştur. Daimi rejim sonuçları büyük zaman adımlarına ulaşılmasıyla hesaplanmıştır. Tez çalışmasının ikinci kısmında, nanoakışkanlarla silindirik kanal içerisindeki başlangıçta hidro-dinamik olarak tam gelişmiş akış, sabit duvar sıcaklığı ve ısı akısı koşulları altında iki-fazlı karışım modeli kullanılarak Fluent yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Sistemin ısıl davranışları Al_2O_3/su nanoakışkanı için farklı ısıl iletim katsayısı ve viskozite modelleri kullanılarak incelenmiştir. Isıl iletim katsayısı ve viskozite modellerinin ısı transferindeki artırıma etkisi farklı nanoparçacık hacimsel oranları ve boyutları için hesaplanmıştır. Sonuçlar daha önce literatürde yer alan bir deneysel çalışmayla aynı sınır koşulları ve geometri için kıyaslanmıştır. Ayrıca tek-fazlı akış Fluent simülasyonları Koo-Kleinstreuer modeliyle gerçekleştirilmiş ve iki-fazlı karışım akış modeli ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nanoakışkanlar, Isıl iletim katsayısı modelleri, ısı transferindeki artış, Brownian hareketi.

University : **TOBB University of Economics and Technology**

Institute : **Institute of Natural and Applied Sciences**

Science Programme : **Mechanical Engineering**

Supervisor : **Assist. Prof. Dr. Nilay SEZER-UZOL**

Co-supervisor : **Prof. Dr. Sadık KAKAÇ**

Degree Awarded and Date : **M.Sc. – December 2012**

İSMAİL OZAN SERT

NUMERICAL ANALYSIS OF LAMINAR FORCED CONVECTION HEAT TRANSFER WITH NANOFLUIDS IN CIRCULAR CHANNELS

ABSTRACT

In this study, forced convection heat transfer characteristics of nanofluids are investigated by numerical analysis of transient laminar flow in a circular duct under step change in wall temperature and wall heat flux. The thermal responses of the system are obtained by solving energy equation under both transient and steady-state conditions for hydro-dynamically fully developed flow. In the numerical analysis, Al_2O_3/water nanofluid is assumed as a homogenous single-phase fluid. For the effective thermal conductivity of nanofluids, Koo-Kleinstreuer model in the analysis which takes the effects of temperature and the particle diameter into account. Variations of thermal conductivity in turn, heat transfer enhancement is obtained at various times as a function of nanoparticle volume fractions, at a given nanoparticle diameter and Peclet number. Steady-state conditions are obtained by reaching larger times steps. In the second part of this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations for initially hydro-dynamically fully developed laminar flow with nanofluids in a circular duct under constant wall temperature and constant wall flux conditions are performed with two-phase mixture model by using Fluent software. Thermal behaviors of the system are investigated for Al_2O_3/water nanofluid by using different thermal conductivity and viscosity models. The effects of thermal conductivity and viscosity models on the heat transfer enhancements are calculated for different nanoparticle volume fractions and diameters. The results are compared with a previous experimental study in the literature for the same geometry and boundary conditions. Also single-phase model Fluent simulations are performed for Koo-Kleinstreuer thermal conductivity model and compared with two-phase mixture model results.

Key words: Nanofluids, thermal conductivity models, enhancement of heat transfer, Brownian motion.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli katkıları ve desteğiyle beni yönlendiren hocalarım Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER-UZOL, Prof. Dr. Sadık KAKAÇ ve Doç. Dr. Almıla GÜVENÇ YAZICIOĞLU'na, proje boyunca beraber çalışmaktan memnuniyet duyduğum Büryan APAÇOGLU, Oğuz KİREZ ve Elif Begüm ELÇİOĞLU'na, maddi destekleri için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna ve manevi desteklerinden ötürü ailem, ofis arkadaşlarım ve tüm TOBB ETÜ ailesine çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ BİLDİRİMİ.....ii

ÖZET.....iv

ABSTRACT.....v

TEŞEKKÜR.....vi

İÇİNDEKİLER.....vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....xii

KISALTMALAR.....xv

SEMBOL LİSTESİ.....xvi

1. GİRİŞ.....1

1.1. Literatür Araştırması.....2

1.2. Tezin Amacı ve Konusu.....10

2. NANOAKIŞKANLARIN TERMO-FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....12

2.1. Isıl İletim Katsayısı.....12

2.1.1. Koo-Kleinstreuer Modeli.....12

2.1.2 Chon Modeli.....14

2.1.3. Corcione Modeli.....15

2.1.4 Fluent Modeli.....16

2.2 Viskozite.....16

2.3 Yoğunluk.....17

2.4 Özgül Isı.....18

2.5 Baz Akışkanın Sıcaklığa Bağlı Termo-Fiziksel Özellikleri.....18

3. NANOAKIŞKANLARLA KANAL İÇERSİNDEKİ ISI TRANSFERİNİN MODELLENMESİ.....20

3.1 Problemin Geometrisi.....21

3.2. Zamana Bağlı Tek-Fazlı Akış Modeli.....21

3.2.1 Problemin Tanımı.....22

3.2.2 Enerji Denkleminin Boyutsuzlaştırılması.....23

3.2.3 Sınır koşulları.....25

3.2.3.1 Duvar Sıcaklığındaki Ani Değişim.....26

3.2.3.2. Duvar Isı Akısındaki Ani Değişim.....26

3.2.3.3 Diğer Sınır Koşulları.....27

3.2.4. Sayısal Yöntem.....28

3.2.4.1 Enerji Denkleminin Ayrılaştırılması.....28

3.2.4.2. Kararlılık Analizi.....29

3.3. İki-Fazlı Akış Karışım Modeli (Fluent).....31

3.3.1. Problemin Tanımı.....31

3.3.2. Sınır Koşulları.....34

3.3.2.1 Sabit Duvar Sıcaklığı.....35

3.3.2.2. Sabit Duvar Isı Akısı.....36

3.3.3. Sayısal Yöntem.....36

3.3.4. Çözüm Ağı Çalışması.....37
4. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR.....41
4.1 Sayısal Analizlerin Doğrulanması.....41
4.1.1 Zamana Bağlı Tek-Fazlı Akış Modeli (Özgün Kod).....41
4.1.2 İki-Fazlı Akış Karışım Modeli (Fluent).....43
4.2. Zamana Bağlı Tek-Fazlı Akış Modeli Sonuçları (Özgün Kod).....45
4.2.1. Isı Transferi ve Isıl İletim Katsayılarının Zamana Bağlı Değişimleri.....45
4.2.1.1. Duvar Sıcaklığındaki Ani Değişim.....46
4.2.1.2. Duvar Isı Akısındaki Ani Değişim.....50
4.2.2. Daimi rejimde Tek-Fazlı Akış Modeli Sonuçları.....53
4.3 İki-Fazlı Akış Karışım Modeli Sonuçları (Fluent).....58
4.3.1. Isıl İletim Katsayısı Modelleri.....58
4.3.2. Viskozite Modelleri.....71
4.4 Karşılaştırmalar.....75
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER.....78
5.1. Gelecek Çalışmalar.....81
KAYNAKLAR.....82
EK-A.....87
ÖZGEÇMİŞ.....89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 2.1	Sayısal analizlerde kullanılan viskozite modelleri.	17
Çizelge 2.2	Geleneksel akışkanın (su) sıcaklığa bağlı ısıl iletim katsayısı ve viskozitesi.	19
Çizelge 3.1	x ekseninde çözüm ağı çalışması.	38
Çizelge 3.2	r ekseninde çözüm ağı çalışması.	40
Çizelge 4.1	Kanal çıkışındaki ısı transferi katsayılarının farklı hacimsel parçacık oranı ve boyutsuz zaman adımları için duvar sıcaklındaki ani değişim koşulunda (DSAD) gösterimi.	50
Çizelge 4.2	Kanal çıkışındaki ısı transferi katsayılarının farklı hacimsel parçacık oranı ve boyutsuz zaman adımları için duvar ısı akısındaki ani değişim koşulunda (DIAD) gösterimi.	53
Çizelge 4.3	Ortalama ısı transferi katsayıları, Nusselt sayıları ve ısı transferindeki artışın hacimsel nanoparçacık oranlarıyla değişimleri.	55
Çizelge 4.4	Nanoparçacık boyutunun ısı transferindeki artışa etkisi.	57
Çizelge 4.5	Koo-Kleinstreuer modeli ile farklı sınır koşulları için ortalama Isı transferi katsayısı ve ısı transferindeki artışın hacimsel parçacık oranına göre değişimi.	61
Çizelge 4.6	Chon modeli etkisiyle farklı sınır koşulları için ortalama ısı transferi katsayısı ve ısı transferindeki artışın hacimsel parçacık oranına göre değişimi.	63
Çizelge 4.7	Corcione modeli etkisiyle sınır koşulları için ortalama ısı transferi katsayısı ve ısı transferindeki artışın hacimsel parçacık oranına göre değişimi.	65

Çizelge 4.8 Farklı ısıl iletim modellerinin ısı transferindeki etkileri. 69

Çizelge 4.9 Farklı modeller için ortalama viskozite değerleri. 73

Çizelge 4.10 Farklı viskozite modelleri ile ısı transferindeki artış. 75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil		Sayfa
Şekil 3.1	Problemin geometrisi	21
Şekil 3.2	Silindirik kanal geometrisi ve çözüm ağı yapısı	37
Şekil 3.3	Sayısal hata tahmini için *x*-eksenindeki oluşturulan farklı çözüm ağı sonuçları.	39
Şekil 3.4	*r*-ekseni doğrultusunda oluşturulan çözüm ağları.	40
Şekil 4.1	Duvar sıcaklığındaki ani değişim sonucu elde edilen zamana karşı boyutsuz duvar ısı akı sonuçlarının karşılaştırılması.	42
Şekil 4.2	Duvar ısı akısındaki ani değişim sonucu elde edilen zamana karşı boyutsuz duvar sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması.	43
Şekil 4.3	Kanal boyunca ısı transfer katsayılarının Fluent ve Graetz çözümü ile kıyaslanması.	44
Şekil 4.4	Nusselt sayılarının farklı sınır koşulları için zamana göre değişimi.	46
Şekil 4.5	Ortalama ısı transferi katsayılarının farklı parçacık hacimsel oranlarıyla zamana göre değişimi (DSAD).	47
Şekil 4.6	Kanal boyunca ısı transferi katsayılarının farklı zaman adımlarında değişimi (DSAD).	48
Şekil 4.7	Kanal boyunca ısıl iletim katsayılarının farklı zaman adımlarında değişimi (DSAD).	49
Şekil 4.8	Ortalama ısı transferi katsayılarının farklı parçacık hacimsel oranlarıyla zamana göre değişimi (DIAD).	51
Şekil 4.9	Kanal boyunca ısı transferi katsayılarının farklı zaman adımlarında değişimi (DIAD).	52

Şekil 4.10	Kanal boyunca ısıl iletim katsayılarının farklı zaman adımlarında değişimi (DIAD).	52
Şekil 4.11	Kanal boyunca daimi rejimde ısı transferindeki artışın farklı hacimsel parçacık oranlarıyla değişimi (DSAD).	56
Şekil 4.12	Peclet sayısının ısı transferindeki artışa etkisi.	56
Şekil 4.13	Nanoparçacık boyutunun ısı transferindeki artışa etkisi.	58
Şekil 4.14	a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu b) Sabit suvar ısı akısı için Koo-Kleinstreuer modeli sonucu ısı transferindeki artış oranları.	60
Şekil 4.15	a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu b) Sabit suvar ısı akısı için Chon modeli sonucu ısı transferindeki artış oranları.	62
Şekil 4.16	a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu b) Sabit suvar ısı akısı için Corcione modeli sonucu ısı transferindeki artış oranları.	64
Şekil 4.17	a) %1 b) %4 nanoparçacık hacimsel oranıyla farklı ısıl iletim katsayısı modelleri etkisi sonucu sabit duvar sıcaklığı (SDS) sınır koşul için kanal boyunca ısı transferindeki artıştaki değişim.	66
Şekil 4.18	a) %1 b) %4 nanoparçacık hacimsel oranıyla farklı ısıl iletim katsayısı modelleri etkisi sonucu sabit duvar ısı akısı (SIA) sınır koşul için kanal boyunca ısı transferindeki artıştaki değişim.	68
Şekil 4.19	a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu b) Sabit suvar ısı akısı ile farklı parçacık boyutları için ısı transferindeki artış oranları.	70
Şekil 4.20	a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu b) Sabit suvar ısı akısı ile farklı viskozite modellerinin kanal boyunca değişimleri.	72
Şekil 4.21	a) Sabit duvar sıcaklığı b) Sabit suvar ısı akısı koşulunda farklı viskozite modelleri ile kanal boyunca ısı transferindeki artış dağılımları.	74
Şekil 4.22	Deneysel ısı transferi katsayısı sonuçlarının Koo-Kleinstreuer ısıl	76

iletim katsayısı modeli kullanılarak tek-fazlı akış özgün kod ve iki-fazlı akış karışım modeliyle karşılaştırılması

Şekil 4.23 Deneysel ısı transferi katsayısı sonuçlarının farklı ısıl iletim katsayısı modelleri kullanılarak iki-fazlı akış karışım modeliyle karşılaştırılması. 76

Şekil 4.24 Fluent tek-fazlı akış ve Fluent iki-fazlı akış karışım modeli karşılaştırması. 77

KISALTMALAR

Kısaltmalar	Açıklama
DSAD	Duvar Sıcaklığındaki Ani Değişim
DIAD	Duvar Isı Akısındaki Ani Değişim
SDS	Sabit Duvar Sıcaklığı
SIA	Sabit Duvar Isı Akısı
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

SEMBOL LİSTESİ

Simgeler	**Açıklama**
a	İvme, m/s^2
c	Özgül ısı, $J/kg.K$
c_p	Faz ağırlık oranı
d	Çap, m
f	Deneysel sabit
f_{drag}	Sürükleme katsayısı
h	Isı transferi katsayısı, $W/m^2.K$
H	Entalpi, kJ/kg
k	Isıl iletim katsayısı, $W/m.K$
l	Ortalama serbest yol, m
L	Kanal uzunluğu, m
n	Parçacık şekil katsayısı
Nu	Nusselt sayısı
p	Basınç, Pa
Pe	Peclet sayısı
Pr	Prandtl sayısı
r	r ekseni
r_0	Kanal yarıçapı, m
Re	Reynolds sayısı

$\dot{q}$	Isı üretimi, W/m^3
q''	Isı akısı, W/m^2
T	Sıcaklık, K
t	Zaman, s
u	Hız, m/s
x	x ekseni
$\vec{\upsilon}$	Vektörel hız, m/s
α	Isıl yayılım katsayısı, m^2/s
β	Deneysel sabit
ε	Hata oranı
θ	Boyutsuz sıcaklık
κ_b	Boltzman Sabiti, $1.381*10^{-23}$, J/K
μ	Dinamik viskozite, $Pa.s$
ρ	Yoğunluk, kg/m^3
τ	Relaxation zamanı, s
φ	Viskoziteye bağlı enerji yitimi, W/m^3
ϕ	Hacimsel nanoparçacık oranı

Alt-indisler	**Açıklama**
b	yığın
Br	Brownian
dr	Sürüklenme
eff	etkin

f	Akışkan
fr	Donma noktası
i	Giriş
m	Karışım
nf	Nanoakışkan
ort	Ortalama
T	Yerel
w	Duvar
x	Eksenel yön

Üst-İndisler	**Açıklama**
*	Boyutsuz parametreler

1. GİRİŞ

Nanoakışkankanlar, metalik veya metalik olmayan 100 nm'den küçük parçacıkların su, yağ ve etilen glikol gibi geleneksel akışkanların içinde hapsolmasıyla elde edilmektedir. Yıllar boyunca birçok endüstriyel alanda daha iyi ısı transferi sağlamak için çeşitli uygulamalar geliştirilmiş, fakat geleneksel akışkanların düşük ısıl iletim katsayıları değerleri yüzünden ısı transferindeki artış belirli bir noktada sınırlandırılmıştır. Geleneksel akışkanlara oranla daha yüksek ısıl iletim katsayısı değerlerine sahip nanoakışkanlar, ısı transferinin çok önemli olduğu güç santrallerinden elektronik cihazların soğutulmasına kadar birçok uygulama alanlarında ümit verici ısı transferi artışı değerleri vaat etmektedirler.

Masuda vd. [1] geleneksel akışkanların ısıl iletim katsayıları sınırlı olduğundan dolayı sıvı içerisine küçük katı parçacıkları ekleyerek ısı transferini arttırmayı amaçlamıştır. Her ne kadar mikro ve milimetre düzeyindeki katı parçacıkların sıvı içersine eklenerek ısı transferini arttırma işlemi daha önceki senelerden beri bilinse de bu işlemin yol açtığı çökelme, erozyon ve basınç düşümü gibi problemler yüzünden pek tercih edilmemektedir.

Nanoteknolojideki gelişmeler sonucu, Nanoakışkan kelimesi literatürde ilk olarak 1995 yılında Choi [2] tarafından nanometre boyutundaki katı parçacıkların sıvı içinde süspansiyonları sonucu oluşan akışkanlar olarak tanılanmıştır. Choi vd. [3] çok küçük nanoparçacık konsantrasyonlarında bile nanoakışkanın ısıl iletim katsayısının anormal bir şekilde yükseldiğini ortaya koymuşlardır. Bu iki çalışma [1, 2] ve ardından yapılan birçok deneysel araştırma nanoakışkanlarla oldukça yüksek ısıl iletim katsayısı artışları elde edilebileceğini göstermiştir [3-5]. Nanoakışkanlarda gözlenen bu yüksek ısıl iletim katsayısı artışları, ısı transferi ekipmanlarının verimliliğinin artırılabilmesi fırsatını sunmaktadır. Buna bağlı olarak ısı transferi ekipmanlarının boyutlarının küçültülmesi ve ekipmanların işletme giderlerinin azaltılması mümkün olacaktır. Choi vd.[2] çalışmalarından sonra nanoakışkanlarla ilgili birçok deneysel ve teorik çalışmalar hızlı bir şekilde artarak devam etmektedir.

1.1. Literatür Araştırması

Tez çalışmasının bu kısmında nanoakışkanlarla ilgili yapılmış literatürdeki önemli çalışmalar özetlenecektir.Nanoakışkanların ısı transferine etkilerini daha iyi anlamak için, nanoakışkanların ısıl iletim katsayısı başta olmak üzere termo fiziksel özellikleri, nanoparçacıkların çeşitleri, şekilleri ve boyutları ayrıca sıvı içindeki hareketlerinin bu termo-fiziksel özelliklere etkileri literatürde birçok teorik ve deneysel çalışmayla açıklanmıştır

Koo ve Kleinstreuer [6], Hamilton Crosser [7] ısıl iletim modelini ve Brownian hareketinin etkisini göz önünde bulundurarak nanoakışkanlar için yeni bir ısıl ileti katsayısı modeli önermişlerdir. Bu model ile Brownian hareketine bağlı olarak sıcaklığın ve nanoparçacık boyutunun etkileri ısıl iletim katsayı modeline eklenmiştir.

Chon vd. [8] elde ettikleri deneysel sonuçları Jang ve Choi [9]'nin ortaya koyduğu teorik çalışmaları esas alarak sıcaklığa ve nanoparçacık boyutuna bağlı ısıl iletim katsayısı modeli oluşturmuşlardır. Bu ısıl iletim katsayısı modeli, deneysel veriler doğrultusunda 11 nm'den 151 nm'ye kadar farklı parçacık boyutları ve belirli bir sıcaklık aralığındaki (20°-71°C) Al_2O_3/su nanoakışkanı için tanımlanmıştır.

Corcione [10] literatürde farklı boyutlarda ve hacimsel oranlarda nanoparçacıklar için yapılmış çeşitli deney sonuçlarını nanoakışkan ısıl iletim katsayısı ve viskozitesi için birer eşilişki haline getirmiştir. Bu model 10-150 nm çapındaki nanoparçaçık boyutları için 21-51°C sıcaklıkları aralığında geçerlidir.

Nanoakışkanların sağladığı ısı transferindeki artışın nedeni açıklamak için termo fiziksel özelliklerdeki değişimlerin yeterli gelmemektedir. Bu değişimlerin yanı sıra çeşitli fiziksel mekanizmaların etkileri sonucu oluşan ısı transferindeki ilave artış literatürde ortaya konmuştur.

Keblinski vd.[11] yaptıkları çalışmada ısı transferindeki ilave artışın Brownian hareketi, nanoparçacık çevresinde oluşan sıvı katmanın kalınlığı, nanoparçacık kümelenmeleri ve son olarak da yakın mesafedeki nanoparçacık radyasyonu olarak açıklamıştır.

Özerinç vd.[12] yaptıkları çalışmada literatürde ısıl iletim katsayısı ile ilgili deneysel sonuçlarla nicel değerleri karşılaştırmışlar ve bu sonuçların birbirleriyle tutarlılıklarını incelemişlerdir.

Buongiorno [13] nanoakışkanların sağladığı ısı transferindeki artışın sebebini teorik olarak detaylı bir şekilde incelemiştir. Yaptığı çalışmada akışkan ve nano parçacık arasındaki kayma mekanizmaları üzerinde durmakta ve yedi adet kayma mekanizmasından bahsetmektedir. Bunlar; atalet, Brownian yayınımı, termoforez, difüzyoforez, Magnus etkisi, akıtım (drainage) ve yer çekimidir. Yaptığı mertebe analizleri sonrasında, ısı transferinde fark yaratabilecek kayma etkilerinin Brownian hareketi ve termoforesis olabileceğini söylemiştir. Bu mekanizmaların; nanoakışkan süreklilik, momentum ve enerji denklemine ek olarak nano parçacık süreklilik denkleminin de çözülmesiyle çözüme dahil edilebileceğini belirtmiştir.

Bu nedenle ısıl dağılışımın etkisinin önemsiz olduğu sonucuna varan Buongiorno, Brownian hareketi ve termoforezin parçacık hacimsel oranı dağılımını etkileyeceğini söylemektedir. Yazara göre, hacimsel oranın yerel olarak değişmesi, nanoakışkanın termofiziksel özelliklerinin değişmesine sebep olmaktadır. Termofiziksel özelliklerin yerel olarak değişmesi, sıcaklığın daha düz bir dağılıma sahip olmasını sağlamaktadır. Literatürde yer alan sayısal ve deneysel çalışmalar arasındaki farklılıklar, ısıl dağılışımdan değil, parçacıkların dağılımı sonucunda nanoakışkan özelliklerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, akışın iki-fazlı akış yaklaşımıyla çözülerek hacimsel oran dağılımının bulunması daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Özet olarak, nanoakışkan enerji denkleminde kayma mekanizmalarına bağlı ısı aktarımı ihmal edilebilirken, parçacık hacimsel oranındaki dağılımda bu mekanizmalar göz önünde bulundurulmalı, termofiziksel özellikler bu dağılıma göre hesaplanmalıdır.

Xuan ve Roetzel [14] nanoakışkanlar ile elde edilen ısı transferi artışının ısıl dağılışım olayı ile açıklanabileceğini belirtmiştir. Araştırmacılar ısıl dağılışımın nedeni olarak nanoparçacıkların rastlantısal hareketlerini göstermişlerdir. Yapılan çalışmada, bu rastlantısal hareketlerin akışın hız ve sıcaklık dağılımında ufak çapta ani dalgalanmalar yaratacağı belirtilmiştir. Xuan ve Roetzel tarafından sunulan bu çalışmada nanoakışkanların ısı transferi analizinde Boungiorno'dan [13] farklı olarak

nanoakışkanın tek fazlı bir akış modeli olarak ele alınmasının yeterli olacağı belirtilmiştir.

Nanoakışkanlarda gözlemlenen yüksek ısı transferi artışını açıklamak amacıyla yapılan başka bir çalışma, Ding ve Wen tarafından gerçekleştirilmiştir [15]. Ding ve Wen, çalışmalarında, kesme kuvvetleri, viskozite gradyanı ve Brownian hareketi sonucu yaşanan nanoparçacık göçünü teorik olarak incelemişler ve nanoparçacık konsantrasyonunun kanalın merkezinden kanal duvarına gidildikçe azaldığını göstermişlerdir. Söz konusu parçacık dağılımının nanoakışkan termofiziksel özelliklerinin kanal kesiti boyunca değişmesine yol açacağı ve bu durumun akışın hız ve sıcaklık dağılımını etkileyeceği belirtilmiştir. Sonuç olarak, hız ve sıcaklık dağılımındaki söz konusu değişikliklerin nanoakışkanlarda fazladan bir ısı transferi artışına neden olacağı açıklanmıştır.

Nanoakışkanların önemli diğer bir termo fiziksel özelliklerinden biri de viskozitedir. Akışkanlara nanoparçacıkların eklenmesiyle oluşan viskozitedeki artış kanal basınç düşümünün artması ve daha fazla pompa gücüne ihtiyaç duyulmasına yol açar. Nanoakışkan viskozite değerleri literatürde teorik ve deneysel çalışmalar sonucu ortaya konan viskozite modelleriyle açıklanmıştır [16-23].

Einstein [16] düşük hacimsel parçacık oranları için teorik bir viskozite modeli oluşturmuştur, bu model çok temel olmakla beraber viskozitedeki artışı sadece hacimsel parçacık oranına bağlı olduğunu ileri sürmüştür. Brinkman [17], Einstein modelini daha yüksek parçacık konsantrasyonları için genelleştirmiş, ve Batchelor [18], Brownian hareketini etkisini hesaba katarak Einstein modelini geliştirerek bir eşilişki oluşturmuştur.

Masoumi vd.'nin çalışmasında [19], nanoakışkan viskozite hesabı için, parçacıkların Brownian hareketi dikkate alınarak yeni bir denklem türetilmiştir. Bu denklemde geleneksel akışkan ile nanoparçacıklar arasındaki görece hız hesaba katılmıştır. Nanoakışkan viskozitesi sıcaklığın, nanoparçacık ortalama çapının, nanoparçacık hacimsel oranının, nanoparçacık yoğunluğunun ve geleneksel akışkan fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Corcione [10] literatürdeki birçok deneysel verileri kullanarak nanoakışkan viskozitesi için bir eşilişki bulmuştur.

Nguyen vd. [20] parçacık boyutu, çeşidi ve akışkanın sıcaklık değişimlerinin nanoakışkan viskozitesine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır.

Einstein modeli ve benzer olarak diğer toerik modellerle [16-18] elde edilen viskozite değerleri deneysel sonuçalara göre daha düşük ve iyimser bir tablo ortaya koyduğu için; Maïga vd. [21], Masuda vd. [1], Lee vd.[22] ve Wang vd. [23]'nin yaptığı deneysel çalışmaların verilerine eğri uydurma methoduyla bir eşilişki elde etmişlerdir.

Nanoakışkanların ısı transferine etkileri, ısıl iletim katsayı ve viskozite gibi fiziksel özelliklerin modellenmesinden öte; birçok deneysel ve sayısal analizler yapılması sonucu elde edilen ısı transferi katsayılarının incelenmesiyle açıklanmaya çalışılmıştır.

Pak ve Cho [24], Al_2O_3(13 nm)/su ve TiO_2(27 nm)/su nanoakışkanlarının taşınımla ısı transferi performansını türbülanslı akışta incelemişlerdir. Sınır koşulu olarak sabit ısı akısı ele alınmıştır. Hacimsel olarak %2.78 nanoparçacık içeren Al_2O_3/su nanoakışkanı kullanılarak taşınım ısı transferi katsayısında %75'e varan artışlar gözlenmiştir. TiO_2 parçacıkları ile elde edilen artışın Al_2O_3 parçacıkları ile elde edilene nazaran daha düşük olduğu belirtilmiştir.

Li ve Xuan [25] benzer bir analizi Cu/su nanoakışkanı için laminer ve türbülanslı akışta gerçekleştirmiştir. Çalışmada ısı transferi katsayısındaki artışın %60'lara vardığı gözlenmiştir. Araştırmacılar, artan Reynolds sayısı ile birlikte ısı transferi katsayısı artışının yükseldiğini belirtmişler ve bu durumu ısıl dağılışım (thermal dispersion) olayına bağlamışlardır. Isıl dağılışım olayı teorik çalışmalar kısmında izah edilecektir.

Chen vd. [26] yaptıkları analizde TiO_2 nanotüpleri/su nanoakışkanını laminer akışta, sabit ısı akısı sınır koşulu altında incelemişlerdir. Kullanılan TiO_2 nanotüpleri yaklaşık 10 nm çapında ve yaklaşık 100 nm boyundadır. Re = 1700 için, tam gelişmiş ısı transferi katsayısının 800 W/m^2K'e ulaştığı görülmüştür. Bu değerin farklı hacimsel parçacık oranları için yaklaşık olarak sabit kaldığı belirtilmiştir.

Kulkarni vd. [27] SiO_2/su-etilen glikol karışımı nanoakışkanının türbülanslı akımdaki ısı transferi performansını sabit ısı akısı sınır şartı altında incelemişlerdir. Çalışma

nanoparçacık boyutunun ısı transferi üzerine olan etkisini ele almıştır. Deneysel sonuçlardan ısı transferinin artan parçacık boyutu ile arttığı sonucuna varılmıştır. Bu sonuç, literatürdeki artan parçacık boyutunun ısıl iletim katsayısını düşürdüğünü gösteren birçok çalışmalarla çelişmektedir.

Al_2O_3/su nanoakışkanı, üretiminin bazı diğer nanoakışkanlara göre daha kolay ve ucuz olması nedeniyle araştırmalarda sık olarak kullanılmaktadır. Wen ve Ding [28], ve Anoop vd. [29] nanoakışkanın laminer akışındaki ısı transferini sabit ısı akısı sınır şartı altında ölçmüşlerdir. Wen ve Ding [28] , ilgili analizi, hacimsel parçacık oranını %0.6 ile %1.6 arasında değiştirerek yapmışlardır. Bu çalışmada, nanoparçacıkların konsantrasyonu ve Reynolds sayısı arttıkça ısı transferi katsayısındaki artış yükselmiştir. Lokal ısı transferi katsayısındaki artışın ise kanalın giriş bölümünde daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Bunlara ek olarak, ısıl giriş uzunluğunun nanoakışkanlarda saf akışkanlara göre daha uzun olduğu belirtilmiştir. Anoop vd.[29] ise Al_2O_3/su nanoakışkanının nanoparçacık boyutunun ısı transferine olan etkisi üzerine yoğunlaşmışlardır. 45 nm ve 150 nm olmak üzere iki farklı boyuttaki nanoparçacıklar ile hazırlanan nanoakışkanların ısı transferi incelenmiş ve 45 nm boyutundaki parçacıkların daha yüksek ısı transferi artışı sağladıkları gözlenmiştir.

Hwang vd. [30] Al_2O_3/su nanoakışkanıyla hidrodinamik olarak tam gelişmiş ısıl olarak gelişmekte olan laminer akış için deneysel sonuçlar elde etmişlerdir. Bu sonuçlara göre hidrodinamik olarak tam gelişmiş laminer akışta tam Reynolds sayısındaki değişimin ısı transferindeki artış üzerinde önemli bir etki oluşturmadığı belirtilmiştir. Isı transferi katsayısındaki artışın (%8) ısıl iletim katsayısındaki artıştan (%1.44) daha yüksel olduğu açıklanmıştır. Ayrıca Hwang vd. [30] Boungiorno'nun [13] çalışmasına benzer olarak mertebe analizi yapmışlardır. Bu analizler sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır.

- Isıl dağılışım (thermal dispersion) sonucu gerçekleşen enerji transferi ihmal edilebilecek kadar küçüktür.
- Parçacık hareketlerinin asıl nedenleri Brownian difüzyonu ve termoforez etkileridir.
- Viskoz gradyanın ve düzensiz kesme oranının parçacık hareketine katkısı çok azdır.

Isı transferindeki bu fazla artışın nedeni parçacıkların sıvı içersindeki hareketleri sonucu artan ısı transferi katsayısı ve buna bağlı olarak hız profilinin değişmesi olarak açıklanmıştır.

Heris vd. [31] Al_2O_3(20 nm)/su nanoakışkanının laminer akışını incelerken bu konudaki araştırmaların büyük bir bölümünde kullanılan sabit ısı akısı sınır şartını değil sabit duvar sıcaklığı sınır şartını ele almışlardır. Araştırmacılar ısı transferi katsayısındaki artışın artan parçacık konsantrasyonu ve artan Peclet sayısı ile yükseldiğini belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada, Heris vd. [32] Al_2O_3/su ve CuO/su nanoakışkanlarının ısıl performansını karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda Al_2O_3/su nanoakışkanının ısı transferini daha fazla artırdığı anlaşılmıştır.

Kim vd. [33] nanoakışkanların ısı transferine etkilerini araştımak için yaptıkları deneysel çalışmada, Al_2O_3/su nanoakışkanıyla sabit duvar ısı akısı uygulanan düz silindirik bir kanal içinde laminer ve türbülanslı akış için sonuçlar elde etmişlerdir. %3'lük hacimsel nanoparçacık oranı için ısıl iletim ve ısı transferi katsyaılarında sırasıyla %8 ve %20'lik artışlar gözlemlemişlerdir.

Nanoakışkanların sayısal analizi ile ilgili önemli çalışmalardan biri Maïga vd.[34] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Al_2O_3/su ve Al_2O_3/etilen glikol nanoakışkanlarının, laminer ve türbülanslı akışı, sabit ısı akısı sınır şartı altında incelenmiştir. Nanoakışkan tek fazlı bir akışkan olarak modellenmiş ve nanoparçacıkların ısı transferine olan etkisi hesaplamalarda nanoakışkan termofiziksel özelliklerinin kullanılması aracılığıyla hesaba katılmıştır. Yapılan analiz sonucunda etilen glikol bazlı nanoakışkanın su bazlı nanoakışkana göre daha yüksek ısı transferi katsayısı artışı sağladığı anlaşılmıştır.

Heris vd. [30] Al_2O_3/su nanoakışkanını laminer akışta ve sabit duvar sıcaklığı koşulunda incelemişler ve analizin sonuçlarını aynı koşullarda gerçekleştirdikleri deneysel çalışmanın [35] sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Analiz yöntemi olarak Xuan ve Roetzel [14] tarafından önerilen, ısıl dağılışım olayını temel alan yaklaşım uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılmasına ek olarak, parçacık konsantrasyonunun ve parçacık çapının ısı transferine olan etkisi de

incelenmiştir. Artan parçacık konsantrasyonu ve azalan parçacık çapı ile ısı transferinde elde edilen artışın yükseldiği görülmüştür.

Mirmasoumi ve Behzadmehr'in [36] yaptığı çalışmada iki-fazlı karışım modeli kullanılarak parçacık çapının akış sıcaklığındaki etkileri incelenmiştir. Isı transferi katsayısının parçacık yarıçapının azalmasıyla önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada sadece fazlar arasındaki kayma kuvveti hesaba katılmıştır; bu etki de Boungiorno'ya [13] göre nanoakışkanlar için ihmal edilebilir düzeydedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yazarlar iki-fazlı karışım modelinin daha büyük parçacıklar için uygun olduğu belirtilmiştir.

Bianco vd. [37] Al_2O_3/su nanoakışkanının sabit duvar ısı akısı sınır koşulu altındaki ısı transferi artışının Fluent yazılımıyla sayısal analizini yapmışlardır. Isıl ve hidrodinamik olarak gelişmekte olan laminer akış için tek fazlı ve iki-fazlı ayrık faz modeli ile sonuçlar alınmış ve bu sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu iki model arasındaki ortalama ısı transferi katsayısı farkı %11 olarak bulunmuştur. Ayrıca sıcaklığa bağlı ve sabit termofiziksel özellikler kullanılarak elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmış ve bunun sonucunda aradaki farkın dikkate alınacak kadar önemli olduğu gözlemlenmiştir.

Lotfi vd. [38] farklı yaklaşımlarla nanoakışkanlarla zorlanmış ısı transferi üzerine sayısal çalışmalar yapmışlardır. Laminer akış ve k-ε türbülans akış modeli için tek fazlı, iki-fazlı Euler ve karışım modelleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre iki-fazlı karışım modelinin diğer modellere göre Wen ve Ding'in [28] elde ettiği deneysel verilere göre daha yakın sonuç verdiği belirtilmiştir.

Fard vd. [39] silindirik bir tüp içinde nanoakışkanlarla sabit duvar sıcaklığı sınır koşulu altında taşınımla ısı iletimi üzerine sayısal analizlerde bulunmuşlardır. ANSYS CFX yazılımı ile tek ve iki fazlı akış modellerini kullanarak CuO/su ve Al_2O_3/su nanoakışkanları için hesaplamalar yapmışlardır. İki-fazlı akış modelleri ile yapılan hesaplamalar deneysel verilere daha yakın sonuçlar vermiştir. Yüksek Peclet sayılarıyla yapılan analizlerde ısı transferi katsayısı beklenilenden daha düşük değerde bulunmuştur.

Akbari vd. [40] CFD yazılımı kullanarak tek-fazlı ve iki-fazlı akış modelleriyle kanal içindeki ısı transferi iyileştirilmesini hesaplamak için sayısal analizlerde bulunmuşlardır. Farklı Reynolds sayıları için sıcaklığa bağlı termofiziksel özellikler kullanılmıştır. Karışım, Euler ve karışım hacmi gibi değişik iki-faz akış modelleri ile hesaplamalar yapılarak sonuçlar hem birbirleriyle hem de tek-fazlı akış sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. Hidrodinamik olarak bütün modeller benzer sonuçlar verse de iki-fazlı akış modelleri ile tek-fazlı akışa göre daha yüksek ısı transferi katsayıları değerlerine ulaşılmıştır. İki-fazlı akış modelleri arasında herhangi bir farka rastlanmamakla beraber daha düşük hesaplama yükü getiren Karışım Hacmi modeli önerilmiştir.

Kondaraju ve Lee [41] iki-fazlı akış modeli ile türbülanslı akışın hem ısıl iletim katsayısı hem de taşınımla ısı transferi katsayısı değerleri üzerine inceleme yapmışlardır. Lagrangian-Eulerian (ayrık faz akış modeli gibi; karışım, karışım hacmi ve Euler akış modelleri Eulerian-Eulerian yaklaşımıdır.) yaklaşımı kullanılarak iki-fazlı akış modellere eklenmiştir. Hidrodinamik sürükleme, Brownian, termoforez ve van der Waals kuvvetleri simülasyonlarda hesaba katılmıştır. Nanoparçacıkların topaklanma problemi van der Waals kuvvetleri ile kontrol edilmiştir. Zamana bağlı 3-boyutlu Navier-Stokes denklemi çözümü sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Parçacık saçılımı (dispersion) ve ısı transferi katkılarının nanoakışkan ısıl iletim katsayısındaki etkileri gözlemlenmiştir.
- Daha doğru sonuçlar alabilmek için, parçacıkların topaklanmasının modellenmesinin önemi açıklanmıştır.
- Parçacık topaklanmasının ısı transferini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir.
- Nanoparçacık boyutunun ısı transferindeki önemi ve parçacık boyutu küçüldükçe ısı transferindeki artışın yükseldiği söylenmiştir.

Akbarinia vd. [42] eğimli bir silindirik tüp içinde iki-fazlı karışım modeli kullanarak nanoparçacık boyutunun ısı transferine etkilerini araştırmak üzere sayısal analizler yapmışlardır. Hacimsel parçacık oranı %1 olan Al_2O_3/su nanoakışkanı için farklı

boyuttaki nanoparçacıkların ısıl ve hidrodinamik olarak karşılaştırması yapılmıştır. Sonuç olarak sabit parçacık hacimsel oranında büyük parçacık boyutu eksenel yöndeki akış hızını arttırırken, akış sıcaklığını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Parçacık boyutuyla artan sürüklenme kuvveti yüzünden ısı transferi katsayılarında bir azalma meydana gelmiştir.

1.2. Tezin Amacı ve Konusu

Bu tez çalışmasının amacı nanoakışkanların zorlanmış taşınımla ısı transferi özelliklerinin silindirik kanal içinde farklı sınır koşulları altında incelenmesidir. Çalışmanın ilk kısmında nanoakışkanlarla hidro-dinamik olarak tam gelişmiş laminer akış için zamana bağlı ve daimi rejim altındaki ısı transferi analizleri, Fortan programlama dili yardımıyla özgün bir kod oluşturularak yapılacaktır. Farklı nanoparçacık hacimsel oranları, Peclet sayıları ve nanoparçacık boyutları için sonuçlar elde edilecektir.

Literatürde nanoakışkanların geleneksel akışkanlara oranla yüksek ısıl iletim katsayısı değerlerine sahip olduğu deneysel ve teorik çalışmalarla açıklanmıştır. Nanoakışkanların ısıl iletim katsayısını hesaplamak için çeşitli modeller ortaya konmakla beraber bu modeller arasındaki farklılıklar çok fazladır. Literatürdeki birçok deneysel ve teorik ısı iletim katsayısı modelleri nanoakışkan ısıl iletim katsayılarına etki eden faktörler açısından hala görüş ayrılıklarında bulunmaktadırlar.

Çalışmanın ikinci kısmında, nanoakışkanların silindirik kanal içindeki zorlanmış ısı transferi analizleri bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan Fluent ile farklı ısıl iletim katsayısı ve viskozite modelleri kullanılarak yapılmıştır. Isı transferindeki artış oranları farklı hacimsel nanoparçacık oranları ve boyutları için hesaplanmış, ısıl iletim katsayı modelleri arasındaki farklar incelenmiştir.

Tez çalışmasının karşılaştırmalar kısmında, kanal boyunca ısı transferi katsayılarındaki değişim farklı ısıl iletim katsayısı modelleriyle elde edilmiş ve literatürde yer alan deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Böylelikle ısıl iletim katsayı modellerinin deneysel sonuçlara uygun olup olmadığı ortaya konmuştur. Ayrıca,

nanoakışkanlar için literatüre yer alan deneysel ve teorik viskozite modelleri kullanılarak hesaplamalar yapılmış, bu viskozite modellerinin ısı transferindeki artışa etkileri incelenmiştir.

2. NANOAKIŞKANLARIN TERMO-FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Nanoakışkanların termo-fiziksel özellikleri geleneksel akışkanlara oranla çeşitli farklılıklar göstermektedir. Literatürde nanoakışkanlar için ısıl iletim katsayısı, viskozite, özgül ısı ve de yoğunluk gibi termo-fiziksel özellikler çeşitli modellerle tanımlanmıştır. Ayrıca hesaplamaların doğruluğunu arttırmak için, geleneksel akışkanın (su) ısıl iletim katsayısı ve viskozite özellikleri sıcaklığa bağlı olarak tanımlanmıştır.

2.1. Isıl İletim Katsayısı

Nanoakışkanların ısı transferine etkisini açıklamak için nanoakışkanların en önemli fiziksel özelliklerinden biri olan ısıl iletim katsayıları literatürde farklı modeller ile ifade edilmiştir. Isı transferinde önemli rol oynayan nanoakışkan ısıl iletim katsayısı akışkanın sıcaklığı, nanoparçacıkların şekli, boyutu, hacimsel oranına ve sıvı içindeki hareketleri sonucu oluşan fiziksel etkilere göre çeşitli modellerle ifade edilmiştir. Ortaya konulan ısıl iletim katsayısı modelleri teorik ve deneysel veriler yardımıyla açıklanmıştır. Bu modeller literatür taraması kapsamında detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.Tez çalışması kapsamında kullanılan Koo-Kleinstreuer, Chon ve Corcione ısıl iletim katsayısı modelleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1.1. Koo-Kleinstreuer Modeli

Koo-Kleinstreuer [6] modeli, nanoparçacıkların sıvı içindeki hareketi hesaba katmayan Hamilton Crosser Modeli [7] (Statik ısıl iletim katsayısı modeli) ile parçacıkların bulundukları sıvı içinde rastgele hareketlerini esas alan Brownian Hareketinin (dinamik ısıl iletim katsayısı) etkileri birleştirilmesiyle tanımlanmıştır.

$$k_{nf} = k_{statik} + k_{dinamik} \tag{1}$$

Hamilton-Crosser modeli [7] parçacıkların şekli ve hacimsel oranlarına bağlı olarak hesaplanır. Parçacıkların sıvı içinde durağan olarak kabul edildiği bu modele statik ısı iletim katsayısı (k_{statik}) da denir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$k_{statik} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} k_f \tag{2}$$

Burada, n parçacık şekil katsayısıdır ve küresel parçacıklar için 3'e eşittir. Ayrıca ϕ nanoparçacık hacimsel oranını, k ısıl iletim katsayısını, p, ve f alt indisleri sırasıyla nanoparçacık ve akışkanı ifade etmektedir.

Parçacıkların bulundukları sıvı içindeki hareketleri sonucu oluşan etkilerin de ısıl iletim katsayısı modellerine eklenmesi şüphesiz daha doğru analizler yapılmasını sağlayacaktır. Bu etki, nanoparçacıkların sıvı içinde rastgele hareket ederek, nanoparçacıkların ve sıvı moleküllerinin birbirleri ile sürekli çarpışması sonucu oluşan Brownian hareketi ile açıklanabilir. Brownian hareketinden dolayı elde edilen ek ısıl iletim katsayısı aşağıdaki ifade ile hesaplanır [6].

$$k_{dinamik} = 5\times10^4 \beta\phi\rho_f c_f \sqrt{\frac{\kappa_B T}{\rho_p d_p}} f \tag{3}$$

Burada κ_B Boltzman sabiti, d_p parçacık çapı, ρ akışkanın yoğunluğu, c özgül ısı sığası, T ortam sıcaklığı, β ve f deneysel sabitlerdir. Al_2O_3/su nanoakışkanı için f deneysel veri yetersizliğinden 1'e eşit alınır. Al_2O_3/su nanoakışkanı için β aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$\beta = 0.0017(100\phi)^{-0.0841}, \qquad \phi > 1\% \tag{4}$$

Böylece nanoparçacıkların akışkan içindeki hareketlerinden kaynaklanan fiziksel etkileri de hesaba katılarak nanoparçacıkların ısıl iletim katsayısı (2) ve (3) numaralı denklemlerin bileşimi ile Koo Kleinstreuer modeli olarak ifade edilebilir.

$$k_{nf} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} k_f + 5\times10^4 \beta\phi\rho_f c_f \sqrt{\frac{\kappa_B T}{\rho_p d_p}} f \quad (5)$$

Eşitlik (5)'de; ϕ nanoparçacık hacimsel oranı, k ısıl iletim katsayısı, ρ akışkanın yoğunluğunu, c özgül ısı sığasını ve p, f ve nf alt indisleri sırasıyla nanoparçacık, akışkan ve nanoakışkanı ifade etmektedir.

2.1.2. Chon Modeli

Bu model yapılan deneysel sonuçlarla, Jang ve Choi [9]'nin ortaya koyduğu teorik çalışmalar esas alınarak oluşturulmuş deneysel bir korelasyondur. Bu çalışmada nanoakışkanın ısıl iletim katsayısı; sıcaklığa ve parçacık boyutuna güçlü bir şekilde bağlı olmakla beraber Brownian Hareketinin etkilerini de hesaba katmaktadır. Bu ısıl iletim katsayısı modeli, deneysel veriler doğrultusunda 11 nm'den 151 nm'ye kadar farklı parçacık boyutları ve belirli bir sıcaklık aralığındaki (20°-71°C) Al_2O_3/su nanoakışkanı için Chon vd. [8] tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7\phi^{0.746}\left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369}\left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.7476} Re^{1.2321}\, Pr^{0.9955} \quad (6)$$

Burada d parçacıkların çapını, Re Reynolds ve Pr Prandtl sayılarını ifade etmektedir. Reynolds ve Prandtl sayıları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha} \quad , \quad Re = \frac{\rho_f V_{Br} d_p}{\mu_f} = \frac{\rho_f \kappa_B T}{3\pi\mu_f{}^2 l_f} \quad (7)$$

Prandtl sayısını tanımlarken; μ viskozite, ρ akışkanın yoğunluğunu, α ısıl difüziviteyi ifade etmektedir. Reynolds sayısındaki V_{Br} Brownian hareketinden kaynaklanan hızı; buna bağlı olarak T sıcaklığı, k_b Boltzmann sabitini ve l_f ise su molekülünün kat ettiği ortalama serbest yolu (mean free path) tanımlamaktadır.

2.1.3. Corcione Modeli

Bu model literatürdeki farklı boyutlarda, şekilllerde ve hacimsel oranlarda çeşitli nanoparçacıklar için yapılmış deneylerin Corcione [4] tarafından bir eşilişki haline getirilmesiyle oluşturulmuştur. Teorik modellerin, nanoparçacıkların akışkan içindeki fiziksel hareketleri sonucu oluşan ek ısı transferini tam olarak ortay koyamaması ve deneysel sonuçların belirli koşullarla kısıtlı olması yönünden kullanılan bu model oldukça yararlıdır. 10-150 nm çapındaki nanoparçaçık boyutları için 21-51°C sıcaklığı aralığında geçerli olan bu model Eşitlik (8) ile verilmiştir.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4 Re^{0.4}\, Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.03} \phi^{0.66} \tag{8}$$

Burada T_{fr} kullanılan geleneksel akışkanın donma sıcaklığını ifade etmektedir. Reynolds ve Prandtl sayıları Chon [8] modeline benzer olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha} \quad , \quad \mathrm{Re} = \frac{\rho_f V_{Br} d_p}{\mu_f} = \frac{2\rho_f \kappa_B T}{\pi {\mu_f}^2 d_p} \tag{9}$$

Eşitlik (9)'da görüldüğü üzere Prandtl ve Reynolds sayıları Chon [3] modeliyle aynı tanımlanmış olsa da Brownian harekinden kaynaklanan hız tanımı farklılık göstermektedir.

2.1.4. Fluent Modeli

Tez çalışmasında iki-fazlı akış karışım modeli için Fluent yazılımının tanımladığı ilk ısıl iletim katsayısı modeli aşağıdaki ifadeyle verilmiştir. Nanoparçacık ve akışkanın ısıl iletim katsayılarının hacimsel ortalamasını alan bu model aşağıdaki gibi gösterilmiştir [43]:

$$k_{nf} = \phi k_p + (1-\phi) k_f \tag{10}$$

Eşitlik (10) ile hesaplanan nanoakışkan ısıl iletim katsayısı değerleri diğer ısıl iletim katsayısı modellerine göre çok yüksek değerler vermektedir, bu yüzden bu ısıl iletim katsayısı modeli hesaplamalarda kullanılmamıştır.

2.2. Viskozite

Nanoparçacıkların geleneksel akışkanlar içine konulmasıyla oluşturulan nanoakışkanların viskozitesi için literatürde teorik ve deneysel olarak çeşitli viskozite modelleri kullanılmıştır. Saf su için önemli bir şekilde sıcaklığa bağlı olan viskozitenin nanoparçacıkların eklenmesiyle artış göstereceği bilinmektedir.

Literatür araştırması kısmında kullanılan viskozite modelleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada; teorik modellerden Einstein [16] ve Batchelor [18], deneysel veriler sonucu elde edilen modellerden ise Maiga [21] ve Corcione [10] viskozite modelleri kullanılmıştır. Genellikle sadece nanoparçacık hacimsel oranına bağlı olan viskozite, Corcione modelinde buna ek olarak akışkan ve nanoparçacığın çaplarıyla da orantılıdır. Ayrıca geleneksel akışkan olarak kullanılan saf su için sıcaklığa bağlı viskozite kullanılmıştır. Kullanılan viskozite modelleri Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Sayısal Analizlerde kullanılan Viskozite Modelleri

Einstein Modeli	$\mu_{nf} = (1+2.5\phi)\,\mu_f$
Batchelor Modeli	$\mu_{nf} = (1+2.5\phi+6.2\phi^2)\,\mu_f$
Maiga Modeli	$\mu_{nf} = (1+7.3\phi+123\phi^2)\,\mu_f$
Corcione Modeli	$\mu_{nf} = \left(1-34.87\left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.3}\phi^{1.03}\right)^{-1}\mu_f$

2.3. Yoğunluk

Nanoakışkanın yoğunluğu tanımlamak için ısıl iletim katsayısı ve viskozite fiziksel özellikleri gibi karmaşık modellere gerek duyulmamaktadır. Nanoakışkan yoğunluğu, sıvı ve nanoparçacığın hacimsel oranlarına göre ortalamalarının alınmasıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir.[24, 42]

$$\rho_{nf} = \phi\rho_p + (1-\phi)\rho_f \tag{11}$$

2.4. Özgül Isı

Nanoakışkan özgül ısısı yoğunluk tanımına benzer olarak basit bir ortalama işlemiyle tanımlanabilir [35, 43].

$$c_{nf} = \phi c_p + (1-\phi) c_f \tag{12}$$

Bazı çalışmalarda ise özgül ısının birim kütle için tanımlandığı belirtilerek nanoakışkanın özgül ısısının nanoparçacığın ve geleneksel akışkanının ağırlık ortalamasına göre tanımlanmasını uygun görmüşlerdir.[13]

$$c_{nf} = \frac{\phi\left(\rho_p c_p\right) + (1-\phi)\left(\rho_f c_f\right)}{\rho_{nf}} \tag{13}$$

Bu tez çalışmasında özgül ısı, zamana bağlı tek-fazlı özgün kod analizlerinde Eşitlik (13), Fluent iki-fazlı karışım modeli analizlerinde ise Eşitlik (12) kullanılarak hesaplanmıştır.

2.5. Geleneksel Akışkanın Sıcaklığa Bağlı Termo-fiziksel Özellikleri

Isı transferi hesaplamalarında geleneksel akışkan olarak kullanılan suyun termo-fiziksel özellikleri sıcaklıkla değişmektedir. Bu değişimin etkilerini analizlere aktarmak için hesaplama yapılan sıcaklık aralıkları için suyun termo-fiziksel özellikleri [44] incelenmiştir. Özellikle ısıl iletim katsayısı ve viskozite değerlerinin sıcaklıkla önemli bir şekilde değiştiği gözlenmiştir. Analizde kullanılan sıcaklık aralıkları için ısıl iletim katsayısı ve viskozite verilerine eğri uydurma metodu kullanılarak geleneksel akışkanın sıcaklığa bağlı ısıl iletim katsayısı ve viskozite fonksiyonları Çizelge 2.2'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 2.2 Geleneksel akışkanın (su) sıcaklığa bağlı ısıl iletim katsayısı ve viskozitesi

Özellik		**Fonksiyon**	**Birim**
k	=	$-9.598624182 \times 10^{-6} T^2 + 7.391991209 \times 10^{-3} T - 0.7431263192$	W/m·K
μ	=	$3.162733931 \times 10^{-11} T^4 - 4.334425995 \times 10^{-8} T^3 + 2.231806745 \times 10^{-5} T^2 - 5.123090843 \times 10^{-3} T + 0.443267965$	kg/m·s

3. NANOAKIŞKANLARLA KANAL İÇERSİNDEKİ ISI TRANSFERİNİN MODELLENMESİ

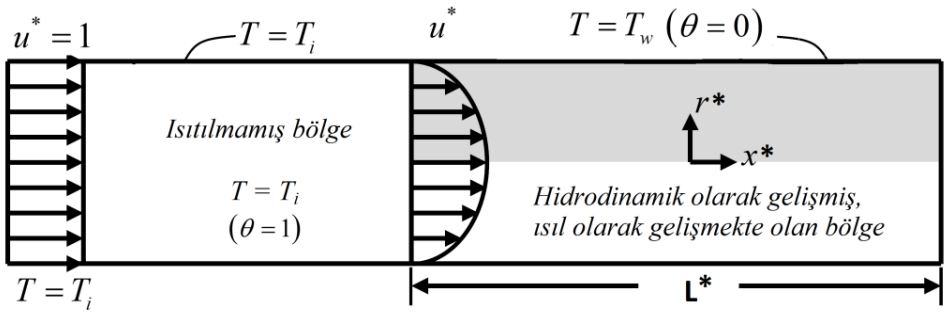
Nanoakışkanlara ısı transferinin sayısal analizleri literatür taramasında da bahsedildiği gibi tek-fazlı akış veya iki-fazlı akış olmak üzere farklı modeller kullanılarak yapılmıştır. Tek-fazlı akış modelinde, nanoparçacık ve geleneksel akışkandan (su) oluşan karışım tek (homojen) bir faz olarak varsayılmış, nanoparçacık ve akışkan arasındaki kayma hızları, sıcaklık ve fazlar arasındaki moleküler özellikleri farklarından oluşan difüzyon etkileri gibi faktörler ihmal edilmiştir.

İki-fazlı akış modeli ise iki farklı yaklaşımla ele alınabilir. Bunlardan birincisi matematiksel olarak fazların birbirleriyle iç içe geçmiş bir şekilde davrandığını, ayrıca nanoparçacık ile geleneksel akışkanın hacimsel oranlarının uzay ve zaman boyutlarında sürekli ve toplamlarının bire eşit olan fonksiyonlar olduğunu kabul eden Euler-Euler yaklaşımıdır. Bu yaklaşım da kendi içinde Akışkan Hacmi (Volume of Fluid), Karışım (Mixture) ve Eularian modeli olmak üzere çeşitli koşullar için üçe ayrılmıştır. İkinci bir yaklaşım olan Euler-Lagrange yaklaşımı, akışkan fazını Navier-Stokes denklemleri; nanoparçacık fazını ise parçacık takibi yöntemi kullanarak hesaplamalar yapar fakat bu yaklaşım sadece düşük parçacık hacimsel oranları (<%10) için geçerlidir.

Bu tez çalışmasında ilk önce tek-fazlı akış modeli kullanılarak zaman bağlı ve daimi rejimde nanoakışkanlar silindirik bir kanal içinde ısı transferi analizleri özgün kod oluşturularak yapılmıştır. Ayrıca bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kodu olan Fluent ile iki-fazlı akış karışım modeli kullanılarak yine nanoakışkanlarla silindirik kanal içindeki ısı transferi hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel veriler ve birbirleriyle karşılaştırılarak bulgular tez çalışmasının 4. Kısım'da ortaya konmuştur.

3.1. Problemin Geometrisi

Silindirik kanal içindeki hidrodinamik olarak tam gelişmiş ve ısıl olarak gelişmekte olan akış Şekil 3.1'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Problemin Geometrisi

Tek-fazlı ve iki-fazlı akış modeli yaklaşımları için de kanal yarıçapı r_0=0.005 m olarak belirlenmiş olup, zaman bağlı tek-fazlı akış modelinde iki boyutlu silindirik geometri kullanılıp kanal uzunluğu 1.5 m olarak alınıştır. Tek-fazlı akış modelinden farklı olarak Fluent iki-fazlı akış karışım modeli için üç boyutlu geometri kullanılıp kanal uzunlu 1 m olarak tanımlanmıştır.

3.2. Zamana Bağlı Tek-Fazlı Akış Modeli

Bu çalışmada, nanoakışkanların zorlanmış taşınımla zamana bağlı ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Yatay bir boru içinde laminer ve hidrodinamik olarak gelişmiş akış ani bir şekilde değişen duvar sıcaklığına ve duvar ısı akısına maruz kalmış ve zamana bağlı olarak değişimler Al_2O_3/su-Nanoakışkanı için sayısal hesaplamalar yapılarak gözlenmiştir.

3.2.1. Problemin Tanımı

Boru içindeki laminer, hidrodinamik olarak gelişmiş, ısıl olarak gelişmekte olan zamana bağlı sistemin analizi için çözülmekte olan enerji denklemi şu şekilde ifade edilir [45] :

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{\upsilon}\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot\left(k\,\nabla T\right)+\dot{q}+\varphi \tag{14}$$

Burada $\vec{\upsilon}$ akış hızını, $\dot{q}$ ısı üretimini, φ viskoziteden dolayı gerçekleşen enerji yitimini göstermektedir. Isı üretimi, eksensel yönde ısı iletim ve üretimi, viskoz yitime bağlı ısı kazanımı, ayrıca hidrodinamik olarak tam gelişmiş olması sonucu radyal yöndeki akış hızı da ihmal edildiğinde denklem iki boyutlu silindirik koordinatlar için şu şekli alır:

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{15}$$

Burada u_x eksensel yöndeki hızı göstermektedir ve hidrodinamik olarak tam-gelişmiş akış için momentum denkleminin çözülmesi sonucu Eşitlik (16)'daki gibi parabolik hız profili olarak tanımlanır.

$$u_x=2u_{ort}\left(1-\frac{r^2}{r_0{}^2}\right) \tag{16}$$

Burada $u_{ort.}$ ortalama hızı, r_0 kanal yarıçapını, r ise r-yönünü belirtmektedir.

3.2.2. Enerji Denkleminin Boyutsuzlaştırılması

Yapılan sayısal analizlerin sadece sınırlı bir geometriye ve sıcaklık veya ısı akısı gibi belirli bir sınır koşulu değerine bağlı kalmaması, ayrıca elde edilen sonuçların daha genel bir anlam ifade etmesi adına denklemlerin ve buna bağlı olarak sınır koşullarının boyutsuzlaştırılması önemli bir yöntemdir. Eşitlik (15)'de tanımlanan Enerji denklemi aşağıdaki boyutsuz parametreler yardımıyla boyutsuzlaştırılmıştır.

$$x^* = \frac{x}{r_0} \quad r^* = \frac{r}{r_0} \quad k^* = \frac{k_{nf,T}}{k_{nf,b}}$$
$$u^* = \frac{u_x}{u_{ort}} \quad t^* = \frac{\alpha_{nf,b} t}{r_0^2} \quad Pe_{nf} = \frac{2u_{ort} r_0}{\alpha_{nf,b}} \tag{17}$$

burada x x-eksenini, r r-eksenini, r_0 kanal yarıçapını, u akış hızını, t zamanı, k ısıl iletim katsayısını α ise termal yayınma katsayısını ifade etmektedir. * üst indisi boyutsuz parametreleri; nf, b, T, x alt indisleri ise sırasıyla nanoakışkan, yığın, yerel ve x-yönünü belirtmektedir.

Boyutsuz sıcaklık değerini ifade etmek için kullanılan θ parametresi her iki sınır koşulu için aşağıdaki gibi farklı şekilde tanımlanmıştır. Duvar sıcaklığındaki ani değişim sınır koşulu için boyutsuz sıcaklık;

$$\theta = \frac{T - T_w}{T_i - T_w} \tag{18}$$

duvar ısı akısındaki ani değişim sınır koşulu için ise;

$$\theta = \frac{k_{nf,b}(T - T_i)}{q_w^{"} r_o} \tag{19}$$

olarak gösterilmektedir.

Boyutsuz sayılar ve hız profili enerji denklemine tanıtıldıktan sonra denklem aşağıdaki hali alır:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t^*} + Pe_{nf}(1 - r^*)\frac{\partial \theta}{\partial x^*} = \frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(k^* r^* \frac{\partial \theta}{\partial r^*}\right) \tag{20}$$

Boyutsuz sıcaklık değerleri (Θ) Eşitlik (20)'nin çözümünden bulunmuş buna bağlı olarak yerel Nusselt sayısı (Nu_x) her iki sınır koşulu için de aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Duvar sıcaklığındaki ani değişim sınır koşulu için yerel Nusselt sayısı;

$$Nu_x = \frac{2}{\theta_b}\frac{\partial \theta}{\partial r^*}\bigg|_{r=r_0} \tag{21}$$

Duvar ısı akısındaki ani değişim sınır koşulu için yerel Nusselt sayısı;

$$Nu_x = \frac{2}{(\theta_w - \theta_b)} \tag{22}$$

olarak gösterilmektedir. Eşitliklerde kullanılan boyutsuz yığın sıcaklık değerleri (Θ_b) akışın kütle ağırlıklı ortalaması alınarak aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\theta_b = \frac{\int_0^1 \theta(x^*, r^*) u^* r^* dr^*}{\int_0^1 u^* r^* dr^*} \tag{23}$$

Isı transferi katsayısı ($h_{nf,x}$) ve Nusselt sayısı (Nu_x) arasındaki bağıntı aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir.

$$Nu_x = \frac{h_{nf,x} d}{k_{nf}} \tag{24}$$

Denklem (24) kullanılarak yerel ısı transferi katsayısı bulunabilir.

$$h_{ort.} = \frac{1}{L} \int_0^L h_{nf,x} dx \tag{25}$$

Denklem (25) ortalama ısı transferi katsayısını ($h_{ort.}$) ve buna bağlı olarak ortalama Nusselt sayısını ($Nu_{ort.}$) bulmamızı sağlar.

$$Nu_{ort.} = \frac{h_{ort.} d}{k_{nf}} \tag{26}$$

3.2.3. Sınır Koşulları

Yapılan sayısal analizlerde sabit duvar sıcaklığındaki ani değişim ve sabit duvar ısı akısındaki ani değişim olmak üzere iki farklı sınır koşulu kullanılmıştır.

3.2.3.1. Duvar Sıcaklığındaki Ani Değişim

Başlangıçta kanal duvarlarıyla aynı sıcaklıkta olan akış T_i,hiç bir ısıl değişime maruz kalmadan ilerlemektedir. Duvar sıcaklığı x=0 noktasında t=0 zamanında ani bir değişime uğrayarak sabit T_w değerini almıştır. Duvar sıcaklığındaki bu değişim sınır koşulu olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$r = r_0 \quad 'da, \quad T = T_w = Sabit \quad ; \quad t>0 \tag{27}$$

Sınır koşulu boyutsuz hale getirildiğinde aşağıdaki hali alır;

$$r^* = 1 \quad 'de \qquad \theta = 0 \quad ; \qquad t>0 \tag{28}$$

3.2.3.2. Duvar Isı Akısındaki Ani Değişim

Sabit duvar sıcaklığı koşula benzer olarak akış ve kanal duvarı arasında herhangi bir sıcaklık farkı ve ısı transferi bulunmamaktadır. Kanal duvarı ve akışkanın sıcaklığı T_i olarak tanımlanmıştır. Kanal duvarı x=0 noktasında ve t=0 zamanında ani bir sabit ısı akısına q''_w maruz kalmaktadır, bu değişim sonucunda sınır koşulu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$r = r_0 \quad 'da, \quad q'' = q''_w = Sabit \quad ; \quad t>0 \tag{29}$$

Sınır koşulu boyutsuz hale getirildiğinde aşağıdaki hali alır;

$$r^* = 1 \quad 'de \qquad \frac{\partial \theta}{\partial r^*} = 1 \quad ; \qquad t>0 \tag{30}$$

3.2.3.3. Diğer Sınır Koşuları

Yukarıda tanımlanan duvar sıcaklığı ve duvar ısı akısındaki ani değişim yanı sıra iki koşul içinde aynı şekilde tanımlanan simetri ve giriş sınır koşullarının da belirtilmesi gerekmektedir. Simetri sınır koşulu;

$$r = 0 \quad 'da, \qquad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \tag{31}$$

Giriş sınır koşulu;

$$x = 0 \quad 'da, \qquad T = T_i \tag{32}$$

Simetri sınır koşulu boyutsuz hale getirildiğinde, her iki sınır koşulu için (duvar sıcaklığındaki ve duvar ısı akısındaki ani değişim) aynı olsa da; giriş sınır koşulu boyutsuz hale getirilirken, boyutsuz sıcaklık tanımlarındaki fark nedeniyle her iki sınır koşulu için de farklı tanıtılmıştır. Boyutsuz simetri koşulu;

$$r^* = 0 \quad 'da, \qquad \frac{\partial \theta}{\partial r^*} = 0 \tag{33}$$

olarak tanımalaşmıştır. Duvar sıcaklığındaki ani değişim sınır koşulu için boyutsuz giriş sınır koşulu;

$$x^* = 0 \quad 'da, \qquad \theta = 1 \tag{34}$$

olarak tanımlamıştır. Duvar ısı akısındaki ani değişim sınır koşulu için boyutsuz giriş sınır koşulu ;

$$x^* = 0 \quad 'da, \qquad \theta = 0 \tag{35}$$

olarak gösterilmektedir. Sınır koşullarında tanımlanan T_w ve q''_w sırasıyla duvar sıcaklığı ve duvar ısı akısını göstermektedir, ayrıca T_i ise akışın kanal giriş sıcaklığını belirtmektedir.

3.2.4. Sayısal Yöntem

Bu çalışmada, hidro-dianamik olarak gelişmiş akışın ani bir duvar sıcaklığı ve duvar ısı akısı değişimiyle zamana bağlı sayısal çözümü incelenmektedir. Eşitlik (20)'de gösterilen boyutsuz enerji denklemi açık (explicit) ikinci dereceden sonlu farklar yöntemiyle ayrıklaştırılmıştır. Enerji denkleminin çözümüyle hesaplanan zaman adımındaki boyutsuz sıcaklıklar elde edilmiş, bu değerlerden yararlanarak yerel ve ortalama ısı transferi katsayıları ve Nusselt sayıları Eşitlik (21-26) kullanılarak bulunmuştur. Her zaman adımında bulunan boyutsuz sıcaklıklar boyutlu hale getirilip sıcaklığa bağlı ısıl iletim katsayıları ve viskozite değerleri tekrar hesaplanıp boyutsuz enerji denklemine tanıtılmış ve çözüm bu şekilde yinelemeli olarak elde edilmiştir. Zaman adımı ilerledikçe sistem daimi rejime ulaşmış, böylelikle daimi rejim sonuçları da hesaplanmıştır. Çözümün güvenilirliğini sağlamak açısından kararlılık analizi yapılmış ve çözümde kullanılan çözüm ağı değerleri buna göre belirlenmiştir.

3.2.4.1. Enerji Denkleminin Ayrıklaştırılması

Boyutsuz enerji denklemi açık (explicit) sonlu farklar yöntemi kullanılarak korunumlu (conservative) bir şekilde aşağıda gösterildiği gibi ayrıklaştırılmıştır.

$$\frac{\theta_{i,j}^{m+1}-\theta_{i,j}^{m}}{\Delta t^{*}}+Pe(1-r^{*^2})\frac{3\theta_{i,j}^{m}-4\theta_{i-1,j}^{m}+\theta_{i-2,j}^{m}}{2\Delta x^{*}}=$$
$$\frac{1}{r^{*}(\Delta r^{*})^{2}}\left(k_{j+1/2}^{*m}r_{j+1/2}^{*m}(\theta_{i,j+1}^{m}-\theta_{i,j}^{m})-k_{j-1/2}^{*m}r_{j-1/2}^{*m}(\theta_{i,j}^{m}-\theta_{i,j-1}^{m})\right) \quad (36)$$

Enerji denklemi hata mertebesinin azalması adına, *x*-yönünde ikinci dereceden geri (backward) sonlu farklar, *r*-yönünde ise ikinci dereceden merkezi sonlu farklar yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Zaman adımı ise birçok uygulamada olduğu gibi birinci dereceden ileri farklar yöntemiyle tanımlanmıştır.

3.2.4.2. Kararlılık Analizi

Yapılan sayısal analizlerde açık (explicit) sonlu farklar yöntemi kullanıldığı için çözümün yakınsamasının sağlanması gerekmektedir. Bu yüzden ayrıklaştırılmış enerji denklemi Eşitlik (36) karalılık analizi için aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

$$\theta_{i,j}^{m+1}=\theta_{i,j}^{m}\left[\begin{array}{l}1-\frac{3\Delta t^{*}}{2\Delta x^{*}}Pe(1-r^{*2})-\\ \frac{\Delta t^{*}}{r^{*}\left(\Delta r^{*}\right)^{2}}\left[k_{j+1/2}^{*m}r_{j+1/2}^{*m}+k_{j-1/2}^{*m}r_{j-1/2}^{*m}\right]\end{array}\right]+$$
$$\theta_{i-1,j}^{m}\left[\frac{4\Delta t^{*}}{2\Delta x^{*}}Pe(1-r^{*2})\right]-\theta_{i-2,j}^{m}\left[\frac{\Delta t^{*}}{2\Delta x^{*}}Pe(1-r^{*2})\right]+ \quad (37)$$
$$\theta_{i,j+1}^{m}\left[\frac{\Delta t^{*}}{r^{*}\left(\Delta r^{*}\right)^{2}}k_{j+1/2}^{*m}r_{j+1/2}^{*m}\right]+\theta_{i,j-1}^{m}\left[\frac{\Delta t^{*}}{r^{*}\left(\Delta r^{*}\right)^{2}}k_{j-1/2}^{*m}r_{j-1/2}^{*m}\right]$$

Eşitlik (37)'de gösterilen *i*, *j* ve *m* sırasıyla *x*-ekseni, *r*-ekseni ve zaman adımının indisleridir. Şimdiki zaman adımı *m* ile bir sonraki zaman adıma $(m+1)\Delta t^{*}$ arasında oluşan küçük hataları $\Delta\theta_{i,j}^{m+1}$. olarak tanımlarsak Eşitlik (37) aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\Delta\theta_{i,j}^{m+1} = \Delta\theta_{i,j}^{m}\left[\begin{array}{l} 1-\dfrac{3\Delta t^{*}}{2\Delta x^{*}}Pe(1-r^{*2})- \\ \dfrac{\Delta t^{*}}{r^{*}\left(\Delta r^{*}\right)^{2}}\left[k_{j+1/2}^{*m}r_{j+1/2}^{*m}+k_{j-1/2}^{*m}r_{j-1/2}^{*m}\right] \end{array}\right]+$$
$$\Delta\theta_{i-1,j}^{m}\left[\frac{4\Delta t^{*}}{2\Delta x^{*}}Pe(1-r^{*2})\right]-\Delta\theta_{i-2,j}^{m}\left[\frac{\Delta t^{*}}{2\Delta x^{*}}Pe(1-r^{*2})\right]+ \qquad (38)$$
$$\Delta\theta_{i,j+1}^{m}\left[\frac{\Delta t^{*}}{r^{*}\left(\Delta r^{*}\right)^{2}}k_{j+1/2}^{*m}r_{j+1/2}^{*m}\right]+\Delta\theta_{i,j-1}^{m}\left[\frac{\Delta t^{*}}{r^{*}\left(\Delta r^{*}\right)^{2}}k_{j-1/2}^{*m}r_{j-1/2}^{*m}\right]$$

i ve *j*'nin değişken ve *m*'in sabit olduğu değerlerde ε_m , $\left|\Delta\theta_{i,j}^{m+1}\right|$'nin en yüksek değeri olarak tanımlanırsa; kararlılık koşulu $\varepsilon_{m+1}\le\varepsilon_m$ olarak tanımlanır.[46]

$$\left|\Delta\theta_{i,j}^{m+1}\right|\le\left|\Delta\theta_{i,j}^{m}\right| \qquad (39)$$

$$\left[1-\frac{3\Delta t^{*}}{2\Delta x^{*}}Pe(1-r^{*2})-\frac{\Delta t^{*}}{r^{*}\left(\Delta r^{*}\right)^{2}}\left[k_{j+1/2}^{*m}r_{j+1/2}^{*m}+k_{j-1/2}^{*m}r_{j-1/2}^{*m}\right]\right]+$$
$$\left[\frac{4\Delta t^{*}}{2\Delta x^{*}}Pe(1-r^{*2})\right]-\left[\frac{\Delta t^{*}}{2\Delta x^{*}}Pe(1-r^{*2})\right]+ \qquad (40)$$
$$\left[\frac{\Delta t^{*}}{r^{*}\left(\Delta r^{*}\right)^{2}}k_{j+1/2}^{*m}r_{j+1/2}^{*m}\right]+\left[\frac{\Delta t^{*}}{r^{*}\left(\Delta r^{*}\right)^{2}}k_{j-1/2}^{*m}r_{j-1/2}^{*m}\right]\le 1$$

Böylelikle kararlılık şartı aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\left[\frac{3\Delta t^*}{2\Delta x^*}Pe(1-r^{*2})+\frac{\Delta t^*}{r^*\left(\Delta r^*\right)^2}\left[k^{*m}_{j+1/2}r^{*m}_{j+1/2}+k^{*m}_{j-1/2}r^{*m}_{j-1/2}\right]\right]\leq 1 \quad (41)$$

Yapılan sayısal analizlerde seçilen *Δt, Δx* ve *Δr* değerleri bu koşula göre belirlenmiş ve kararlılık koşulu sağlanmıştır. Ayrıca kararlılık analizlerinde önemli faktörler olan CFL ve Von Neumann sayıları hesaplanmış ve bu hesaplamalar Ek-A'da gösterilmiştir.

3.3. İki-Fazlı Akış Karışım Modeli (Fluent)

Bu çalışmada ilk olarak literatürdeki iki fazlı akış modelleri incelenmiştir. Nanoakışkanlar ile silindirik kanal içindeki laminer rejimde zorlanmış taşınımla ısı transferi analizi için uygun olan modeller arasından Euler-Euler Yaklaşımı Karışım Modeli modeli kullanılmıştır.

Sayısal analizlerde, ilk olarak farklı ağ yapıları oluşturularak çözümün ağ yapılarından bağımsız olduğunun gösterilmesi, elde edilen sonuçların analitik çözüm sonuçlarıyla doğrulanması, nanoparçacık hacimsel oranının ısı transferine etkileri sunulmaktadır. Ayrıca kanal içindeki akışta ısı transferinde çok önemli rol oynayan ısıl iletim katsayısı ve viskozite gibi termo-fiziksel özellikler için literatürde tanımlanmış deneysel ve teorik farklı modeller kullanılmış, sonuçlar sabit duvar sıcaklığı ve sabit duvar ısı akısı olmak üzere iki farklı sınır koşulu için birbirleriyle kıyaslanmıştır.

3.3.1. Problemin Tanımı

Nanoparçacıkların eklenmesiyle oluşan ısı transferi katsayısındaki artışı modellemek için Fluent kodu kullanılarak karışım için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri çözülmüştür. Ayrıca ikinci faz olan nanoparçacık için parçacık hacimsel

dağılımı denklemi ve iki faz arasındaki bağıl hız cebirsel denklemleri de hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda viskoz enerji yitimi ve sistem içindeki enerji üretimi ihmal edilmiştir. Ayrıca, sıkıştırılamaz akış özellikleri ile parçacıklar ve sıvının ısıl denge halinde olduğu varsayılmıştır. İki fazlı akış karışım modeliyle daimi rejimde sıkıştırılamaz akış için nanoakışkan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [43]

Süreklilik denklemi:

$$\nabla \cdot \left(\rho_m \vec{\upsilon}_m \right) = 0 \tag{42}$$

Momentum denklemi:

$$\nabla \cdot \left(\rho_m \vec{\upsilon}_m \vec{\upsilon}_m \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_m \left(\nabla \vec{\upsilon}_m + \nabla \vec{\upsilon}_m^T \right) \right] + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} \phi_k \rho_k \vec{\upsilon}_{dr,k} \vec{\upsilon}_{dr,k} \right) \tag{43}$$

Enerji denklemi :

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^{n} \left(\phi_k \vec{\upsilon}_k \left(\rho_k H_k + p \right) \right) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T \right) \tag{44}$$

Burada n faz sayısı, μ_m ve ρ_m sırasıyla karışımın viskozitesi ve yoğunluğu olarak tanımlanmıştır. T sıcaklığı, k_{eff} karışımın ısıl iletim katsayısını, p basıncı, H entalpiyi ve ϕ ise ait olduğu fazın hacimsel oranını belirtmektedir. Karışımın hızı v_m ve ikinci fazın kayma (drift) hızı $v_{dr,k}$ ise aşağıdaki ifadeler ile gösterilmektedir [42]:

$$\vec{\upsilon}_{dr,k} = \vec{\upsilon}_k - \vec{\upsilon}_m \tag{45}$$

$$\vec{\upsilon}_m = \frac{\sum_{k=1}^{n} \phi_k \rho_k \vec{\upsilon}_k}{\rho_m} \tag{46}$$

Burada υ_k ikinci fazın hızı olarak ifade edilmiştir.

İki faz arasındaki bağıl hız veya kayma hızı aşağıdaki eşitlikle gösterilmektedir:

$$\vec{\upsilon}_{pq} = \vec{\upsilon}_p - \vec{\upsilon}_q \tag{47}$$

Eşitlik (45)'de kullanılan υ_p ve υ_q sırasıyla ikinci (nanoparçacık) ve birinci (su) fazın hız vektörlerini ifade etmektedir. Sürüklenme hızı ile kayma hızı arasındaki bağ Eşitlik (46) ile gösterilmektedir:

$$\vec{\upsilon}_{dr,p} = \vec{\upsilon}_{pq} - \sum_{k=1}^{n} c_k \vec{\upsilon}_{qk} \tag{48}$$

Eşitlik (48)'de kullanılan c_k faz ağırlık oranını göstermektedir:

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \tag{49}$$

İki faz arasındaki bağıl hız Manninnen vd [47] tarafından aşağıdaki gibi gösterilmiştir:

$$\vec{\upsilon}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{\left(\rho_p - \rho_m\right)}{\rho_p} \vec{a} \tag{50}$$

Burada τ_p parçacık rahatlama zamanı (relaxation time), f_{drag} sürükleme katsayısı ve $\vec{a}$ ivme olarak tanımlanmıştır. Parçacık relaxation zamanı aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \tag{51}$$

Bu eşitlikte kullanılan d_p ikinci faz olan parçacığın çapı, μ_q ise birinci fazın, suyun, viskozitesidir.

İki fazlı karışım modelinde karışım için kullanılan süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin yanı sıra ikinci faz olan nanoparçacık için hacimsel oran denklemi de çözülmektedir. İkinci faz için hacimsel oran denklemi aşağıdaki gibi gösterilmektedir [43]:

$$\nabla \cdot (\phi_p \rho_p \vec{\upsilon}_m) = -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p \vec{\upsilon}_{dr,p}) \tag{52}$$

3.3.2. Sınır Koşulları

Başlangıçta hidro-dinamik olarak tam gelişmiş hıza ($u_{tam\ gelişmiş}$) ve belirli bir ilk sıcaklığa (T_i) sahip akışa sabit duvar sıcaklığı ve sabit duvar ısı akısı olmak üzere iki farklı sınır koşulu uygulanmıştır. İki farklı sınır koşulu için de hesaplamalar yapılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Kanal girişindeki hız, bölüm 3.2.1'e benzer olarak parabolik hız profili olarak tanımlanmıştır. Bölüm 3.2.1'den farklı olarak tez

çalışmasının bu kısmında, parabolik hız profili süreklilik ve momentum denklemlerinin de çözülmesiyle kanal boyunca sabit olarak kalmamaktadır.

3.3.2.1. Sabit Duvar Sıcaklığı Sınır Koşulu

Belirli bir ilk hıza ($u_{tam\ gelişmiş}$) ve sıcaklığa (T_i) sahip akış kendisinden daha yüksek sabit bir duvar sıcaklığındaki (T_w) silindirik kanal içinde ilerlemektedir. Yer çekimi kuvveti ihmal edildiği için açıya bağımlı değişimler denklemlerde hesaba katılmamıştır. Bu şartlar altında sınır koşulları aşağıdaki gibi tanımlanır:

Kanal girişinde ($x = 0$) :

$$u(0,r) = u_{tamgelişmiş} \tag{53}$$

$$T(0,r) = T_i \tag{54}$$

Kanal merkezinde ($r = 0$) :

$$\left.\frac{\partial u}{\partial r}\right|_{(r=0)} = 0 \tag{55}$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{(r=0)} = 0 \tag{56}$$

Kanal duvarında ($r = r_0$) :

$$u(r_0, x) = 0 \tag{57}$$

$$T(r_0, x) = T_w \tag{58}$$

3.3.2.2. Sabit Duvar Isı Akısı Sınır Koşulu

Belirli bir ilk hıza ($u_{tam\ gelişmiş}$) ve sıcaklığa (T_i) sahip akış sabit duvar sıcaklığı sınır koşulundan farklı olarak sabit duvar ısı akısına maruz kalmıştır.

Kanal duvarında ($r = r_0$) :

$$u(r_0, x) = 0 \tag{59}$$

$$q''(r_0, x) = q''_w \tag{60}$$

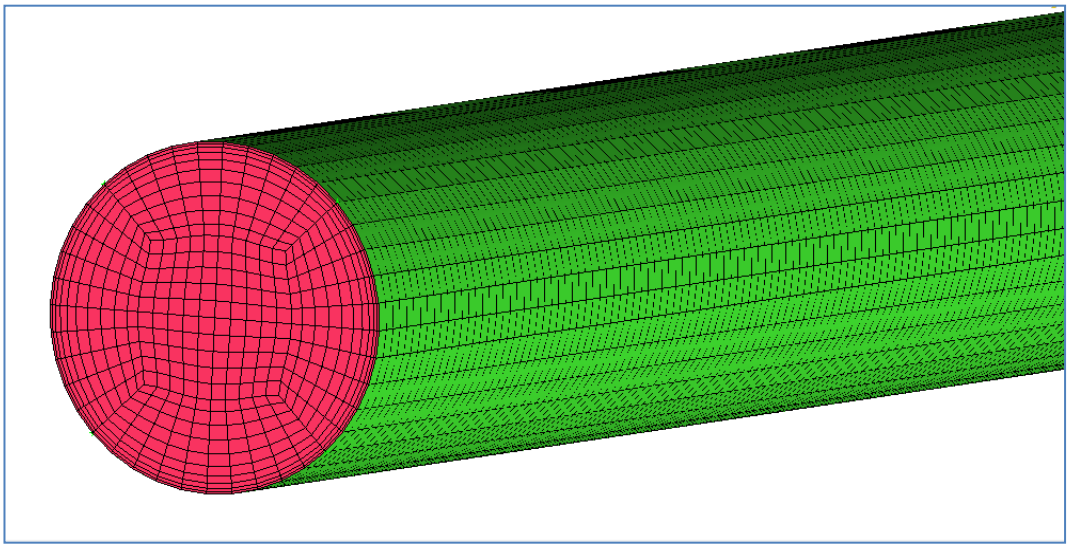
3.3.3. Sayısal Yöntem

Tez çalışmasının bu kısmında bir Hesaplamalı Akışkan Dinamiği yazılımı olan Fluent kodu kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. İki-fazlı akış karışım modeli için tanımlanan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri ayrıca nanoparçacık hacimsel oran denklemi sonlu hacimler yöntemi kullanılarak yinelemeli olarak çözülmüştür. Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinden arda kalan bağıl hata (residuals) yakınsama koşulu olarak ayarlanmış ve analizler bu koşula göre gerçekleştirilmiştir.

Aynı zamanda kodun doğruluğunu sağlamak açısından farklı çözüm ağı çalışması yapılarak çözümün oluştural ağ yapısına bağlı olmadığı gösterilmiştir.

3.3.4. Çözüm Ağı Çalışması

Sayısal analizlerin doğrulunu sağlamak amacıyla 3-boyutlu kanal geometrisi için farklı çözüm ağları ICEM-CFD programı kullanılarak oluşturulmuştur. Kanal uzunluğu (*x*-ekseni) ve çapı (*r*-ekseni) boyunca farklı nokta sayıları kullanılarak çözüm ağının sonuca etkisi gözlemlenmiştir. ICEM-CFD programı ile uzunluğu 1 m yarıçapı 0.005 olan silindirik kanal üzerine *r*-ekseni ve *x*-ekseni boyunca oluşturulan çözüm ağı (500x2001) Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Silindirik kanal geometrisi ve çözüm ağı yapısı

Giriş sıcaklığı 298 K olan hidro-dinamik olarak tam gelişmiş akış sabit duvar sıcaklığı (373 K) sınır koşuluna maruz kalmaktadır. Yapılan analizlerde Peclet sayısı 2000, nanoparçacık hacimsel oranı %3 olarak programa tanıtılarak iki-fazlı akış Fluent programı ile modellenmiştir. Nanoakışkan ısıl iletim katsayısı için Koo-Kleinstreuer modeli uygulanmıştır. Ayrıca su için sıcaklığa bağlı viskozite ve ısıl iletim katsayıları kullanılmıştır.

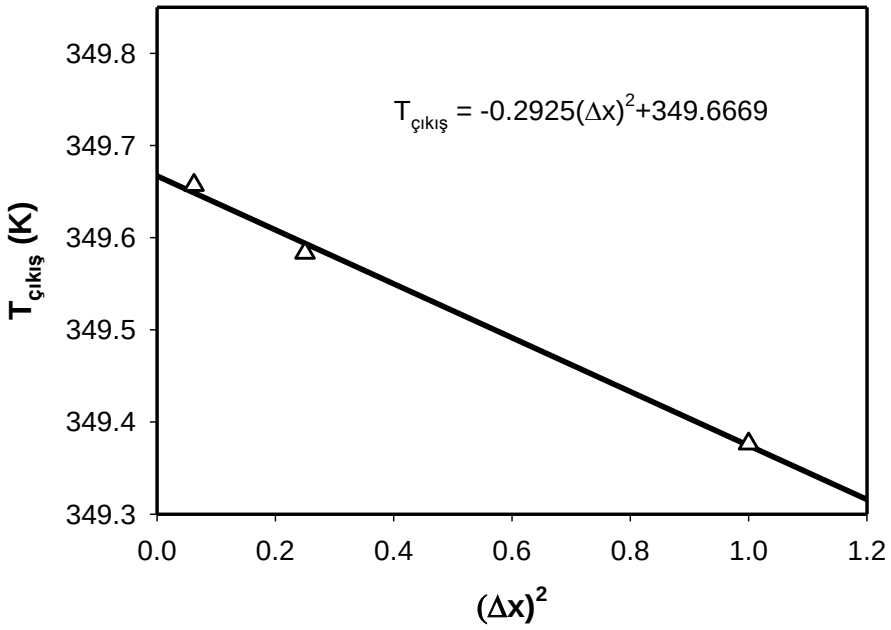
Fluent analizlerinde hata katsayısını azaltmak adına 2. dereceden momentum ve enerji denklemleri çifte duyarlı (double precision) çözülmüştür. Bu nedenle *x*-ekseni için yapılan analizlerde çıkış sıcaklığının çözüm ağının birim eleman büyüklüğünün karesine göre değişimi incelenmiştir. $T_{çıkış}$ - $(\Delta x)^2$ grafiğinden elde edilen doğru kullanılarak birim eleman büyüklüğü sıfıra giderken çıkış sıcaklığı hesaplanmıştır. Hesaplanan çıkış sıcaklığı, farklı nokta sayıları için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak hata hesabı yapılmıştır.

x-eksenindeki nokta sayısındaki artışın kanal çıkışındaki sıcaklık değerlerine etkisi Çizelge 3.1 ve Şekil 3.3'de gösterilmiştir. İkinci dereceden doğru sayısal yöntem için Δx değerlerinin yeterince küçük olması gerekmektedir. Bu yüzden Şekil 3.3'de Çizelge 3.1'den farklı olarak son üç Δx değeri kullanılmıştır.

x-eksenindeki çözüm ağı çalışmasında, *r*-yönündeki eleman sayısı 500 alınarak bu değer sabit tutulmuştur. Şekil 3.2'den faydalanarak eğri uydurma sonucunda $(\Delta x)^2$ sıfıra giderken bulunan çıkış sıcaklığı değeri 349.6669 K'dir. Elde edilen bu sonuç yardımıyla Çizelge 3.1'deki mutlak fark değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlere göre sonraki analizlere *x*-ekseninde 2001 nokta sayısı ile devam edilmiştir.

Çizelge 3.1. *x*-ekseninde çözüm ağı çalışması

Nokta Sayısı	***Δx***	$T_{çıkış}$	***Göreli Fark***	***Mutlak Fark***
501	2	349.0326	-	1.8114×10^{-3}
1001	1	349.3765	9.8432×10^{-4}	8.3050×10^{-4}
2001	0.5	349.5834	5.7539×10^{-4}	2.3880×10^{-4}
4001	0.25	349.6570	2.1049×10^{-4}	2.8313×10^{-5}



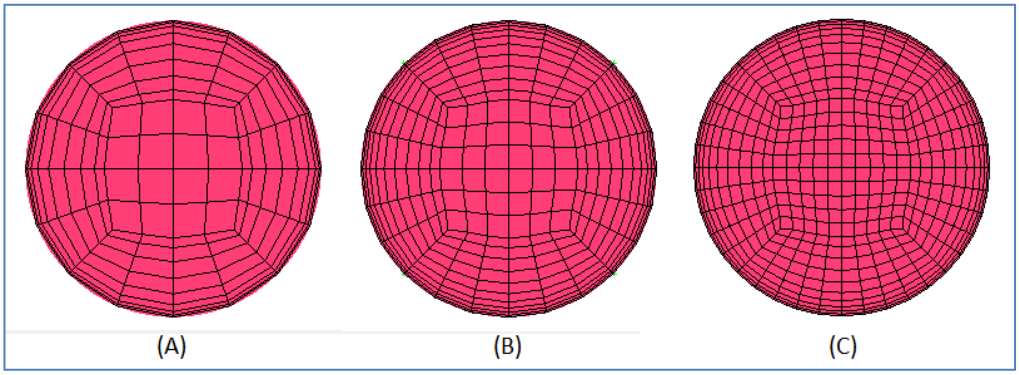
Şekil 3.3 Sayısal hata tahmini için *x*-eksenindeki oluşturulan farklı çözüm ağı sonuçları.

Çözüm ağı *x*-ekseni boyunca düzenli bir şekilde ilerlerken, *r*-eksenindeki çözüm ağı ani değişimlerin kanal duvarı yakınında meydana gelmesi sonucu kanal duvarına yakınlaştıkça sıklaşacak şekilde düzensiz oluşturulmuştur. *r*-ekseni için oluşturulan düzensiz ağ yapısı için *x*-ekseninde yapılan ağ çalışmasından farklı olarak *r*-ekseni boyunca kullanılan eleman sayılarının çıkış sıcaklığı sonuçlarına etkileri incelenmiştir.

r-eksenindeki kullanılan çözüm ağı düzensiz olduğu için kullanılan elaman sayısındaki artışın çıkış sıcaklıklarına etkisi incelenmiş ve Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Düzensiz ağ yapısının dağılımları Şekil 3.4'te gözükmektedir. Çözüm ağında *x*-ekseninde kullanılan nokta sayısı 2001 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Kullanılan farklı eleman sayıları için göreli fark *x*-eksenindeki ağ analizindeki benzer olarak 10^{-4} mertebesindedir. Bundan sonra yapılan hesaplamalarda *r*-ekseninde 500 elemanlı çözüm ağı kullanılacaktır.

Çizelge 3.2 *r*-ekseninde çözüm ağı çalışması

Çözüm Ağı	*Eleman Sayısı*	$T_{çıkış}$	*Göreli Fark*
A	144	349.2625	-
B	276	349.4273	4.7163×10^{-4}
C	500	349.5834	4.4653×10^{-4}



Şekil 3.4. *r*-ekseni doğrultusunda oluşturulan çözüm ağları.

4. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu kısmında ilk olarak zaman bağlı tek-fazlı akış modeli ve iki-fazlı akış karışım modeli literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Tek-fazlı akış modeliyle zamana bağlı sonuçlar farklı hacimsel nanoparçacık oranları için Koo-Kleinstreuer modeli kullanılarak incelenmiştir. Sistem daimi rejime ulaştığında ise parçacık boyutu ve Peclet sayılarının etkileri gözlemlenmiştir. İki-fazlı akış modeli sonuçlarında farklı nanoakışkan ısıl iletim katsayısı ve viskozite modelleri için ısı transferindeki artış hesaplanmış, bu modellerin oluşturdu farklar tartışılmıştır. Son olarak literatürdeki deneysel veriler kullanılarak tek-fazlı ve iki-fazlı model sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca Fluent kodu yardımıyla belirli koşullar altında tek-fazlı akış ile iki-fazlı akış modeliyle elde edilen sonuçlar kıyaslanmış aralarındaki farklar ortaya konmuştur.

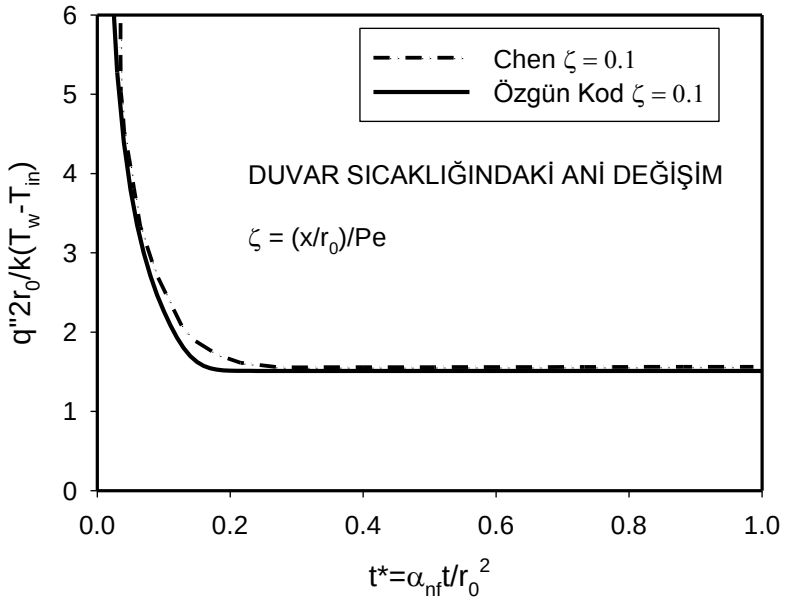
4.1. Sayısal Analizlerin Doğrulanması

Sayısal çalışmalarda, yapılan hesaplamaların literatürdeki benzer çalışmalarla veya analitik çözümlerle doğrulanması analizlerin güvenilirliği açısından çok önemlidir.

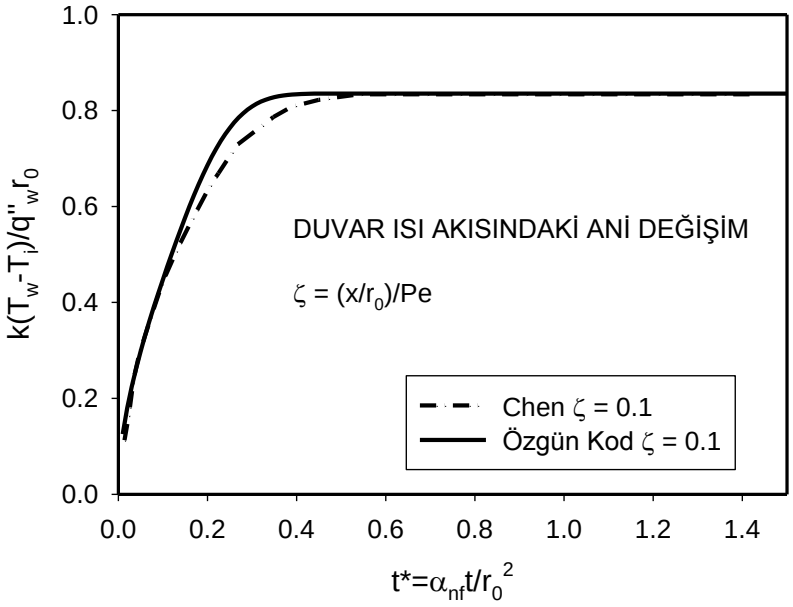
4.1.1. Zamana Bağlı Tek-Fazlı Akış Modeli (Özgün Kod)

Oluşturulan kod daha önce literatürde yer alan benzer bir çalışma [48] ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Chen vd. [48] silindirik kanla içinde zamana bağlı saf su akışı için duvar sıcaklığındaki ve duvar ısı akısındaki ani değişimi sonucunda oluşan ısı transferini incelemişlerdir. Oluşturulan kod için de aynı koşullar girilerek elde edilen sonuçlar her iki sınır koşulu için de Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de Chen vd sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.1'de duvar sıcaklığındaki ani değişim koşulu için özgün kod ve Chen vd.[48] ile elde edilen boyutsuz duvar ısı akılarının zamana karşı değerleri verilen kanal uzunluğu ve Peclet sayısında gösterilmiştir. Benzer olarak Şekil 4.2'de duvar ısı akısındaki ani değişim koşulu için özgün kod ve Chen vd. ile elde edilen boyutsuz duvar sıcaklılıkları incelenmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere sonuçlar birbirleriyle oldukça uygundur.



Şekil 4.1 Duvar sıcaklığındaki ani eğişim sonucu elde edilen zamana karşı boyutsuz duvar ısı akı sonuçlarının karşılaştırılması.

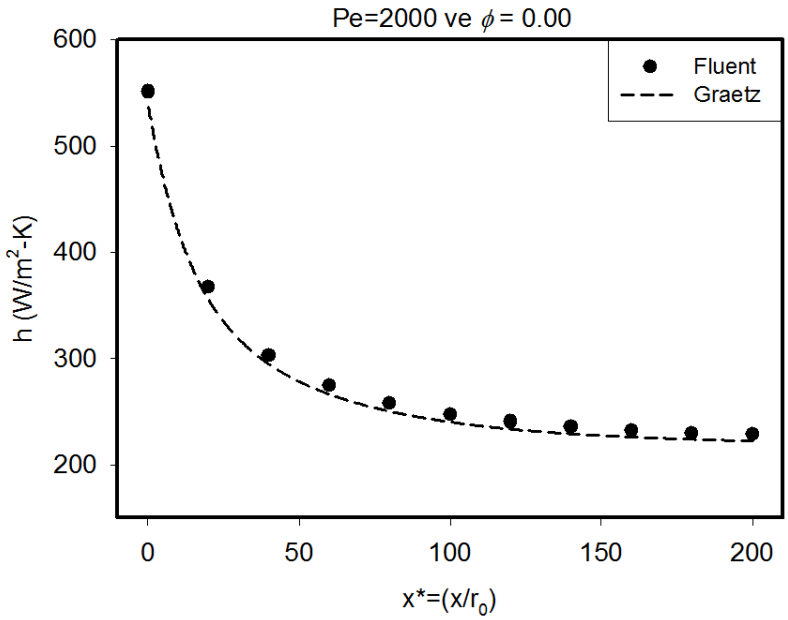


Şekil 4.2 Duvar ısı akısındaki ani eğişim sonucu elde edilen zamana karşı boyutsuz duvar sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması.

4.1.2. İki-Fazlı Akış Karışım Modeli (Fluent)

Bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan Fluent kodu ile yapılan simülasyonların sonuçları literatürde yer alan Graetz analitik çözümü [45] ile kıyaslanmıştır. Sabit duvar sıcaklığı sınır koşulu altında silindirik kanal içinde hidrodinamik olarak tam gelişmiş laminer akış için analitik çözüm sağlayan Graetz çözümü yine aynı koşullar altında yapılan Fluent simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çözümlerden elde edilen kanal boyunca ısı transferi katsayıları Şekil 4.3'de gösterilmektedir. Fluent sayısal çözümü ile Graetz çözümü arasındaki ortalama karesel fark %2.9499 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.3'de görüldüğü üzere Fluent sayısal çözümü ile Graetz [45] çözümü kanal boyunca oldukça yakın bir davranış sergilemiştir.



Şekil 4.3 Kanal boyunca ısı transfer katsayılarının Fluent ve Graetz çözümü ile kıyaslanması.

Graetz çözümü kanal boyunca sabit termo-fiziksel özelliklere sahip akış için oluşturulmuş analitik çözümdür.[45] Sabit duvar sıcaklığı sınır koşulu Graetz çözümüyle hesaplanan yerel Nusselts sayısı aşağıdaki gibi gösterilir:

$$Nu_x = 3.66 + \frac{0.0668(d/x)Pe}{1+0.04[(d/x)Pe]^{2/3}} \tag{61}$$

Kanal boyunca elde edilen yerel Nusselt sayıları ile yerel ısı transferi katsayıları arasındaki bağıntı Eşitlik(24)'den farklı olarak saf su için Eşitlik (62)'de gösterilmektedir.

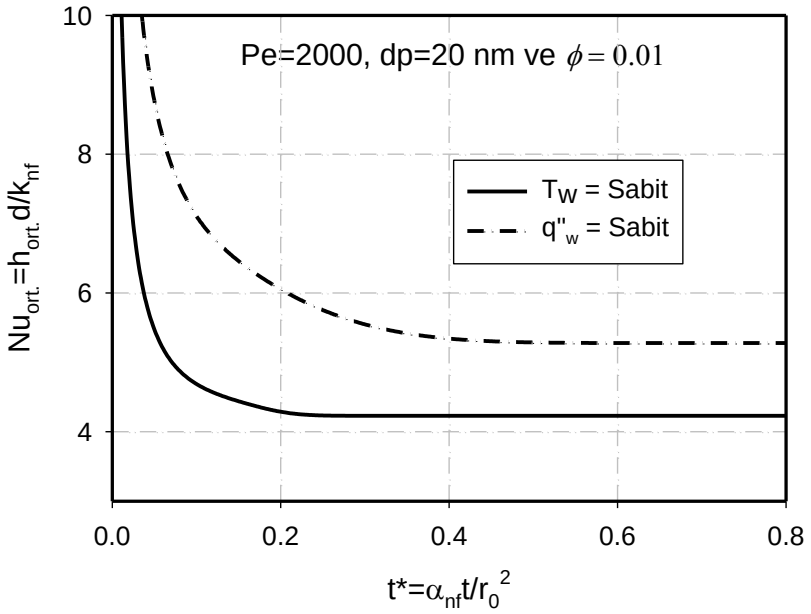
$$h_x = \frac{Nu_x k}{d} \tag{62}$$

4.2. Zamana Bağlı Tek-Fazlı Akış Modeli Sonuçları (Özgün Kod)

Çalışmanın bu bölümünde, nanoakışkanlar ile silindirik kanal içindeki hidrodinamik olarak tam gelişmiş ve ısıl olarak gelişmekte olan zamana bağlı akışın sayısal analiz sonuçları şekiller ve çizelgeler halinde sunulmuştur. Ayrıca her iki sınır koşulu için Peclet sayısının, parçacık boyutunun ve de parçacık hacimsel oranın ısı transferine etkileri daimi rejimde araştırılmıştır.

4.2.1. Isıl iletim ve Isı Transferi Katsayılarındaki Zamana Bağlı Değişimler

Duvar sıcaklığındaki ve ısı akısındaki ani değişim sınır koşullarıyla zamana bağlı enerji denklemi Koo-Kleinstreuer modeli kullanılarak çözülmüştür. Nanoakışkanlarla ısı transferi analizlerinde büyük öneme sahip, ısıl iletim katsayısı, ısı transferi katsayısı ve Nusselt sayısı gibi parametrelerin zamana bağlı değişimleri çizelge ve şekillerle gösterilmiştir. Sistemin ortalama Nusselt sayısı değişimleri farklı boyutsuz zaman adımlarında iki sınır koşulu için de Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Duvar ısı akısındaki ani değişim koşulu için elde edilen sonuçlar duvar sıcaklığı ani değişimi koşuluna göre daha yüksek çıkmıştır. Nanoparçacık hacimsel oranın Nusselt sayısındaki değişime etkisi çok düşük olduğundan, daha iyi karşılaştırma yapmak adına farklı parçacık hacimsel oranları için elde edilen sonuçlar daimi rejim sonuçları kısmında çizelgelerle gösterilmiştir. Nanoparçacık hacimsel oranının Nusselt sayısına etkisinin düşük olmasının sebebi ısıl iletim katsayısı ve ısı transferi katsayısının aynı oranda artmasıdır.

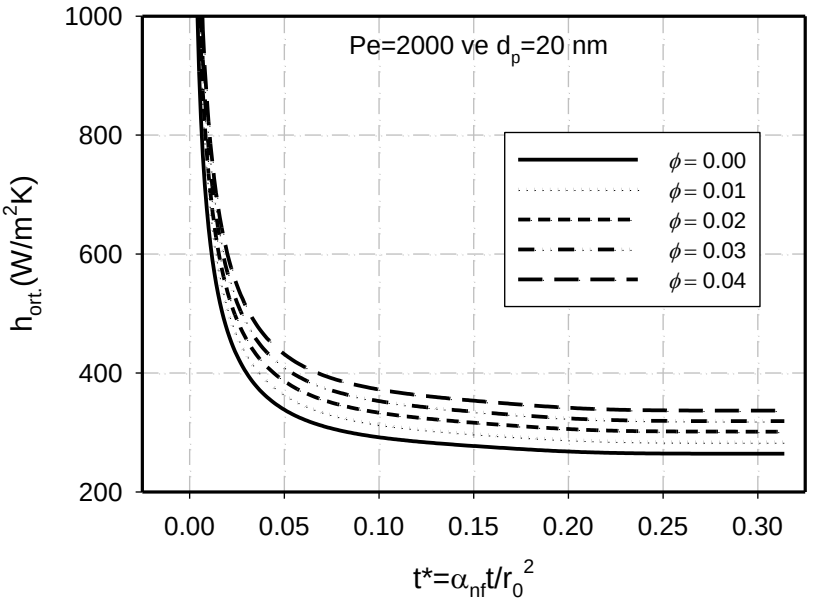


Şekil 4.4 Nusselt sayılarının farklı sınır koşulları için zamana göre değişimi.

4.2.1.1. Duvar Sıcaklığındaki Ani Değişim (DSAD)

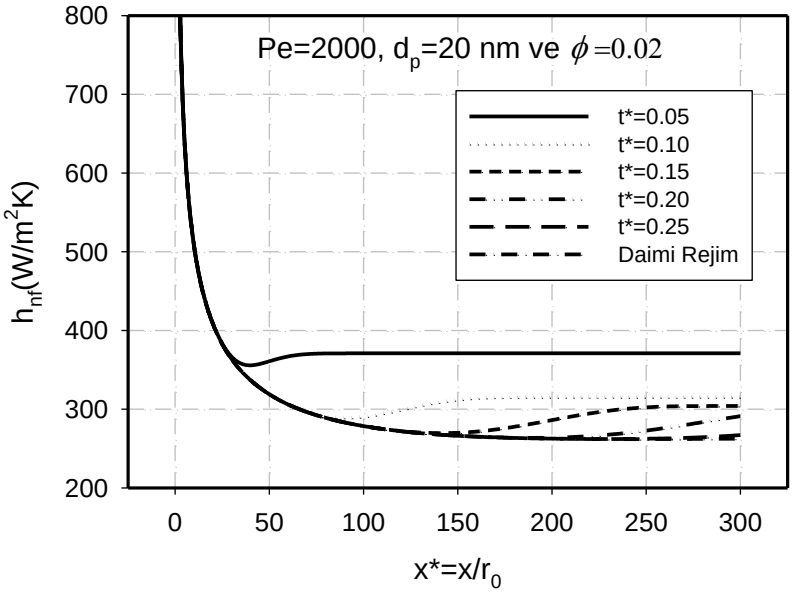
Yapılan zamana bağlı analizlerde, Peclet sayısı ve nanoparçacık çapı sırasıyla 2000 ve 20 nm olarak alınmıştır. Nanoakışkan ısıl iletim ve ısı transferi katsayıları 1.5 m uzunluğunda ve 0.01 m yarıçaplı silindirik bir kanalda zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. Akış kanala 25°C ile girmekte olup kanal duvar sıcaklığı 50°C dir.

Şekil 4.5'de ortalama ısı transferi katsayıları farklı parçacık hacimsel oranları için sistem daimi rejime ulaşana kadar gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere akış daimi rejime boyutsuz zaman adımı t^*=0.31 olduğunda ulaşmaktadır. Bu değer Peclet sayısına, kanal geometrisine ve de sınır koşuluna bağlıdır.



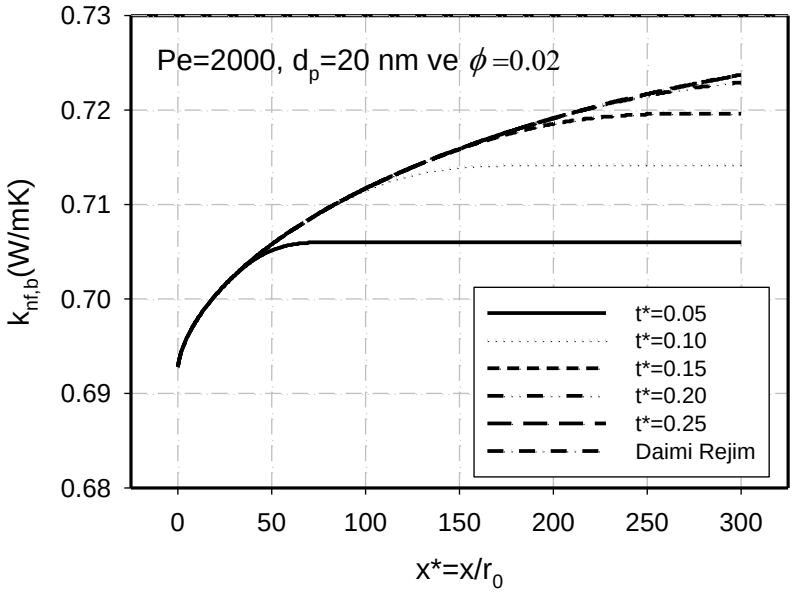
Şekil 4.5 Ortalama ısı transferi katsayılarının farklı parçacık hacimsel oranlarıyla zamana göre değişimi (DSAD).

Şekil 4.6'da kanal boyunca ısı transferi katsayıları farklı boyutsuz zaman adımlarında belirli bir hacimsel parçacık oranı için (ϕ=0.02) gösterilmektedir. Kanal boyunca ısı transferi katsayılarının değişimi davranışı farklı hacimsel parçacık oranları için aynıdır, parçacık hacimsel oranındaki artış daha yüksek ısı transferi katsayıları değerleri vermektedir. Hacimsel parçacık oranın etkisini daha iyi görmek için kanal çıkışındaki (x*=300) ısı transferi katsayıları değerleri farklı zaman adımları için Tablo 1 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Kanal boyunca ısı transferi katsayılarının farklı zaman adımlarında değişimi (DSAD).

Kanal boyunca ısı transferi katsayılarına benzer olarak Şekil 4.7'de kanal boyunca ısıl iletim katsayıları değişimleri farklı boyutsuz zaman adımlarında verilen Peclet sayısı, parçacık boyutu ve hacimsel parçacık oranı için gösterilmiştir. Isıl iletim katsayılarının zaman adımıyla beraber arttığı ve daimi rejimdeki halini aldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7 Kanal boyunca ısıl iletim katsayılarının farklı zaman adımlarında değişimi (DSAD).

Şekil 4.7'de kanal boyunca gösterilen ısıl iletim katsayılarının davranışı kanal boyunca yığın sıcaklık değerlerinin davranışıyla aynıdır. Brownian hareketi ve sıcaklığa bağlı su ısıl iletim katsayısının etkileri sonucu nanoakışkan ısıl iletim katsayıları, yığın sıcaklık değerleri davranışıyla oldukça benzerdir.

Çizelge 4.1. Kanal çıkışındaki ısı transferi katsayılarının farklı hacimsel parçacık oranı ve boyutsuz zaman adımları için duvar sıcaklındaki ani değişim koşulunda (DSAD) gösterimi.

	$\mathbf{h_{nf,x}}$ **(W/m^{2}K)**					
ϕ	***t**=0.05**	***t**=0.10**	***t**=0.15**	***t**=0.20**	***t**=0.25**	**Daimi Rejim**
0.00	325.00	276.25	266.70	255.59	234.48	230.4
0.01	348.65	296.24	285.92	273.89	251.28	246.93
0.02	370.88	315.03	303.99	291.09	267.09	262.51
0.03	392.75	333.52	308.03	308.03	282.65	277.83
0.04	414.49	351.9	339.47	324.86	298.12	293.08

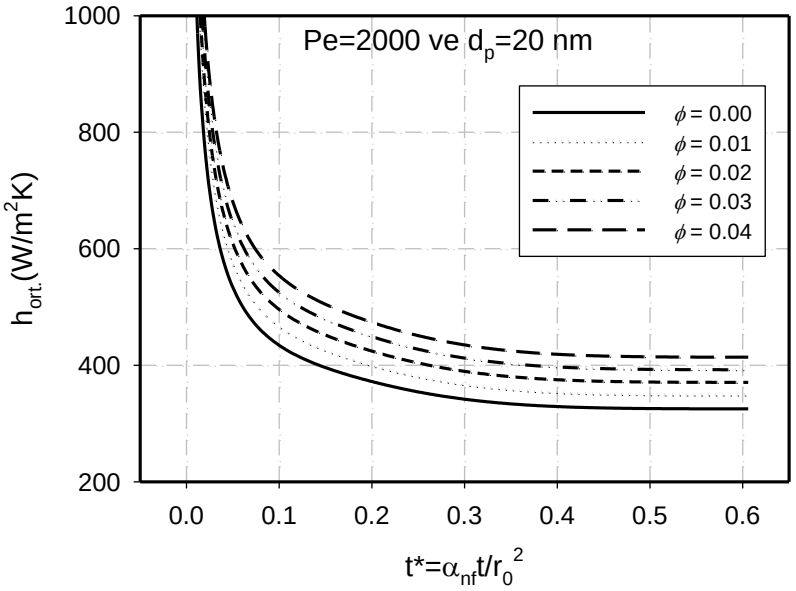
Çizelge 4.1'de farklı hacimsel parçacık oranları ve farklı boyutsuz zaman adımları için kanal çıkışındaki ısı transferi katsayıları verilmiştir. Artan hacimsel parçacık oranlarıyla birlikte ısı transferi katsayısı değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Değişen boyutsuz zaman adımı içinse ısı transferi katsayısı değerlerinin azalarak daimi rejim değerlerine ulaştığı görülmektedir.

4.2.1.2. Duvar Isı Akısındaki Ani Değişim (DIAD)

Çalışmanın bu kısmında aynı geometri, Peclet sayısı ve parçacık çapı için duvar ısı akısındaki ani değişim koşulunun etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Akış giriş sıcaklığı duvar sıcaklındaki ani değişim koşulundaki gibi 25 °C olarak alınmıştır, sabit duvar ısı akısı ise 3000 W/m^2 dir.

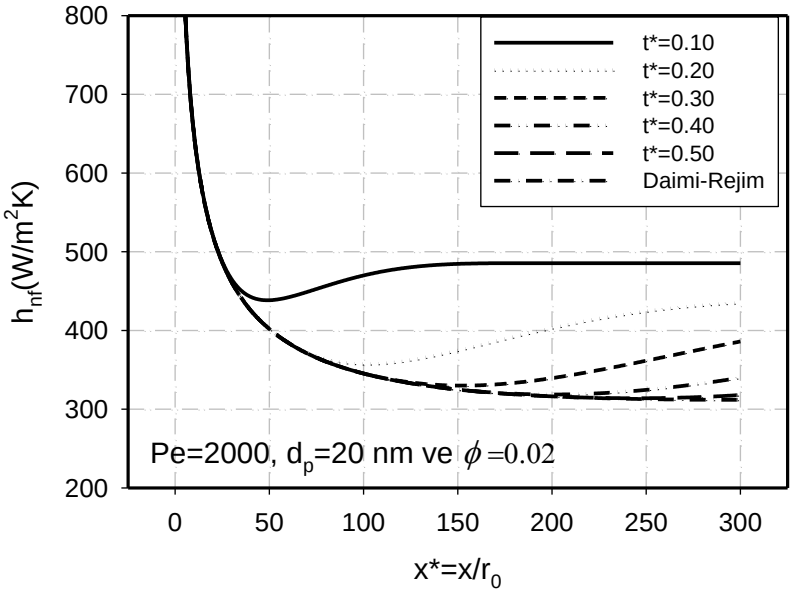
Şekil 4.8'de ortalama ısı transferi katsayıları farklı parçacık hacimsel oranları için sistem daimi rejime ulaşana kadar gösterilmiştir. Isı transferi katsayısı değerleri daimi rejime 0.59. boyutsuz zaman adımında ulaşmıştır. Sabit duvar sıcaklığındaki değişim koşulundaki daimi rejime ulaşma süresi göz önüne alınırsa sabit duvar ısı

akısındaki değişim koşulundaki daimi rejime ulaşma süresi neredeyse iki kat artmıştır. Hesaplamalarda aynı geometri ve Peclet sayısı kullanıldığı için bu sonuç daha önceden de bahsedildiği gibi sınır koşullarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca elde edilen ısı transferi katsayısı değerleri duvar sıcaklındaki ani değişim koşuluna göre daha yüksektir.

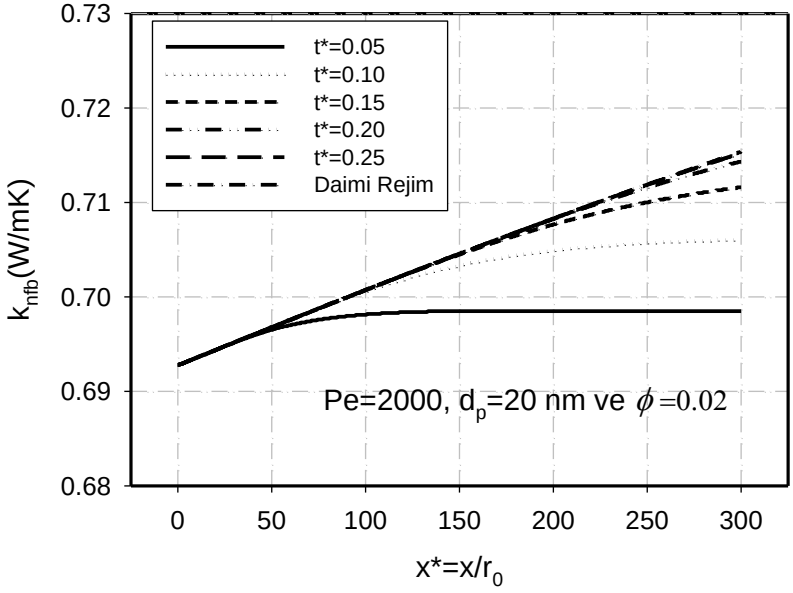


Şekil 4.8 Ortalama ısı transferi katsayılarının farklı parçacık hacimsel oranlarıyla zamana göre değişimi (DIAD).

Duvar sıcaklığındaki ani değişim sınır koşulunda zamana bağlı ortalama ısı transferi katsayılarının değişiminin anlatıldığı, bölüm 4.2.1.1'e benzer olarak kanal boyunca ısı transferi ve ısıl iletim katsayıları verilen Peclet sayısı, parçacık boyutu ve hacimsel parçacık oranı için farklı zaman adımlarında incelenmiştir ve Şekil 4.9. ve 4.10'da gösterilmiştir. Artan hacimsel parçacık oranıyla birlikte ısıl iletim ve ısı transfer katsayıları yükselmiştir.



Şekil 4.9 Kanal boyunca ısı transferi katsayılarının farklı zaman adımlarında değişimi (DIAD).



Şekil 4.10 Kanal boyunca ısıl iletim katsayılarının farklı zaman adımlarında değişimi (DIAD).

Duvar sıcaklığındaki ani değişim koşulundan farklı olarak ısı transferi katsayısı değerleri duvar ısı akısındaki ani değişim koşulu sonuçlarında daha yüksek çıkmıştır.

Zaman adımının artmasıyla ısıl iletim katsayısı yükselerek büyük zaman adımlarında daimi rejime ulaşmıştır. Kanal boyunca ve zaman adımıyla artan yığın sıcaklık değerleriyle beraber duvar sıcaklındaki ani değişim koşulundaki ısıl iletim katsayısı da artmıştır.

Ayrıca Tablo 4.2'de hacimsel parçacık oranlarının kanal çıkışındaki ısı transferi katsayılarına etkileri farklı zaman adımlarında gösterilmiştir. Başlangıçta kanal duvarı ve akışkan arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı ısı transferi katsayıları zamanla azalmıştır.

Çizelge 4.2. Kanal çıkışındaki ısı transferi katsayılarının farklı hacimsel parçacık oranı ve boyutsuz zaman adımları için duvar ısı akısındaki ani değişim koşulunda (DIAD) gösterimi.

	$h_{nf,x}$ (W/m^{2}K)					
ϕ	t^*=0.10	t^*=0.20	t^*=0.30	t^*=0.40	t^*=0.50	Daimi rejim
0.00	425.63	381.94	339.87	299.42	279.95	274.86
0.01	456.50	409.18	363.64	320.25	299.53	293.64
0.02	485.52	434.82	386.00	339.86	317.97	311.79
0.03	514.09	460.06	408.05	359.19	336.14	329.67
0.04	542.48	485.14	429.96	378.42	354.2	347.45

4.2.2. Daimi Rejimde Tek-Fazlı Özgün Kod Sonuçları

Bu çalışmanın önceki kısımlarında nanoakışkanlarla silindir içindeki laminer akış için sistemin termal karakteristik özelliklerinin zamana bağlı sonuçları verilmiştir.

Zamana bağlı özgün kod yardımıyla büyük zaman adımları için hesaplamalar yapılarak daimi rejim sonuçları elde edilmiştir.

Çalışmanın bu kısmında, Peclet sayısının, nanoparçacık hacimsel oranın ve nanoparçacık boyutunun ısı transferine etkileri her iki sınır koşulu (DSAD ve DIAD) için de daimi rejimde incelenmiş ve sonuçlar tablo ve şekiller ile gösterilmiştir.

Farklı Peclet sayılarının, hacimsel parçacık oranlarının ve parçacık boyutlarının daimi rejimde ısı transferine etkisi her iki koşul için de incelenmiş fakat farklı sınır koşulları için elde edilen grafikler birbirleriyle çok benzer olduğu için sonuçlar sadece duvar sıcaklığındaki ani değişim koşulu (DSAD) için verilmiştir. Sınır koşulları arasındaki farkı daha iyi gözlemleyebilmek için bu değerler tablo halinde sunulmuştur. Isı transferindeki artış aşağıdaki Eşitlik (63) ile verilmiştir.

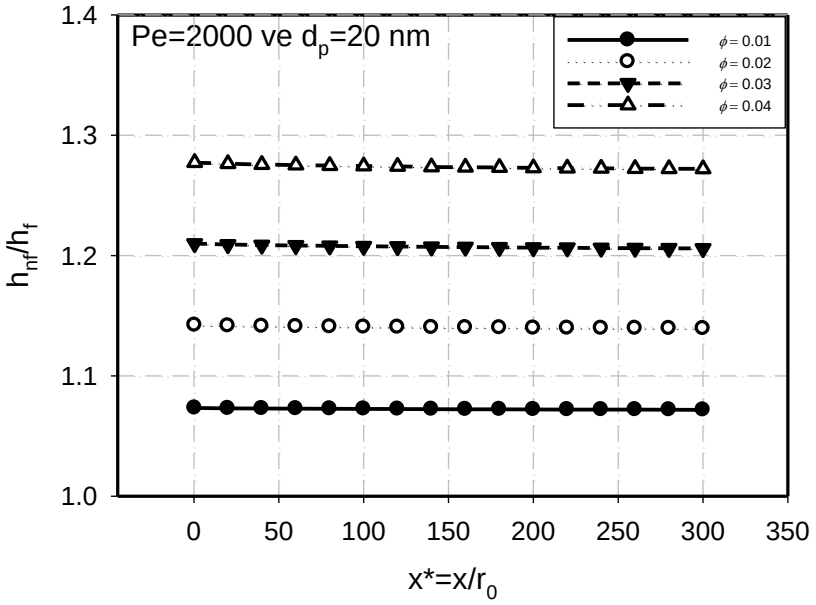
$$Isı\ Transferindeki\ Artış(\%) = \left(\frac{h_{nf}}{h_f} - 1 \right) \times 100 \tag{63}$$

Çizelge 4.3'te ısı transferindeki artış, ortalama ısı transferi katsayıları ve Nusselt sayıları farklı hacimsel nanoparçacık oranları için verilmiştir. Hacimsel nanoparçacık oranının artmasıyla ortalama ısı transferinde ve dolayısıyla ısı transferindeki artışta yükselme gözlemlenmiştir. Buna karşılık Nusselt sayısında hacimsel parçacık oranıyla çok az bir artış görülmüştür, bunun sebebi ısı transferi katsayısının ısı iletim katsayısıyla benzer bir şekilde artış göstermesidir. Ortalama ısı transferi katsayıları duvar ısı akısındaki ani değişim koşulu (DIAD) için yüksek çıksa da ısı transferindeki artış iki koşul içinde neredeyse aynıdır.

Çizelge 4.3 Ortalama ısı transferi katsayıları, Nusselt sayıları ve ısı transferindeki artışın hacimsel nanoparçacık oranlarıyla değişimleri.

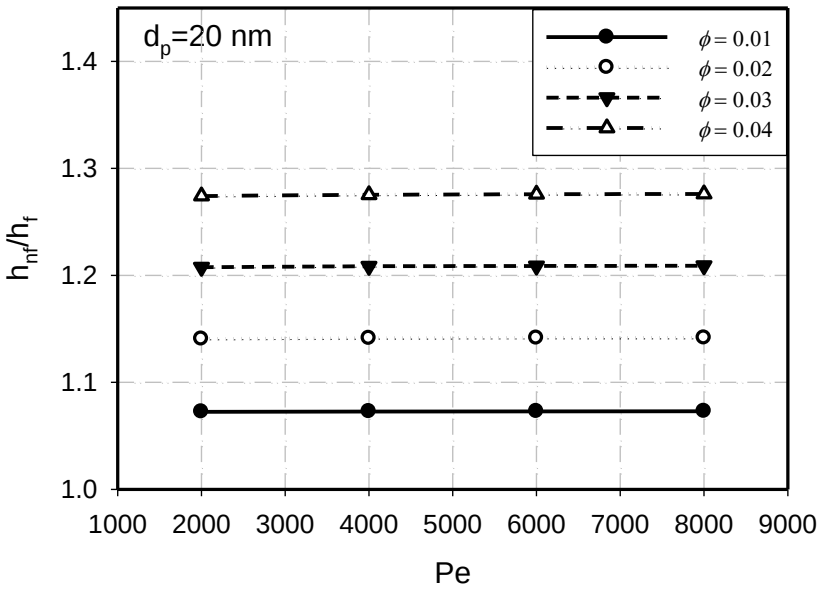
Hacimsel Parçacık Oranı ϕ	**Ortalama Isı Transferi Katsayısı** h_{ave} **(W/m^2·K)**		**Nusselt Sayısı (at x*=300)** Nu_x		**Isı Transferi Artışı** h_{nf}/h_f **(%)**	
	SDS	**SIA**	**SDS**	**SIA**	**SDS**	**SIA**
0.00	264.24	325.16	3.6261	4.3604	0.00	0.00
0.01	283.37	348.59	3.6263	4.3638	7.24	7.21
0.02	301.37	370.64	3.6271	4.3669	14.05	13.99
0.03	319.08	392.33	3.6275	4.3684	21.75	20.66
0.04	336.67	413.89	3.6282	4.3688	27.41	27.28

Daimi rejimde nanoakışkanların kanal boyunca ısı transferindeki artışta etkisi duvar sıcaklığındaki ani değişim koşulu için (DSAD) Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Isı transferi katsayılarındaki artışa benzer olarak hacimsel parçacık oranın artmasıyla ısı transferindeki artışın yükseldiği gözlenmektedir.



Şekil 4.11 Kanal boyunca daimi rejimde ısı transferindeki artışın farklı hacimsel parçacık oranlarıyla değişimi (DSAD).

Peclet sayısındaki değişimin daimi rejimde duvar sıcaklığındaki ani değişim koşulu (DSAD) için ısı transferindeki artışa etkisi Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



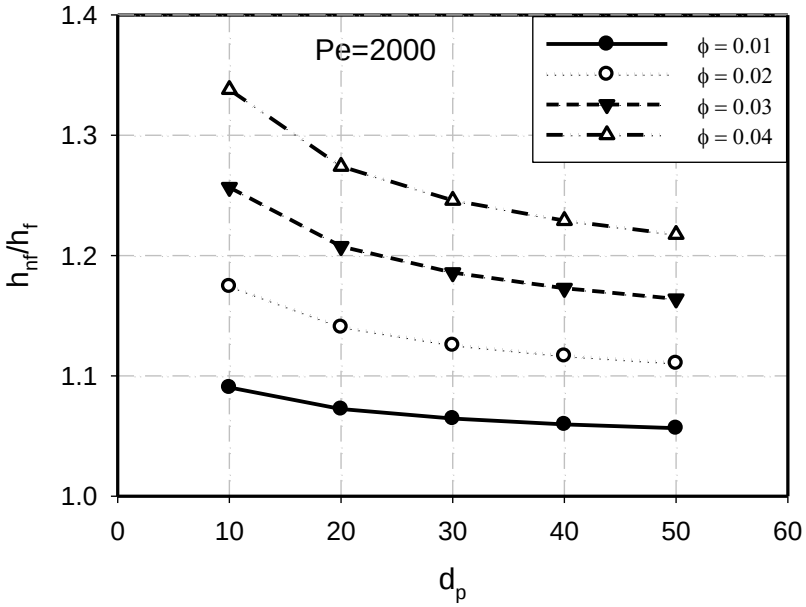
Şekil 4.12 Peclet sayısının ısı transferindeki artışa etkisi.

Şekilde gösterildiği üzere farklı Peclet sayılarının ısı transferine etkisi oldukça azdır, hidro-dinamik olarak tam gelişmiş laminer akış için bu sonuç beklenildiği gibi çıkmıştır. Çizelge 4.4'de ve Şekil 4.13'de parçacık boyutunun daimi rejimde ısı transferindeki artışa etkileri incelenmiştir.

Çizelge 4.4 Nanoparçacık boyutunun ısı transferindeki artışa etkisi.

Hacimsel Parçacık Oranı	**Isı Transferi Artışı h_{nf}/h_f (%)**									
ϕ	**d_p=10 nm**		**d_p=20 nm**		**d_p=30 nm**		**d_p=40 nm**		**d_p=50 nm**	
	SDS	**SIA**	**SDS**	**SIA**	**SDS**	**SIA**	**SDS**	**SIA**	**SDS**	**SIA**
0.01	09.04	08.99	07.24	07.21	06.45	06.42	05.97	05.94	05.65	05.62
0.02	17.43	17.37	14.05	13.99	12.55	12.49	11.66	11.60	11.05	10.99
0.03	25.66	25.55	20.75	20.66	18.58	18.49	17.28	17.20	16.40	16.32
0.04	33.80	33.66	27.41	27.29	24.58	24.46	22.90	22.79	21.75	21.65

Sınır koşulları arasındaki fark Çizelge 4.4'de ayrıntılı bir biçimde ortaya konulmuştur. Çizelge 4.4'de görüldüğü üzere sınır koşulları arasında fark neredeyse yok denilecek kadar azdır. Nanoparçacık boyutunun azalmasının ısı transferindeki artışı yükselttiği Çizelge 4.4'de ve Şekil 4.13'de ortaya konulmuştur. Küçük parçacıkların büyük parçacıklara oranla hareket etme yetenekleri daha fazla olduğundan Brownian hareketinin etkisi daha fazla ortaya çıkmıştır. Bu yüzden küçülen parçacık boyutuyla ısı transferi artmıştır.



Şekil 4.13 Nanoparçacık boyutunun ısı transferindeki artışa etkisi.

4.3. İki-fazlı Akış Karışım Modeli (Fluent)

Nanoakışkanlar ile silindirik kanal içindeki laminer rejimde zorlanmış taşınımla ısı transferi analizi sonuçları iki-fazlı karışım modeli kullanılarak Fluent HAD yazılımıyla hesaplanmıştır. Analizlerde hidro-dinamik olarak tam gelişmiş akış için farklı nanoparçacık hacimsel oranları, nanoparçacık boyutu ve sınır koşullarının etkileri farklı ısıl iletim katsayısı ve viskozite modelleri kullanılarak gözlemlenmiştir. Her koşul için Peclet sayısı sabit tutulacak şekilde giriş hızları verilmiştir. Farklı ısıl iletim katsayısı ve viskozite modelleri ile yapılan HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda şekil ve çizelgelerle gösterilmiştir.

4.3.1. Isıl iletim Katsayısı Modelleri

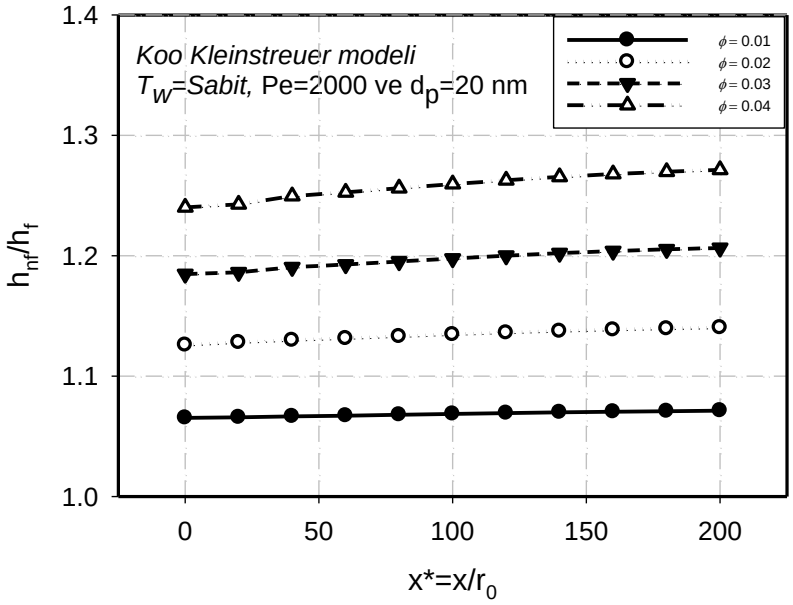
Kullanılan ısıl iletim katsayısı modelleri belli bir parçacık boyutu ve sıcaklık aralığında geçerli olduğundan parçacık boyutu 20-80 nm ve giriş, duvar sıcaklığı değerleri 292-323 K derece olacak şekilde analizler yapılmıştır. Sabit duvar ısı akısı

koşulu için sistemin sıcaklık değerleri, yine bu koşulları sağlaması adına $q''_w = 5660$ W/m^2 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada bütün ısıl iletim katsayı modelleri için elde edilen sonuçlar için Einstein viskozite modeli kullanılmıştır.

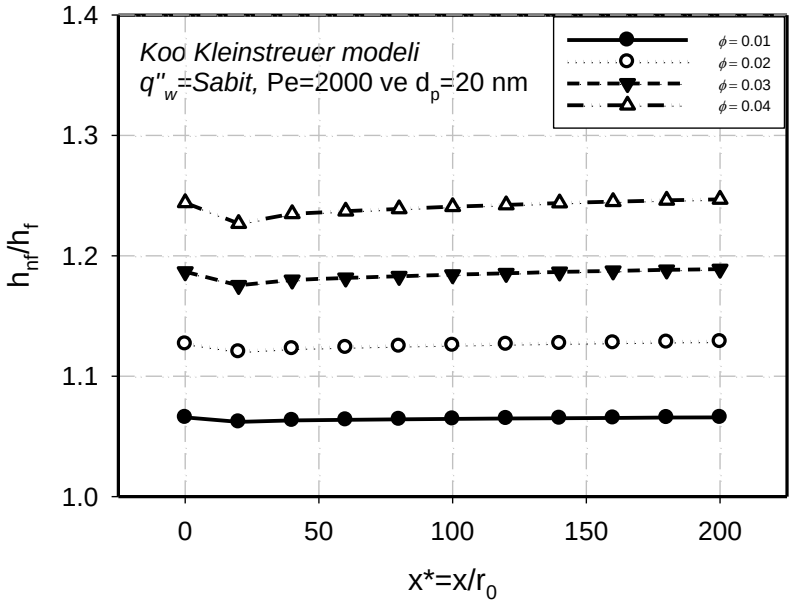
Şekil 4.14'de Koo-Kleinstreuer modeli etkisi sonucu sabit duvar sıcaklığı (SDS) ve sabit duvar ısı akısı (SIA) sınır koşulları için kanal boyunca ısı transferindeki artış gösterilmiştir.

Daha önceki çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlara benzer olarak artan hacimsel parçacık oranı ile ısı transferindeki artışın da yükseldiği gözlemlenmektedir. Sabit duvar ısı akısı koşulu için elde edilen sonuçlardaki artış sabit duvar sıcaklığı koşuluna göre biraz daha düşük değerler vermektedir, bunun sebebi SIA koşulu ile elde edilen sıcaklıkların SDS koşulundan daha düşük olmasıdır. Bilindiği gibi ısıl iletim katsayısı sıcaklığa bağlı olduğu için SIA koşulu SDS koşuluna göre biraz daha düşük değerler vermektedir.

Çizelge 4.5'de farklı sınır koşulları için ortalama ısı transferi katsayıları ve ısı transferindeki artış gösterilmektedir. SIA koşulu için ısı transferi katsayısı değerleri SDS koşuluna göre beklendiği gibi daha yüksektir fakat ısı transferindeki artış değerlerinde SDS koşulu SIA koşuluna göre az da olsa yüksek bulunmuştur.



Şekil 4.14 a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu için Koo-Kleinstreuer modeli sonucu ısı transferindeki artış oranları.

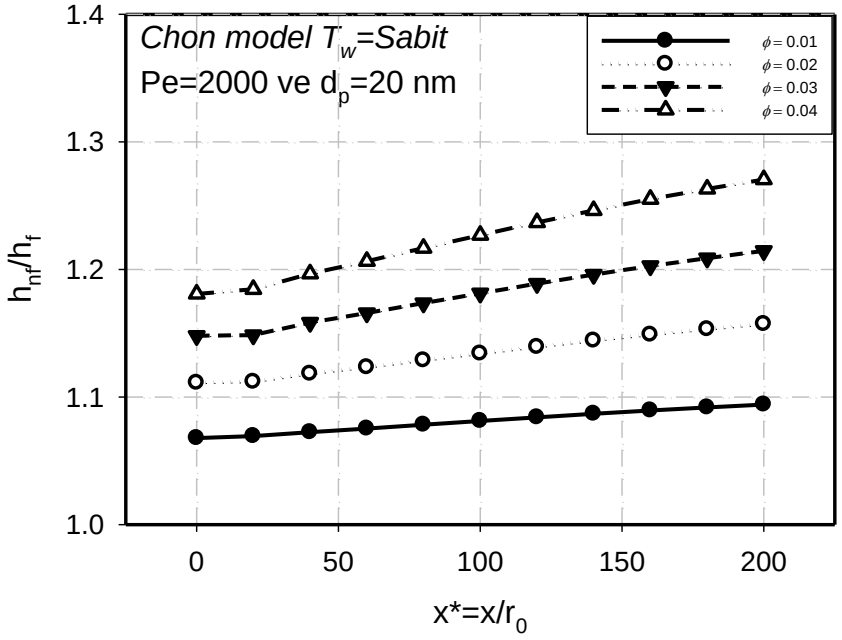


Şekil 4.14 b) Sabit duvar ısı akısı koşulu için Koo-Kleinstreuer modeli sonucu ısı transferindeki artış oranları.

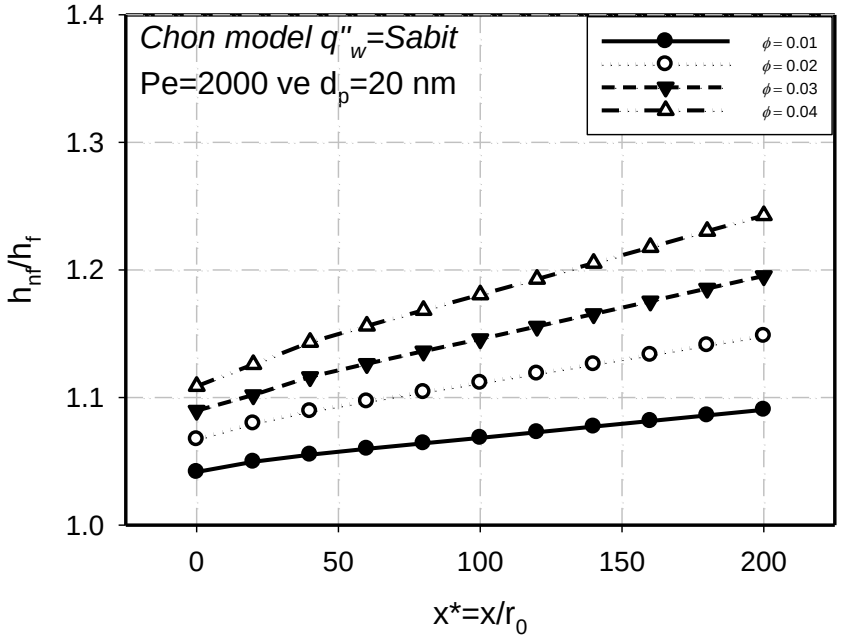
Çizelge 4.5 Koo-Kleinstreuer modeli ile farklı sınır koşulları için ortalama Isı transferi katsayısı ve ısı transferindeki artışın hacimsel parçacık oranına göre değişimi.

Hacimsel Nanoparçacık Oranı ϕ	**Ortalama Isı Transferi Katsayısı h (W/m^2-K)**		**Isı Transferindeki Artış (%)**	
	SDS	**SIA**	**SDS**	**SIA**
0.00	586.798	944.386	---	---
0.01	625.975	1006.040	6.845	6.456
0.02	662.835	1063.701	13.399	12.576
0.03	698.414	1119.735	19.677	18.433
0.04	733.221	1173.325	25.796	24.056

Şekil 4.15'de Chon modeli ile farklı sınır koşullarında ısı transferi artışındaki değişim gösterilmiştir. İki sınır koşulu için de kanal boyunca artan sıcaklık ve buna bağlı olarak yükselen ısıl iletim katsayısı sonucu ısı transferindeki artış kanal sonuna doğru artmıştır. Chon vd'nin ısıl iletim katsayısı modeli sıcaklığa, daha önce kullanılan Koo-Kleinstreuer modeli göre, daha fazla bağlı olduğundan kanal boyunca sıcaklıkla beraber yükselen bir değişim gözlemlenmiştir. Ayrıca iki sınır koşulu arasındaki fark da yine bu yüzden artmıştır. Isı transferindeki değişimleri daha iyi incelemek için ortalama ısı transferindeki değişimler Çizelge 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.15 a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu için Chon modeli sonucu ısı transferindeki artış oranları.

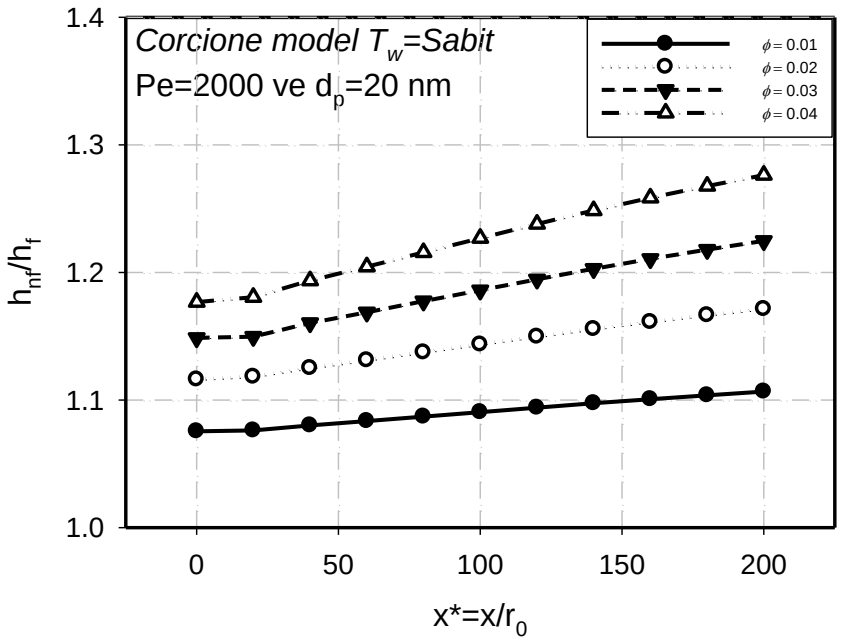


Şekil 4.15 b) Sabit duvar ısı akısı koşulu için Chon modeli sonucu ısı transferindeki artış oranları.

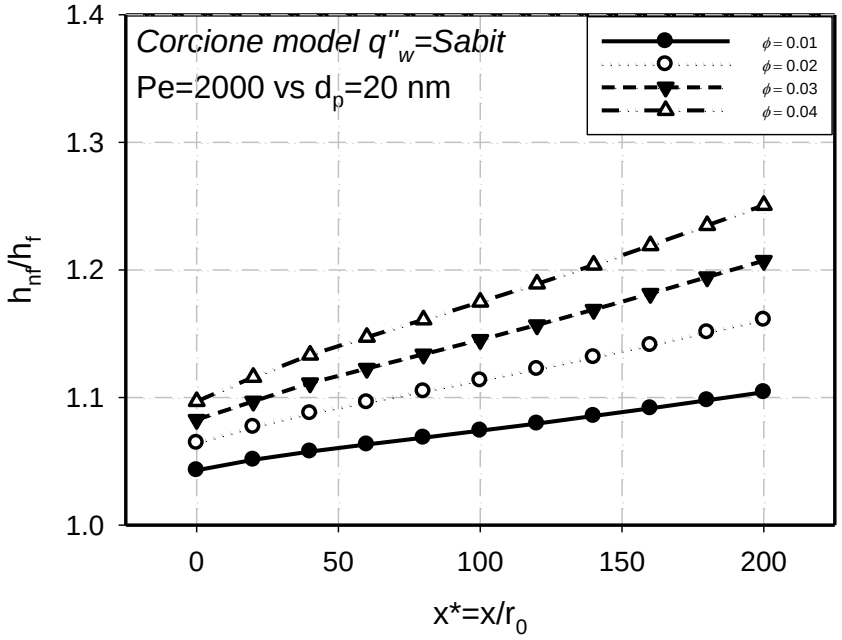
Çizelge 4.6. Chon vd modeli etkisiyle farklı sınır koşulları için ortalama ısı transferi katsayısı ve ısı transferindeki artışın hacimsel parçacık oranına göre değişimi.

Hacimsel Nanoparçacık Oranı ϕ	**Ortalama Isı Transferi Katsayısı h (W/m^2-K)**		**Isı Transferindeki Artış (%)**	
	SDS	**SIA**	**SDS**	**SIA**
0.00	586.798	944.386	---	---
0.01	630.093	992.459	8.098	6.786
0.02	657.971	1022.317	13.366	11.056
0.03	682.216	1047.442	18.056	14.484
0.04	704.842	1070.551	22.579	17.925

Şekil 4.16'da Corcione modeli ile iki farklı sınır koşulu için kanal boyunca ısı transferindeki artış incelenmiştir. Kanal boyunca artan sıcaklıkla ve hacimsel parçacık oranıyla daha önceki modellere benzer olarak ısı transferinde artış gözlemlenmiştir. Sıcaklık değerleri sabit duvar sıcaklığı koşulu için daha yüksek olduğundan ısı transferindeki değişim sabit duvar ısı akısı koşuluna göre daha yüksek bulunmuştur. Sınır koşullarından doğan farkı daha iyi anlamak için ortalama ısı transferi katsayıları ve ısı transferindeki artış oranları Çizelge 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.16 a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu için Corcione modeli sonucu ısı transferindeki artış oranları.

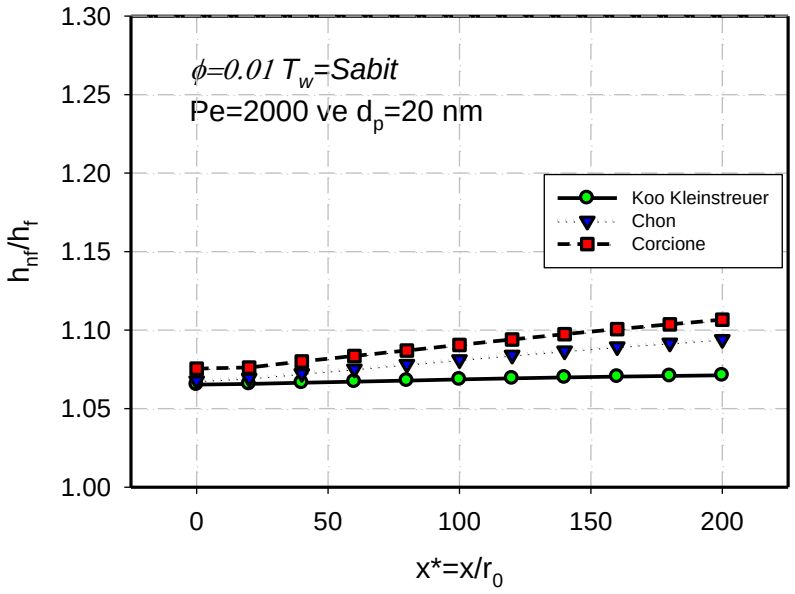


Şekil 4.16 b) Sabit duvar ısı akısı koşulu için Corcione modeli sonucu ısı transferindeki artış oranları.

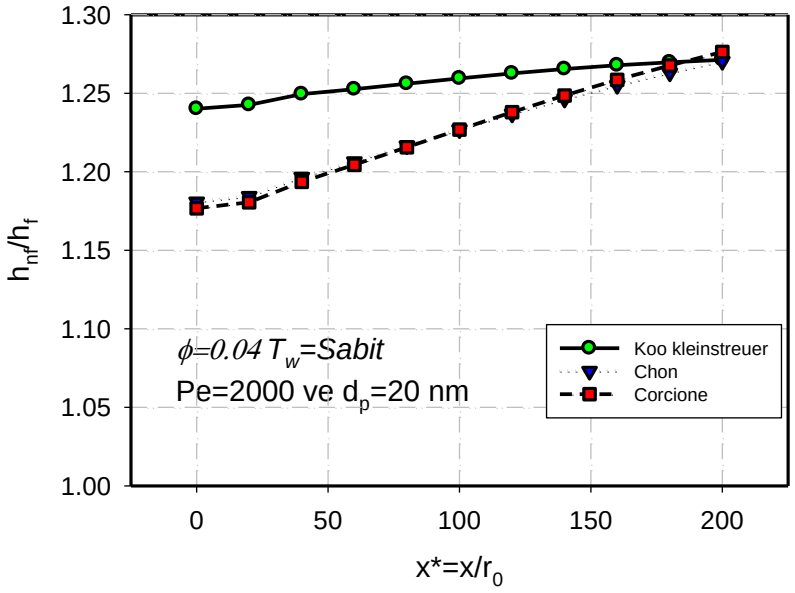
Çizelge 4.7. Corcione modeli etkisiyle farklı sınır koşulları için ortalama Isı transferi katsayısı ve ısı transferindeki artışın hacimsel parçacık oranına göre değişimi.

Hacimsel Nanoparçacık Oranı ϕ	**Ortalama Isı Transferi Katsayısı h (W/m^2-K)**		**Isı Transferindeki Artış (%)**	
	SDS	**SIA**	**SDS**	**SIA**
0.00	586.798	944.386	---	---
0.01	635.064	995.327	9.048	7.417
0.02	662.115	1021.624	14.323	11.368
0.03	683.787	1043.283	18.559	14.555
0.04	703.603	1061.946	22.610	17.516

İncelenen ısıl iletim katsayısı modelleri arasındaki farkı daha iyi gözlemlemek için Şekil 4.17'de farklı ısıl iletim katsayısı modelleri için ısı transferindeki artış sabit duvar sıcaklığı (SDS) koşulu için gösterilmiştir. Şekil 4.17'de görüldüğü üzere düşük parçacık hacimsel oranında Koo-Kleinstreuer modeli, Chon ve Corcione modellerine göre daha az artış değerleri vermektedir. Kanal boyunca akışın artan yığın sıcaklığıyla Chon ve Corcione modellerindeki artış belirgin bir şekilde yükselmektedir. Yüksek hacimsel parçacık oranında ise Koo-Kleinstreuer modeli kanal boyunca çok daha fazla artış değerleri sağlamaktadır ancak kanal sonunda Chon ve Corcione modellerindeki artışın sıcaklık etkisiyle yükselmesiyle bütün modeller birbirlerine yakın değerlere ulaşmışlardır. Koo-Kleinstreuer modeli içinde yer alan Hamilton Crosser modeli (k_{statik}) sadece hacimsel parçacık oranına bağlı olduğundan artan hacimsel oranla birlikte sıcaklığa bağlı olmaksızın daha yüksek ısı transferinde artış değerleri vermiştir. Brownian Hareketinin etkisi ($k_{dinamik}$) ise kanal boyunca artan sıcaklıkla diğer modellere nazaran az da olsa artış değerlerinde yükselme sağlamıştır. Genel olarak Chon ve Corcione modelleri sıcaklığa Koo-Kleinstreuer modelinden daha fazla bağlıdır ve birbirlerine oldukça yakın değerler vermektedirler.



Şekil 4.17 a) Farklı ısıl iletim katsayısı modelleri etkisi sonucu sabit duvar sıcaklığı (SDS) sınır koşul için %1 nanoparçacık hacimsel oranıyla kanal boyunca ısı transferindeki artıştaki değişim.

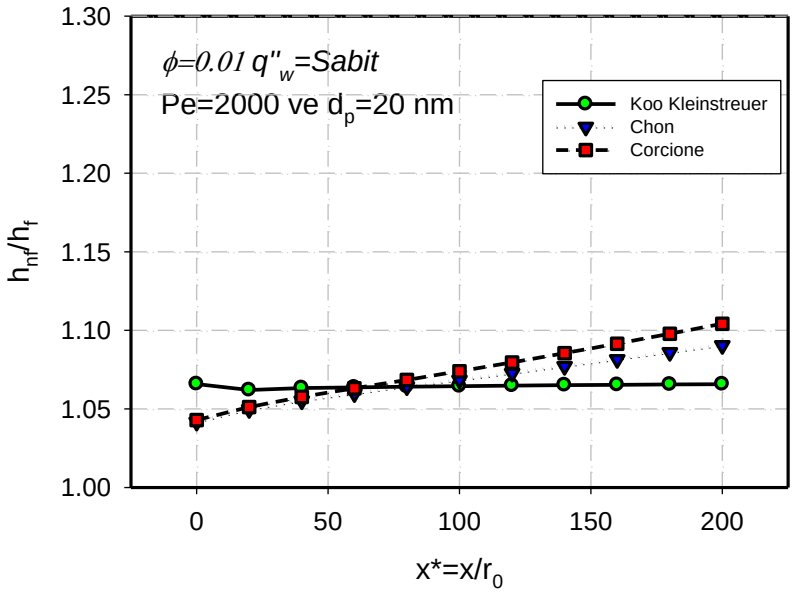


Şekil 4.17 b) Farklı ısıl iletim katsayısı modelleri etkisi sonucu sabit duvar sıcaklığı (SDS) sınır koşul için %4 nanoparçacık hacimsel oranıyla kanal boyunca ısı transferindeki artıştaki değişim.

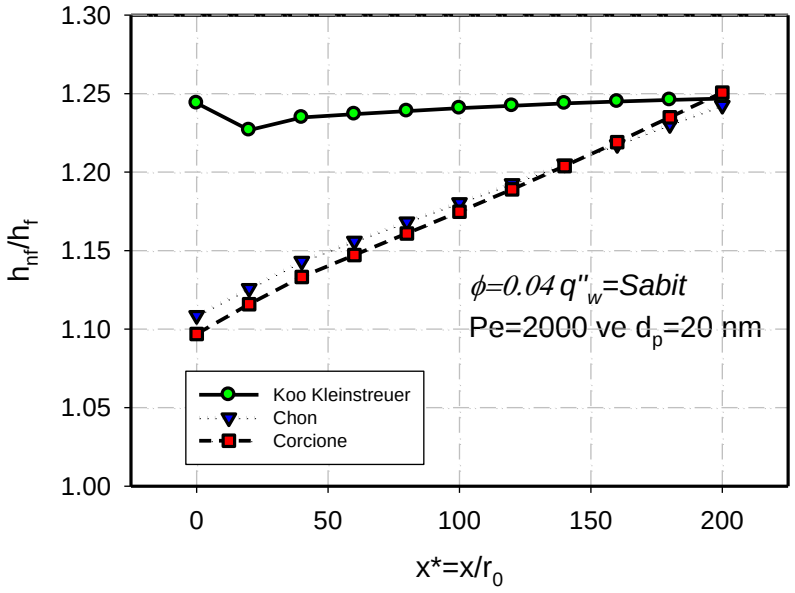
Şekil 4.18'de sabit duvar ısı akısı (SIA) koşulu için farklı ısıl iletim katsayıları için kanal boyunca ısı transferindeki artış gösterilmektedir. Şekil 4.17'ye benzer olarak hacimsel parçacık oranının artmasıyla Koo Kelinstreuer modeli diğer modellere göre daha yüksek değerler vermiştir. Sistemin sıcaklık değerleri sabit duvar sıcaklığı (SDS) koşuluna göre daha düşük olduğundan sıcaklığa oldukça bağlı olan Chon ve Corcione modellerindeki artış oranı sabit duvar ısı akısı (SIA) koşulu için biraz daha düşük değerler vermiştir. Sabit duvar ısı akısı (SIA) koşulunda kanal boyunca doğrusal olarak artan yığın sıcaklık değerlerinin Chon ve Corcione modellerinin davranışında önemli bir rol oynadığı söylenebilir. Chon ve Corcione modelleri arasında az da olsa fark gözlemlenmektedir. Bu farkın sebebi, birçok deneysel veriden türetilen Corcione modelinin bu çalışmada kullandığımız Al_2O_3 nanoparçacıkları haricinde başka nanopaçacık çeşitleri sonuçlarına da dayanmasıdır.

Corcione modelinin aksine Chon modeli ise sadece Al_2O_3 nanoparçacıklarının deneysel verilerinden türetildiği için bu durum iki model arasında az da olsa fark yaratmaktadır. Şekil 4.18'den yola çıkarak Chon ve Corcione modellerinin eğimlerine bakılacak olursa Corcione modelinde sıcaklık Chon modeline ise hacimsel parçacık oranın biraz daha ön planda olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.8'de farklı ısı iletim katsayısı modelleri için ısı transferindeki artış oranları gösterilmiştir.



Şekil 4.18 a) Farklı ısıl iletim katsayısı modelleri etkisi sonucu sabit duvar ısı akısı (SIA) sınır koşul için %1 nanoparçacık hacimsel oranıyla kanal boyunca ısı transferindeki artıştaki değişim.

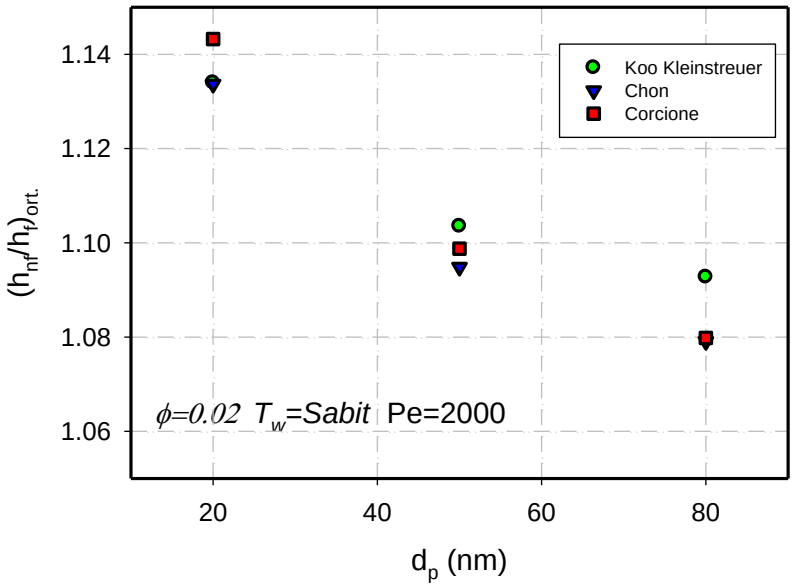


Şekil 4.18 b) Farklı ısıl iletim katsayısı modelleri etkisi sonucu sabit duvar ısı akısı (SIA) sınır koşul için %4 nanoparçacık hacimsel oranıyla kanal boyunca ısı transferindeki artıştaki değişim.

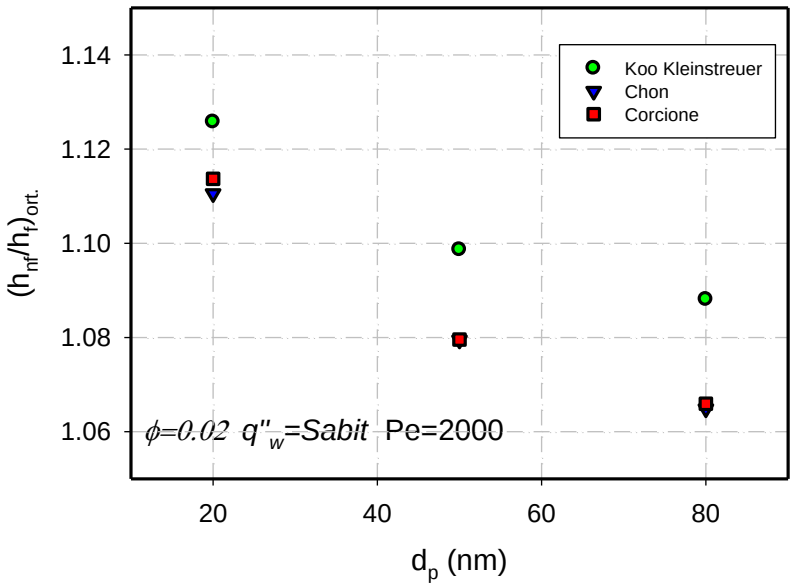
Çizelge 4.8 Farklı ısıl iletim modellerinin ısı transferindeki etkileri.

Hacimsel Oran ϕ	**Koo-Kleinstreuer Isı Transferindeki Artış (%)**		**Chon modeli Isı Transferindeki Artış (%)**		**Corcione modeli Isı Transferindeki Artış (%)**	
	SDS	**SIA**	**SDS**	**SIA**	**SDS**	**SIA**
0.01	6.845	6.456	8.098	6.786	9.048	7.417
0.02	13.399	12.576	13.366	11.056	14.323	11.368
0.03	19.677	18.433	18.056	14.484	18.559	14.555
0.04	25.796	24.056	22.579	17.925	22.610	17.516

Şekil 4.19'da ise nanoparçacık boyutunun farklı ısıl iletim modelleriyle ortalama ısı transferindeki artışa etkisi iki sınır koşulu için de gösterilmektedir. Şekil 4.19'da artan parçacık boyutu ile bütün ısıl iletim katsayısı modelleri için ısı transferindeki artış oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Chon ve Corcione modelleri sonuçları birbirlerine benzer olmakla beraber artan parçacık boyutu ile neredeyse aynı ölçüde azalan bir davranış izlemişlerdir. Koo-Kleinstreuer modeli ile ısı transferindeki artış oranı bu modellerden farklı olarak parçacık boyutunun artmasıyla daha yavaş bir şekilde azalmıştır. Statik ve dinamik ısıl iletim katsayısı modellerinin bileşimi olan bu modele nanoparçacık boyutunun (ve sıcaklığın) etkisi sadece dinamik ısıl iletim katsayısı (Brownian Hareketi) kısmında eklenebilmektedir. Bu yüzden beklenildiği üzere bu model Chon ve Corcione modellerine göre sıcaklıkla daha yavaş bir davranış sergilemiştir. Sınır koşulları arasındaki farklar sabit duvar ısı akısı koşulundaki yığın sıcaklıkların sabit duvar sıcaklığı koşulundan düşük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.19 a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu (SDS) ile farklı parçacık boyutları için ısı transferindeki artış oranları.



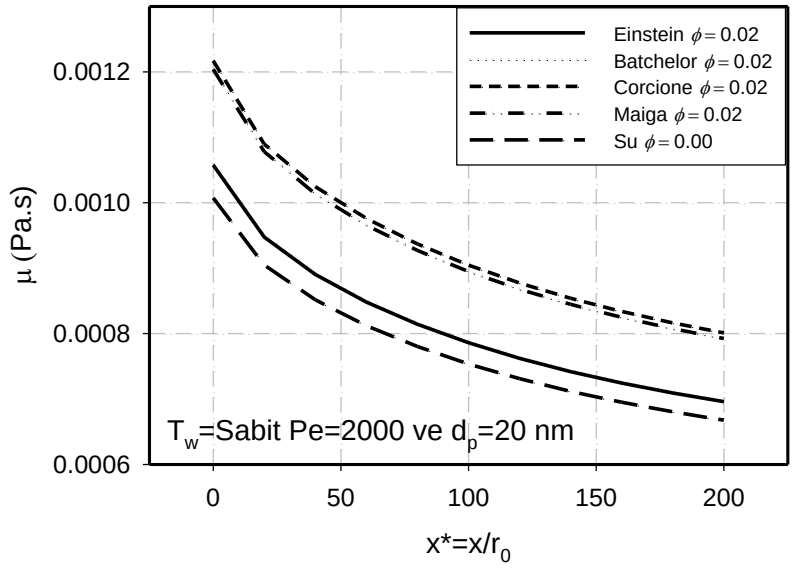
Şekil 4.19 b) Sabit duvar ısı akısı koşulu (SIA) ile farklı parçacık boyutları için ısı transferindeki artış oranları.

4.3.2. Viskozite Modelleri

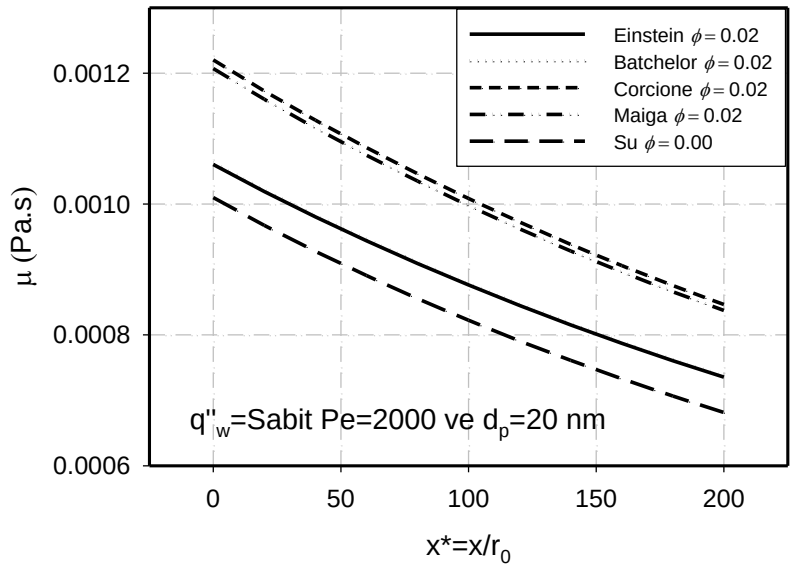
Nanoakışkanlarla akış analizlerinde ısıl iletim katsayısı kadar önemli bir rol oynayan viskozite için literatürdeki farklı modeller ile analizler yapılmıştır. Saf su için artan sıcaklıkla viskozitenin önemli ölçüde düştüğü literatürdeki daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Suya eklenen nanoparçacıklar ise akışkanın viskozitesini eklendikleri hacimsel orana bağlı olarak arttırmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde viskozite modellerinin etkisi daha iyi görmek için sadece Koo-Kleinstreuer ısıl iletim katsayısı modeli kullanılmıştır.

Farklı viskozite modellerinin kanal boyunca değişimleri her iki sınır koşulu için de Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Teorik modeller olan Einstein ve Batchelor modelleri ve deneysel modellerden Maiga ve Corcione modelleri birbirleriyle neredeyse aynı değerleri vermektedir. Deneysel modeller teorik modellere oranla daha fazla viskoziteye sebep olmaktadır. Sıcaklığa bağlı olan viskozite bütün modeller için aynı etkide kanal boyunca düşüşe yol açmaktadır. Sabit duvar sıcaklığı (SDS) ve sabit duvar ısı akısı (SIA) koşulları arasındaki fark bu koşullar için kanal boyunca yığın sıcaklık değerlerinin farklı olmasındandır. Sabit duvar ısı akısı (SIA) koşulu için doğrusal olarak artan sıcaklık değerleri, viskozitede doğrusal bir şekilde azalmaya; sabit duvar sıcaklığı (SDS) koşulunda yavaş bir şekilde artan sıcaklık yine viskozite değerlerinde tersi olacak şekilde yavaş bir şekilde azalmaya yol açmıştır.

Modeller arasındaki farkı daha iyi gözlemlemek için sistemin ortalama viskoziteleri Çizelge 4.9'da gösterilmiştir. Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi sabit duvar ısı akısı (SIA) koşulu için viskozite değerleri sabit duvar sıcaklığı (SDS) koşulundan daha yüksek değerler vermektedir. Bunun sebebi sıcaklık değerlerinin sabit duvar ısı akısı koşulu için daha düşük olmasıdır.



Şekil 4.20 a) Sabit duvar sıcaklığı koşulu (SDS) ile farklı viskozite modellerinin kanal boyunca değişimleri.



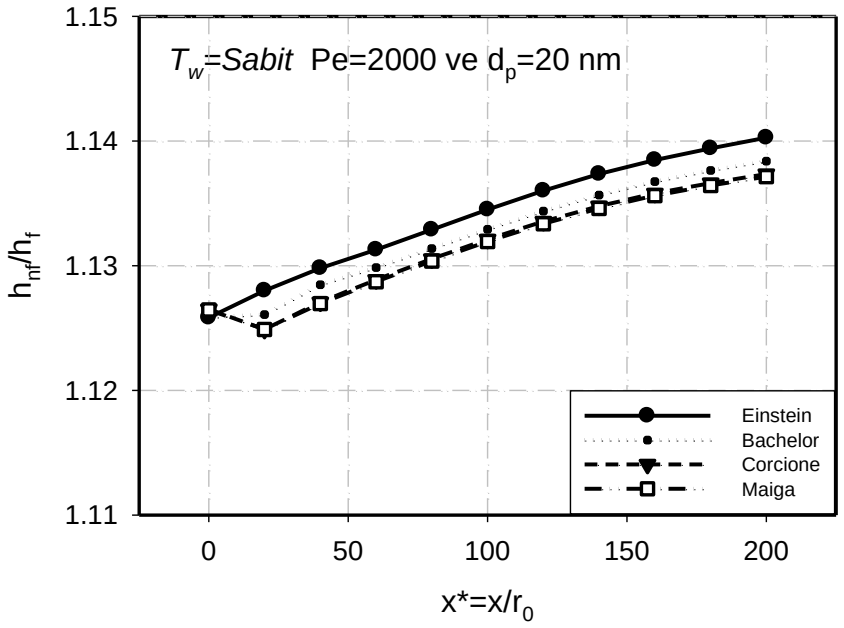
Şekil 4.20 b) Sabit duvar ısı akısı koşulu (SIA) ile farklı viskozite modellerinin kanal boyunca değişimleri.

Çizelge 4.9 Farklı modeller için ortalama viskozite değerleri, ϕ =0.02.

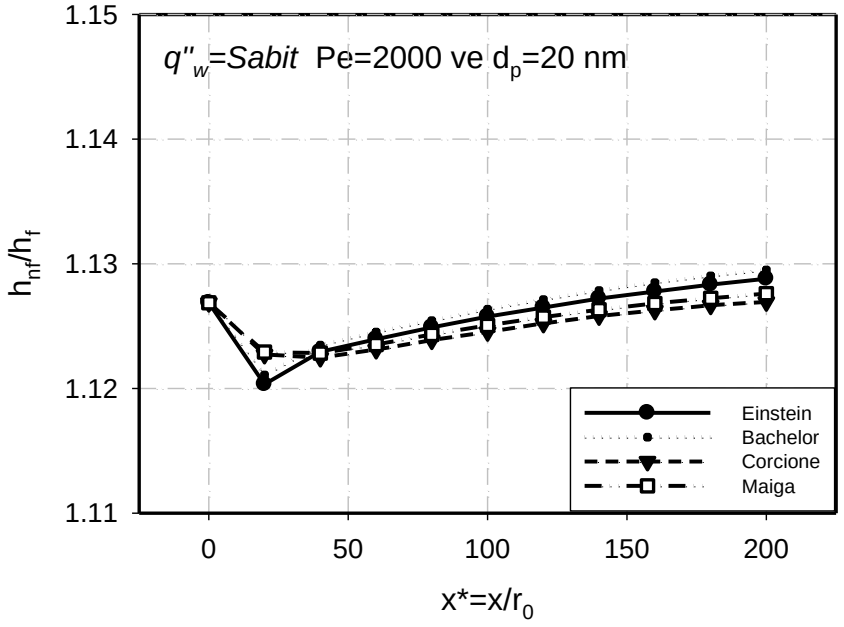
	μ_{ave} (Pa.s)				
	Einstein Modeli	**Batchelor Modeli**	**Corcione Modeli**	**Maiga Modeli**	**Saf Su ϕ =0.00**
SDS	0.000816	0.000818	0.000939	0.000929	0.000781
SIA	0.000885	0.000887	0.001018	0.001007	0.000831

Farklı viskozite modelleriyle kanal boyunca ısı transferindeki artıştaki değişim Şekil 4.21'de gösterilmektedir. Şekil 21'de her iki sınır koşulu için farklı viskozite modellerinin Koo-Kleinstreuer ısıl iletkenlik katsayısı modeli ile kanal boyunca ısı transferindeki artış değişimleri gösterilmiştir. Genel hesaplamalarda kullandığımız Einstein viskozite modeli Şekil 4.20'den de anlaşılacağı üzere Batchelor modeli ile birlikte en düşük viskozite değerlerini vermektedir. Bu sebeple, ısı transferindeki artış oranları deneysel modeller olan Corcione ve Maiga viskozite modelleri sonuçlarından daha yüksek değerler vermektedir.

Viskozite etkisini daha iyi görmek için ortalama ısı transferindeki artış değerleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir. Farklı viskozite modelleri ile elde edilen sonuçlarda görüldüğü gibi, Einstein ve Batchelor gibi düşük değer veren viskozite modelleri diğer modellere göre biraz daha yüksek ısı transferi değerleri vermektedir. Fakat farklı viskozite modellerinden kaynaklanan ısı transferindeki artış değerleri, ısıl iletim katsayısı modellerinden oluşan ısı transferindeki artış oranlarına göre çok düşük farklılıklar göstermektedir.



Şekil 4.21 a) Sabit duvar sıcaklığı koşulunda (SDS) farklı viskozite modelleri ile kanal boyunca ısı transferindeki artış dağılımları.



Şekil 4.21 b) Sabit duvar ısı akısı koşulunda (SIA) farklı viskozite modelleri ile kanal boyunca ısı transferindeki artış dağılımları.

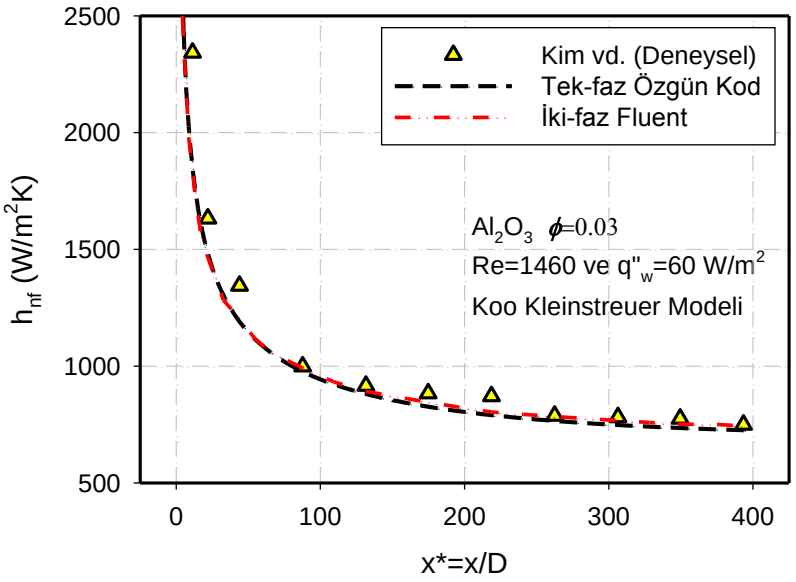
Çizelge 4.10 Farklı viskozite modelleri ile ısı transferindeki artış, ϕ =0.02.

	Isı Transferindeki Artış (%)			
	Einstein Modeli	**Batchelor Modeli**	**Corcione Modeli**	**Maiga Modeli**
SDS	13.399	13.249	13.165	13.150
SIA	12.576	12.634	12.495	12.539

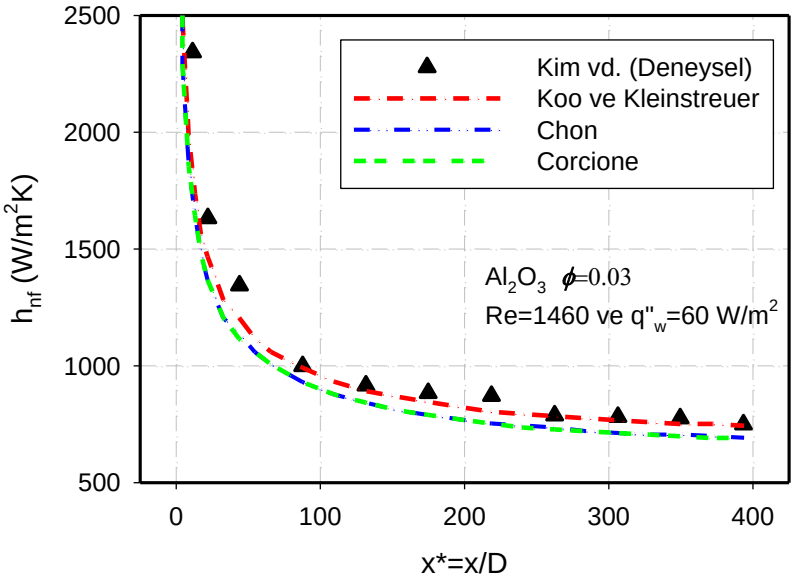
4.4. Karşılaştırmalar

Tez çalışmasının bu kısmında, Kim vd.'nin [33] yaptığı deneysel çalışma sonuçları ilk olarak Koo-Kleinstreuer ısıl iletim katsayısı modeli kullanılarak elde edilen tek-fazlı akış özgün kod ve iki-fazlı akış karışım modeli sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasının 4.3 bölümünde iki fazlı karışım modeli kullanılarak farklı ısıl iletim katsayısı modelleriyle elde edilen sonuçlar hem birbirleriyle hem de yine Kim vd.'nin ortaya koyduğu deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve ısıl iletim katsayısı modellerinin deneysel sonuçlarla tutarlılığı gözlemlenmiştir. Son olarak Koo-Kleinstreuer ısıl iletim katsayı modeli kullanılarak Fluent yazılımı ile tek-fazlı akış ve iki-fazlı akış karışım modeli sonuçları birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Şekil 4.22'de Kim vd.'nin [33] deneysel sonuçları, tek-fazlı akış özgün kod ve iki-fazlı akış karışım modeliyle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ve sayısal analiz sonuçları birbirleriyle çok yakın olmakla beraber iki-fazlı akış karışım modeli sonuçlarının tek-fazlı akış özgün kod sonuçlarına göre biraz daha yüksek ve deneysel sonuçlara daha yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir. İki-fazlı akış karışım modeli analizlerinde süreklilik, momentum, enerji denklemleri ve fazlar arası kayma hızları hesaba katılırken; tek-fazlı akış özgün kod analizlerinde sadece enerji denklemi çözülmüş ve kayma hızları ihmal edilmiştir.



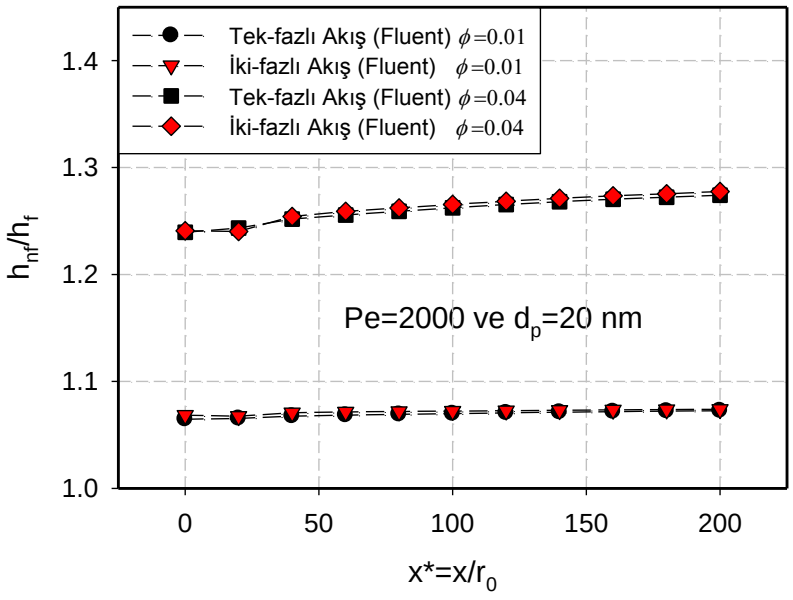
Şekil 4.22 Deneysel ısı transferi katsayısı sonuçlarının Koo-Kleinstreuer ısıl iletim katsayısı modeli kullanılarak tek-fazlı akış özgün kod ve iki-fazlı akış karışım modeliyle karşılaştırılması.



Şekil 4.23 Deneysel ısı transferi katsayısı sonuçlarının farklı ısıl iletim katsayısı modelleri kullanılarak iki-fazlı akış karışım modeliyle karşılaştırılması.

Şekil 4.23'de Kim vd.'nin [33] deneysel sonuçları farklı ısıl iletim katsayısı modelleri kullanılarak elde edilen iki-fazlı akış karışım modeli sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Deneysel veriler sonucu oluşturulan Chon ve Corcione modelleriyle elde edilen sonuçlar Koo-Kleinstreuer modeli ve Kim vd.'nin [33] deneysel sonuçlarına göre düşük değerler vermiştir.

Son olarak Fluent yazılımıyla tek-fazlı akış ve iki fazlı akış karışım modeli ile Koo-Kleinstreuer ısıl iletim katsayısı modeli kullanılarak elde edilen ısı transferindeki artış Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Tek-fazlı özgün kod hesaplamalarından farklı olarak Fluent yazılımıyla elde edilen tek-fazlı akış modeli analizlerinde süreklilik, momentum denklemleri de hesaba katılmıştır. elde edilen sonuçlar birbirleriyle çok yakın olmasına rağmen iki-fazlı akış modeliyle hesaplanan değerler tek-fazlı akış modeline göre biraz daha yüksektir. Sonuçların birbirine bu kadar yakın çıkmasının sebebi fazlar arası kayma hızlarının nanometre mertebelerinde çok küçük çıkmasıdır.



Şekil 4.24 Fluent tek-fazlı akış ve Fluent iki-fazlı akış karışım modeli karşılaştırması.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında nanoakışkanlarla silindirik kanal içindeki zorlanmış ısı transferinin sayısal analizi tek-fazlı akış ve iki-fazlı akış karışım modeli kullanılarak iki farklı yaklaşımla yapılmıştır.

Tek-fazlı akış modeliyle yapılan analizlerde; ani duvar sıcaklığı ve ısı akısı değişimi koşulu altındaki hidro-dinamik olarak tam gelişmiş laminer akış sayısal olarak zamana bağlı ve daimi rejimde incelenmiştir. Hesaplamalarda Koo-Kleinstreuer modeli ısıl iletim katsayısı modeli kullanılmış ayrıca suyun sıcaklığa bağlı viskozite ve ısıl iletim katsayısı gibi önemli fiziksel özellikleri de modellenmiştir.

Nanoparçacık hacimsel oranın zamana bağlı ısı transferine etkisi her iki sınır koşulu için de incelenmiş, ortalama ısı transferi katsayısı ve buna bağlı olarak ortalama Nusselt sayısı değişimlerinin nanoparçacık hacimsel oranıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Duvar ısı akısındaki ani değişim koşulu (DIAD) altında elde edilen ortalama ısı transferi ve Nusselt sayısı değerleri duvar sıcaklığındaki ani değişim koşuluna (DSAD) göre daha yüksek değerler vermiş olmasına rağmen ısı transferindeki artış oranları neredeyse aynıdır. Akış duvar sıcaklığındaki ani değişim koşulu (DSAD) için 0.31 boyutsuz zaman adımında, duvar ısı akındaki ani değişim koşulu (DIAD) için ise 0.59 boyutsuz zaman adımında daimi rejime ulaşmıştır. Hacimsel parçacık oranındaki değişimin, sistemin daimi rejime gelmesi için gereken boyutsuz zaman adımına etkisi gözlemlenmemiş olmasına rağmen; artan parçacık oranıyla birlikte yükselen ısıl yayınım katsayısına bağlı olarak boyutlu zaman değerlerinde çok düşük bir azalma tespit edilmiştir. Sistemin daimi rejime ulaşmasında geçen sürenin sistemin geometrisine, Peclet sayısına ve sınır koşuluna bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Kullanılan geometri, Peclet sayısı ve sınır koşulları için sistemin zamana bağlı ısı transferi davranışındaki değişimin çok kısa bir zaman aralığı için anlamlı olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan analizler sonucu ısı transferinin hacimsel parçacık oranındaki artışla yükseldiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi hacimsel parçacık oranına bağlı olan ısıl iletim katsayısındaki artışın ısı transferine etkisidir. Öte yandan nanoparçacık

boyutundaki artışın ısı transferindeki artışı kötü yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Artan parçacık boyutuyla beraber nanoparçacıkların hareket kabiliyetleri azalmış, buna bağlı olarak Brownian Hareketi sonucu oluşan ısı transferine katkı da azalmıştır. Farklı Peclet sayıları için yapılan analizlerde hidro-dinamik olarak tam gelişmiş akış için değişen Peclet sayısıyla gerek suyun gerekse nanoakışın ısı transferi katsayılarındaki artışın oranı aynı olduğundan ısı transferindeki artışta belirli bir değişim gözlenmemiştir.

İki-fazlı akış karışım modeli analizlerinde; nanoakışkanlar ile silindirik kanal içinde hidro-dinamik olarak tam gelişmiş laminer akış için zorlanmış taşınım sonucu oluşan ısı transferi analizleri sabit duvar sıcaklığı ve sabit duvar ısı akısı koşulları altında Fluent HAD yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Nanoakışkanlarla ısı transferinde çok önemli etkenler olan ısıl iletim katsayısı ve viskozite gibi termo-fiziksel özellikler daha önce literatürde belirtilen deneysel ve teorik modeller ile tanımlanmıştır. Bu çalışmada farklı ısıl iletim katsayısı ve viskozite modelleri ile elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Sabit duvar sıcaklığı koşulu (SDS) ile elde edilen ısı transferindeki artış oranları sabit duvar ısı akısı koşuluna (SIA) göre bütün ısı iletim katsayısı modelleri için daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi sabit duvar sıcaklığı koşulundaki (SDS) yığın sıcaklık değerlerinin sabit duvar ısı akısı koşuluna (SIA) göre daha yüksek olmasıdır, bilindiği gibi bu çalışmada kullanılan bütün ısıl iletim katsayısı modelleri sıcaklığa bağlıdır. Çizelgelerde de gösterilen sınır koşulları nedeniyle artış oranları arasında oluşan bu fark ısıl iletim katsayı modelinin sıcaklığa ne kadar bağlı olduğuyla doğru orantılıdır.

Deneysel ısıl iletim katsayısı modelleri olan Corcione ve Chon modellerinin sonuçları birbirleriyle oldukça benzerdir. Ayrıca ısı transferinde elde edilen artışlar teorik bir model olan Koo-Kleinstreuer ısıl iletim katsayısı modeline göre yüksek hacimsel parçacık oranlarında daha az, düşük hacimsel parçacık oranlarında ise daha fazla hesaplanmıştır.

Kullanılan ısıl iletim katsayısı modelleri hacimsel parçacık oranı, parçacık boyutu ve sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır. Bu modellerin birbirinden farkları bu faktörlerin

hangilerinin baskın olduğudur. Örneğin yukarıda bahsedildiği gibi Corcione ve Chon modelleri Koo-Kleinstreuer modeline göre sıcaklıkla daha fazla değişmektedir. Fakat hacimsel parçacık oranındaki değişimler göz önüne alındığında Koo-Kleinstreuer modeli ısı transferindeki artış bakımından daha baskın hale gelmektedir.

Parçacık boyutunun ısı transferine etkisi incelendiğinde Corcione ve Chon deneysel modellerinin genellikle Koo-Kleinstreuer modeline göre daha düşük değerler verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca değişen parçacık boyutuyla birlikte yine Corcione ve Chon deneysel modelleri Koo-Kleinstreuer modeline göre daha hızlı bir değişim göstermektedir. Isıl iletim katsayısı modellerinin denklemelerinden de anlaşılacağı üzere parçacık boyutunun değişimi Chon ve Corcione modellerini daha fazla etkilemektedir.

Çalışmanın bir diğer kısmında değişik viskozite modelleri iki farklı sınır koşulu için de denenmiştir. Einstein ve Batchelor gibi teorik viskozite modelleri kanal boyunca nanokışkanın viskozitesini Corcione ve Maiga deneysel modelleri kadar arttırmamıştır. Ayrıca Einstein ve Batchelor modelleriyle yapılan ısı transferi hesaplamaları Corcione ve Maiga modellerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Viskozite modelleri sonuçları her ne kadar birbirlerinden farklı çıksa da yine de ısı transferindeki artış göz önüne alındığında ısıl iletim katsayısı modelleri kadar etkili olmadıkları sonucuna varılmıştır.

Sayısal analizle elde edilen sonuçlar deneysel verilerle kıyaslanmış, genel olarak hem tek-fazlı hem de iki-fazlı akış modelleriyle de tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Isı transferindeki artışlar iki-fazlı akış modeli ile tek-fazlı akış modeline göre biraz daha yüksek çıkmıştır. Farklı ısıl iletim katsayıları modelleri incelendiğinde ise Koo-Kleinstreuer modelinin deneysel sonuçlara daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tek-fazlı ve iki-fazlı akış modelleri sonuçlarının birbirleriyle çok benzer olduğu anlaşılmıştır. Bunun sebebi tek-fazlı ve iki-fazlı akış modelleri arasındaki en büyük fark olan kayma hızlarının nanoakışkanlar için iki-fazlı akış karışım modeliyle yapılan hesaplamalarda çok düşük değerler vermesidir. Literatürdeki deneysel veri eksikliği yüzünden sonuçlar kısıtlı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

5.1. Gelecek Çalışmalar

Bu tez çalışmasının devamı olarak, elde edilen sonuçlar doğrultusunda, sayısal analizlerin iki-fazlı akış modeli yaklaşımlarıyla hesaplanmasının gerçek değerlere daha uygun sonuçlar vereceği anlaşılmıştır. Literatürde gerek deneysel çalışmaların birbirleriyle tutarsızlığı gerekse kullanılan sayısal yaklaşımların farklılığı nedeniyle hala kesin bir modelleme şekli belirlenememiştir. Her ne kadar farklı ısıl iletim katsayısı modelleri kullanılsa da nanoparçacıkların akışkan içindeki hareketlerinin tam olarak modellenmesi açısından çeşitli eksiklikler bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında Fluent yazılımıyla iki-fazlı akış karışım modeli kullanılmış, fazlar arasındaki kayma hızları nanometre mertebelerinde çok düşük değerler verdiği için tek-fazlı akış modeline göre fazla bir fark gözlemlenememiştir. İleriki çalışmalarda termoforez ve Brownian difüzyonu gibi çok önemli etkileri de hesaba katan Ayrık-Faz yaklaşımının kullanılmasının parçacıkların akışkan içindeki hareketlerinin daha iyi modellenmesi bakımından faydalı olacağı anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., Hishinuma, N., Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of γ-Al_2O_3, SiO_2, and TiO_2 Ultra-Fine Particles), Netsu Bussei, 4, 227-233, 1993.

[2] Choi, S.U.S., Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED, 231, 99-105, 1995.

[3] Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman J.A., Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles, J. Heat Transfer, 121, 280-9, 1999.

[4] Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., Thompson L.J., Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles, Appl. Phys. Lett., 78, 718-20, 2001.

[5] Das, S.K., Putra N., Thiesen, P., Roetzel, W., Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids, J. Heat Transfer, 125, 567-74, 2003.

[6] Koo, J., Kleinstreuer, C., A New Thermal Conductivity Model for Nanofluids, J. Nanopart. Res., 6, 577–88, 2004.

[7] Hamilton, R.L., Crosser, O.K., Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems, Ind. Eng. Chem. Fund., 1, 187-91, 1962.

[8] Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P., Choi, S.U.S., Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al_2O_3) Thermal Conductivity Enhancement, Appl. Phys. Lett., 87, 153107-3, 2005.

[9] Jang, S.P., and Choi, S.U.S.: Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids. Appl. Phys. Lett. 84, 4316–4318, *2004*.

[10] Corcione, M., Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, Energy Conversion and Management, 52, pp. 789–793, 2011.

[11] Keblinski, P., Prasher, R., Eapen J., Thermal Conductance of Nanofluids: Is the Controversy Over?, J. Nanopart. Res., 10, 1089-97, 2008.

[12] Özerinç, S., Kakaç, S., Yazıcıoğlu, A., Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A State-of-the-Art Review, Microfluidics and Nanofluidics 8: 145-170, 2010.

[13] Buongiorno, J., Convective Transport in Nanofluids, J. Heat Transfer, 128, 240-50, 2006.

[14] Xuan, Y., Roetzel, W., Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids, Int. J. Heat Mass Tran., 43, 3701-7, 2000.

[15] Ding, Y., Wen, D., Particle Migration in a Flow of Nanoparticle Suspensions, Powder Technol., 149, 84-92, 2005.

[16] Einstein, A., Investigation on the Theory of Brownian Motion, Dover New York, 1-18, 1956.

[17] Brinkman, H.C., A Calculation of the Viszous Force Exerted by a Flowing Fluid on a Dense Swarm of Particles, Appl. Sci. Res., Vol A1, 1947.

[18] Batchelor, G. K., The effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspensions of Spherical Particles, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 83, 97-117, 1977.

[19] Masoumi, N., Sohrabi, N., Bezhadmehr, A., A New Model for Calculating The Effective Viscosity of Nanofluids, Journal of Physics D: Applied Physics, 42, 055501 (6), 2009.

[20] Nguyen, C., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Maré, T., Boucher, S., Mintsa, H.A., Temperature and Particle-Size Dependent Viscosity Data for Water-Based Nanofluids - Hysteresis Phenomenon, Int. J. Heat Fluid Fl., 28, 1492-506, 2007.

[21] Maïga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N., Roy, G., Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a Uniformly Heated Tube, Superlattice. Microst., 35, 543-57, 2004.

[22] Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A., Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles, J. Heat Transfer 121, 208-289, 1999.

[23] Wang, X., Xu, X., Choi, S.U.S, Thermal Conductivity of Nanoparticles-Fluid mixture, J. Thermophys. Heat Transfer 13 (4), 474-480, 1999.

[24] Pak, B.C., Cho, Y.I., Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles, Exp. Heat Transfer, 11, 151, 1998.

[25] Li, Q., Xuan, Y., Convective Heat Transfer and Flow Characteristics of Cu-Water Nanofluid, Sci. China Ser. E, 45, 408-16, 2002.

[26] Chen, H., Yang, W., He, Y., Ding, Y., Zhang, L., Tan, C., Lapkin, A.A., Bavykin, D.V., Heat Transfer and Flow Behaviour of Aqueous Suspensions of Titanate Nanotubes (Nanofluids), Powder Technol., 183, 63-72, 2008.

[27] Kulkarni, D.P., Namburu, P.K., Ed Bargar, H., Das, D.K., Convective Heat Transfer and Fluid Dynamic Characteristics of SiO_2 Ethylene Glycol/Water Nanofluid, Heat Transfer Eng., 29, 1027, 2008.

[28] Wen, D., Ding, Y., Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region under Laminar Flow Conditions, Int. J. Heat Mass Tran., 47, 5181-8, 2004.

[29] Anoop, K., Sundararajan, T., Das, S.K., Effect of Particle Size on the Convective Heat Transfer in Nanofluid in the Developing Region, Int. J. Heat Mass Tran., 52, 2189-95, 2009.

[30] Hwang, K.S., Jang, S.P., Choi, S.U.S., Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Water-Based Al_2O_3 Nanofluids in Fully Developed Laminar Flow Regime, Int. J. Heat Mass Tran., 52, 193-9, 2009.

[31] Heris, S.Z., Esfahany, M.N., Etemad, G., Numerical Investigation of Nanofluid Laminar Convective Heat Transfer through a Circular Tube, Numer. Heat Tr. A-Appl., 52, 1043, 2007.

[32] Heris S.Z., Etemad S., Esfahany M.N., Experimental Investigation of Oxide Nanofluids Laminar Flow Convective Heat Transfer, Int. Commun. Heat Mass, 33, 529-35, 2006.

[33] Kim, D., Kwon, Y., Cho, Y., Li, C., Cheong, S., Hwang, Y., Lee, J., Hong, D., Moon, S., Convective Heat Transfer Characteristics Of Nanofluids Under Laminar And Turbulent Flow Conditions, Current Applied Physics, Vol. 9(2), e119–e123, 2009.

[34] Maïga, S.E.B., Paml, S.P., Nguyen, C.T., Galanis, N., Roy, G., Heat Transfer Enhancement by Using Nanofluids in Forced Convection Flows, Int. J. of Heat and Fluid Flow, 26, 530-546, 2005.

[35] Heris, S.Z., Esfahany, M.N., Etemad, S., Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Al_2O_3/Water Nanofluid in Circular Tube, Int. J. Heat Fluid Fl., 28, 203-10, 2007.

[36] Mirmasoumi, S., Behzadmehr, A., Numerical Study of Laminar Mixed Convection of a Nanofluid in a Horizontal Tube Using Two-Phase Mixture Model, International Journal of Heat and Fluid Flow, 29, 557-566, 2008.

[37] Bianco, V., Chiacchio, F., Manca, S., Nardini, S., Numerical Investigation of Nanofluids Forced Convection in Circular Tubes, Applied Thermal Engineering, 29, 3636-3642, 2009.

[38] Lotfi, R., Saboohi, Y., Rashidi, A.M., Numerical Study of Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids: Comparison of Different Approaches, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 74-78, 2010.

[39] Fard, M.H., Esfahany, M.N., Talaie, M.R., Numerical study of Convective Heat Transfer of Nanofluids in a Circular Tube Two-Phase Model Versus Single-Phase Model, International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 91-97, 2010.

[40] Akbari, M., Galanis, N., Behzamehr, A., Comparative Analysis of Single and Two-Phase Models for CFD Studies of Nanofluid Heat Transfer, International Journal of Thermal Sciences, 50, 1343-1354, 2011.

[41] Kondaraju, S., Lee, J.S., Two-Phase Numerical Model for Thermal Conductivity and Convective Heat Transfer in Nanofluids, Nanoscale Research Letters, 6, 239, 2011.

[42] Akbarinia, A., Laur, R., Investigating The Diameter of Solid Particles Effects on a Laminar Nanofluid Flow in a Curved Tube Using a Two Phase Approach, International Journal of Heat and Fluid Flow, 30, 706-714, 2009.

[43] Fluent Kullanım Kılavuzu.

[44] "webbook.nist.gov.", Erişim tarihi: 25 Mart 2011.

[45] Kakaç, S. and Yener, Y., Convective Heat Transfer, 2. Baskı, CRC Press, New York, 1995.

[46] Kakaç, S., Transient Forced Convection Heat Transfer in a Channel, Wärme und Stoffübertragung Bd. 1, 169-176, 1968.

[47] Manninen, M., Taivassalo, V., Kallio, S., On The Mixture Model for Multiphase Flow, VTT Publications 288, Technical Research Centre of Finland, 1996.

[48] Chen, S.C., Anand, N.K., and Tree, D.R., Analysis of Transient Laminar Convective Heat Transfer Inside a Circular Duct, J. Heat Transfer Vol. 105, pp 1661-1667, 1983.

EK-A CFL VE VON NEUMANN SAYISI KARARLILIK ANALİZLERİ

Tek-fazlı zamana bağlı akış analizlerinde kullanılan enerji denklemi Eşitlik (15) ile gösterilmiştir.

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{A.1}$$

Eşitlik ısıl iletim katsayısı sabit alınarak aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)=\frac{k}{\rho c}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{A.2}$$

r-yönündeki türev daha açık bir şekilde yazılırsa;

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)=\frac{k}{\rho c}\frac{1}{r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)\right) \tag{A.3}$$

Zamana göre ileri, *x*-eksenine göre geri ve *r*-eksenine göre merkezi farklar yöntemi kullanılarak ayrıklaştırma yapıldığında;

$$\begin{aligned}&\frac{T_{i,j}^{m+1}-T_{i,j}^{m}}{\Delta t^{*}}+u_x\frac{3T_{i,j}^{m}-4T_{i-1,j}^{m}+T_{i-2,j}^{m}}{2\Delta x^{*}}=\\&\alpha\frac{1}{r}\left(\frac{r_{+}(T_{i,j+1}^{m}-T_{i,j}^{m})-r_{-}(T_{i,j}^{m}-T_{i,j-1}^{m})}{\Delta r^{2}}\right)\end{aligned} \tag{A.4}$$

Sıcaklık *T*, aşağıda Eşitlik (A.5)'deki gibi tanımlanıp, Eşitlik (A.4)'de yerine konulursa;

$$T_{i,j}^{m}=Ce^{at}e^{ikx}e^{ikr} \tag{A.5}$$

Burada *C*, *k* ve *a* birer katsayı, *i* ise sanal bir sayıyı ifade etmektedir.

$$G = e^{a\Delta t} = 1 - \frac{u_x \Delta t}{\Delta x}\left(\frac{3 - 4e^{-ik\Delta x} + e^{-2ik\Delta x}}{2}\right) + \frac{1}{r}\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} r_+ \left(\frac{e^{ik\Delta r} - 1}{1}\right) - \frac{1}{r}\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} r_- \left(\frac{1 - e^{-ik\Delta r}}{1}\right) \tag{A.6}$$

Eşitlik (A.6)'da G yükseltme faktörü olarak tanımlanmıştır. Ayrıca kararlılık analizlerinde kullanılan CFL ve Von Neumann (ν) sayısı aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$\mathrm{CFL} = \frac{u_x \Delta t}{\Delta x}, \qquad \nu = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \tag{A.7}$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: SERT, İsmail Ozan
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 18.07.1984 Sakarya
Medeni Hali	: Bekar
Telefon	:0 (555) 397 49 58
e-mail	:i.ozansert@gmail.com

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet Tarihi**
Lisans	Hacettepe Üniversitesi	2008

İş Deneyimi	**Yer**	**Görev**
2011-2013	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üni. Makine Müh. Bölümü	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Uluslararası Kongre Bildirileri

1. Sert, I.O., Sezer-Uzol, N., Kakaç, S., Analysis of Transient Laminar Forced Convection of Nanofluids in Circular Channels, ASME 2012 IMECE, ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Houston, Texas, November 9-15 2012.
2. Sert, I.O., Sezer-Uzol, N., Kakaç, S, Transient Laminar Forced Convection Heat Transfer Analysis of Nanofluid Flow in Circular Ducts, Extended Abstract, Poster Presentation, NanoTR-8, 8th Nanoscience and Nanotechnology Congress, Hacettepe, Ankara, Turkey, 25-29/06/2012.,

3. Sert, I.O., Sezer-Uzol, N., Kakaç, S., Forced Convection Analysis of Nanofluid Flow in Circular Ducts with Two-Phase Mixture Model Approach," Extended Abstract, Poster Presentation, NanoTR-8, 8th Nanoscience and Nanotechnology Congress, Hacettepe, Ankara, Turkey, 25-29/06/2012.

Uluslar arası Yayınlar

1. Sert, I.O., Sezer-Uzol, N., Numerical Analysis of Convective Heat Transfer of Nanofluids in Circular Ducts with Two-Phase Mixture Model Approach, *International J of Thermal Sciences*, Submitted (Gönderme tarihi) on Nov 4, 2012.

2. Sert, I.O., Sezer-Uzol, N., Kakaç, S, Numerical Analysis of Transient Laminar Forced Convection of Nanofluids In Circular Ducts, *Heat and Mass Transfer*, Submitted (Gönderme tarihi) on May 9, 2012.