

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANOAKIŞKANLARDA ISI VE KÜTLE TRANSFERİ ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Mehmet Bahattin AKGÜL

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Makine Teorisi ve Dinamiği

MANİSA 2013

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nanoakışkanlarda Isı ve Kütle Transferi Analizi

DOKTORA TEZİ

Makine Yüksek Mühendisi Mehmet Bahattin AKGÜL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26.09.2013
Tezin Savunulduğu Tarih : 05.11.2013

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet PAKDEMİRLİ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Erdoğan ÖZKAYA
Prof. Dr. Bekir SOLMAZ
Prof. Dr. Hakan BOYACI
Prof. Dr. Muhammet YÜRÜSOY

MANİSA 2013

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	i
SEMBOLLER LİSTESİ	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	vi
TEŞEKKÜR	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Aktif Yöntemler	1
1.1.1. Yüzey ve Akışkan Titreşimi	1
1.1.2. Jet Akışı.....	1
1.1.3. Elektrostatik Alanlar	1
1.1.4. Enjeksiyon ve Emme.....	2
1.2. Pasif Yöntemler	2
1.2.1. Pürüzlü Yüzeyler	2
1.2.2. Genişletilmiş Yüzeyler	2
1.2.3. Akışkana Yapılan İlave Katkılar	2
1.3. Nanoakışkanlarda Isı Transferini İyileştirme Mekanizmaları	3
1.4. Çalışmanın Kapsamı	5
2. Nanopartikül Üretimi, Nanoakışkanların Hazırlanması ve Potansiyel Uygulama Alanları	6
2.1 Nanopartikül üretimi.....	6
2.1.1 Kimyasal buhar yoğunlaştırma yöntemi.....	6
2.1.2 Asal gaz yoğunlaştırma yöntemi	7
2.1.3 Mekanik aşındırma yöntemi.....	8
2.2 Nanoakışkanların Hazırlanması	8
2.2.1 İki adım yöntemi.....	9
2.2.2 Tek adım yöntemi.....	9
2.3 Nanoakışkanlarda Kararlılığın Arttırılması.....	9
2.4 Nanoakışkanların Potansiyel Uygulama Alanları.....	11
2.4.1 Elektronik Uygulamaları	12

2.4.2	Taşıma endüstrisi uygulamaları.....	12
2.4.3	Enerji depolama uygulamaları	13
2.4.4	Güneş enerjisi uygulamaları.....	13
2.4.5	Isı eşanjörü uygulamaları	14
2.5	Nanoakışkanların ısıl iletkenliği	14
2.6	Nanoakışkanların viskozitesi	18
2.7	Nanoakışkanlarda Taşınım İle Isı Transferi.....	20
3.	NANOAKIŞKANLARDA ZORLANMIŞ TAŞINIM ANALİZİ	22
3.1	Tek Fazlı homojen model I	22
3.2	Tek Fazlı homojen model II	24
3.3	Ayrık Faz Modeli.....	25
3.3.1	Temel Akışkan Fazı İçin Kurucu Denklemler.....	25
3.3.2	Nanopartikül Fazı İçin Kurucu Denklemler	26
3.3.3	Karışım Modeli	28
3.3.4	Euler - Euler Modeli.....	30
3.4	Sayısal Analiz	33
3.4.1	Sonlu Hacimler Metodu	33
3.4.2	Sınır Şartları ve Grid Bağımsızlığı	36
3.5	Analiz Sonuçları	37
4.	NANOAKIŞKANLARDA KARIŞIK TAŞINIM ANALİZİ	47
4.1	Tek Fazlı homojen model I	47
4.2	Euler - Euler Modeli.....	49
4.3	Analiz Sonuçları	51
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	60
	KAYNAKLAR	61
	ÖZGEÇMİŞ	68

SEMBOLLER LİSTESİ

c_p	özgül ısı (J/kg K)
C_f	sürtünme katsayısı
d_p	nanopartikül çapı (m)
D_h	hidrolik çap (m)
g	yerçekimi ivmesi (m/s ²)
Gr	Grashof sayısı
h	taşıyım ısı transfer katsayısı (W/m ² K)
H	kanal yüksekliği (m)
k	ısıl iletkenlik (W/m K)
k_b	Boltzmann sabiti (m ² kg/s ² K)
Kn	Knudsen sayısı
L	kanal uzunluğu (m)
Nu	Nusselt sayısı
p	basınç (Pa)
Pr	Prandtl sayısı
q	ısı akısı (W/m ²)
Re	Reynolds sayısı
V	hız alanı (m/s)
x, y	yatay ve dikey koordinatlar
T	sıcaklık (K)
β	ısı genleşme katsayısı (1/K)
μ	dinamik viskozite (N s/m ²)
ν	kinematik viskozite (m ² /s)
ρ	yoğunluk (kg/m ³)
τ	kayma gerilmesi (Pa)
φ	hacimsel fraksiyon

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Kimyasal buhar yoğunlaştırma yöntemi.....	7
Şekil 2.2. Asal gaz yoğunlaştırma yöntemi.....	8
Şekil 2.3. Farklı kararlaştırma mekanizmaları	11
Şekil 2.4. Taşınım ile ısı transferi deney düzeneği (Wen ve Ding (2004))	20
Şekil 3.1. Problem geometrisi.....	22
Şekil 3.2. Bir boyutlu kontrol hacmi ve grid yapısı	34
Şekil 3.3. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması $\varphi_p = \%0.1$	38
Şekil 3.4. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması $\varphi_p = \%0.2$	38
Şekil 3.5. Nanopartikül hacimsel fraksiyonunun $\varphi_p = \%0.5$ olduğu durumda duvar sıcaklığının değişimi ($Re = 200$, $q_0 = 20.5kW$)	41
Şekil 3.6. Nanopartikül hacimsel fraksiyonunun $\varphi_p = \%1$ olduğu durumda duvar sıcaklığının değişimi ($Re = 200$, $q_0 = 20.5kW$)	42
Şekil 3.7. Nanopartikül hacimsel fraksiyonunun $\varphi_p = \%2$ olduğu durumda duvar sıcaklığının değişimi ($Re = 200$, $q_0 = 20.5kW$)	43
Şekil 3.8. Isıtılmış yüzeydeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi ($q_0 = 20.5kW$).....	44
Şekil 3.9. Suya göre normalize edilmiş nanoakışkan ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi ($q_0 = 20.5kW$).....	44
Şekil 3.10. Kanal boyunca gerçekleşen basınç düşüşünün Reynolds sayısına göre değişimi ..	45
Şekil 4.1. Problem geometrisi.....	47
Şekil 4.2. Su için farklı Grashof sayılarında tam gelişmiş hız profilinin değişimi ($Re = 400$) ...	52
Şekil 4.3 Homojen model I için hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda farklı Grashof sayılarında tam gelişmiş hız profilinin değişimi ($Re = 400$).....	53
Şekil 4.4 Euler modeli için hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda farklı Grashof sayılarında tam gelişmiş hız profilinin değişimi ($Re = 400$).....	53
Şekil 4.5. Su için farklı Grashof sayılarında lokal sürtünme katsayısının değişimi ($Re = 400$)	54
Şekil 4.6 Homojen model I için hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda farklı Grashof sayılarında lokal sürtünme katsayısının değişimi ($Re = 400$)	55

Şekil 4.7 Euler modeli için hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda farklı Grashof sayılarında lokal sürtünme katsayısının değişimi ($Re = 400$)	55
Şekil 4.8 Su için farklı Grashof sayılarında ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi	56
Şekil 4.9 Hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.2$ olduğu durumda homojen ve Euler modelleri için farklı Grashof sayılarında ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi	57
Şekil 4.10 Hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.5$ olduğu durumda homojen ve Euler modelleri için farklı Grashof sayılarında ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi	57
Şekil 4.11 Hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda homojen ve Euler modelleri için farklı Grashof sayılarında ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi	58

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1. Grid sayısına bağlı olarak ortalama Nusselt sayısının değişimi	37
Tablo 3.2. Karışım modelinde kayma hızının ortalama Nusselt sayısına etkisi.....	39
Tablo 3.3. Ayrık faz modeli ve homojen modelin farklı hacimsel fraksiyon değerleri ve Reynolds sayıları için karşılaştırılması	40
Tablo 3.4. Euler ve homojen modellerde suya göre basınç düşüşü ve ısı transferindeki artışların yüzdelik değerleri (Re=500)	46
Tablo 4.1. Farklı hacimsel fraksiyon değerlerinde homojen ve Euler modellerinde suya göre ısı transferinde gerçekleşen yüzdelik artışlar (Gr=10 ⁵).....	59

TEŞEKKÜR

İlk olarak beni bugünlere getiren aileme teşekkür etmek isterim. Çalışmalarında bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Mehmet PAKDEMİRLİ'ye, verdiği bursla doktora eğitimimi tamamlamamda yardımcı olan Tübitak-Bideb'e, araştırma görevlisi arkadaşlarım Ali YURDDAŞ ve Saim KURAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET**Nanoakışkanlarda Isı ve Kütle Transferi Analizi**

Bu çalışmada laminar akım şartlarındaki nanoakışkanların zorlanmış taşınımıyla ısı transferi tek fazlı ve iki fazlı yaklaşımlar kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. İki farklı tek fazlı yaklaşım (homojen model I ve homojen model II) ve üç farklı iki fazlı yaklaşım (ayrık faz, karışım ve Euler) için kurucu denklemler elde edilmiştir. Bu denklemlerin sayısal çözümü sonlu hacimler metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları literatürdeki deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmış ve nanoakışkanlar için en uygun model olarak Euler modeli seçilmiştir. Seçilen model yardımıyla nanoakışkanların karışık taşınım analizi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte nanopartikülün hacimsel fraksiyonunun, Reynolds sayısının ve Grashof sayısının hız ve ısı alanları üzerindeki etkileri grafikler ve tablolar halinde verilmiş ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: nanoakışkan, homojen model, ayrık faz modeli, karışım modeli, Euler modeli, zorlanmış taşınım, karışık taşınım, sonlu hacimler metodu.

ABSTRACT

Heat and Mass Transfer Analysis in Nanofluids

In this study, forced convection heat transfer of nanofluids under laminar flow conditions are studied numerically using single-phase and two-phase approaches. Governing equations have been obtained for two different single-phase approaches (homogeneous model I and homogeneous model II) and three different two-phase approaches (discrete phase, mixture and Euler). Numerical solutions of the governing equations are carried out using finite volume method. Results of the analysis are compared with experimental studies in the literature. Euler model is selected to be the most appropriate model for nanofluids. Mixed convection analysis of nanofluids are performed using the selected model. In addition, the nanoparticle volume fraction, Reynolds number and Grashof number effects on velocity and thermal fields were presented by graphs and tables and discussed.

Keywords: nanofluid, homogeneous model, discrete phase model, mixture model, Euler model, forced convection, mixed convection, finite volume method

1. GİRİŞ

Efektif ısı transferi endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan en yaygın problemlerden biridir. Birçok cihaz çalışması esnasında atık enerji olarak önemli miktarlarda ısı üretmektedir. Üretilen bu ısının cihaz zarar görmeden sağlıklı bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Genel olarak ısı transferi iyileştirme çalışmaları iki büyük başlık altında toplanmaktadır. Bunlar;

- Aktif yöntemler
- Pasif yöntemler

şeklindedir.

1.1. Aktif Yöntemler

Aktif yöntemlerde ısı transferini artırmak için dışarıdan ek bir enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Yüzey titreşimi, akışkan titreşimi, jet akışı ve elektrostatik alanlar bu yöntemler arasında sayılabilmektedir.

1.1.1. Yüzey ve Akışkan Titreşimi

Bu yöntem özellikle tek fazlı akışlarda kullanılan bir yöntemdir. Uygulama alanına göre yüzey veya akışkan belirli bir frekansta titreştirilerek sınır tabakalar sürekli olarak deforme edilmekte ve böylelikle ısı transferinde artış sağlanmaktadır. Hem laminar hem de türbülanslı akış durumları için kullanılabilir.

1.1.2. Jet Akışı

Bu yöntemde akışkan ısı transferinin gerçekleşeceği yüzeye belirli bir açıda çarptırılır. Uygulama alanına bağlı olarak bir veya birden fazla jet kullanılabilir.

1.1.3. Elektrostatik Alanlar

Bu yöntem genellikle düşük Reynolds sayılarındaki laminar akışta kullanılır. Doğru veya alternatif akım dielektrik akışkana uygulanarak ısı transfer yüzeyinin yakınında akışkana

girdap hareketi kazandırılarak ısı transferinde artış sağlanır. Doğal taşınımında ısı transferini arttırmak için kullanılan en pratik yöntemlerden biridir.

1.1.4. Enjeksiyon ve Emme

Bu yöntemde ısı transferinin gerçekleştiği yüzeyde akışkanın enjekte edilmesi veya emilmesiyle sınır tabakalar deforme edilir ve ısı transferinde iyileşme sağlanır. Tek fazlı akışlarda sıvının içine enjekte edilen gaz ısı transferini iyileştirmektedir. Kabarcıklı kaynama ve film kaynamasında ise gözenekli ısı transfer yüzeyinden buharın emilmesi ısı transferini iyileştirir.

1.2. Pasif Yöntemler

Pasif yöntemler ısı transferinin iyileştirilmesi için dışarıdan ek bir enerji kaynağına ihtiyaç duymayan yöntemlerdir. Pürüzlü yüzeyler, genişletilmiş yüzeyler ve akışkana yapılan ilave katkılar bu yöntemler arasında sayılabilir.

1.2.1. Pürüzlü Yüzeyler

Bu yöntemde, yüzey üzerine kum tanelerinin rastgele yerleştirilmesi veya yüzey üzerinde düzenli-desenli tümsekler elde etmek için yarıkların açılmasıyla pürüzlülük elde edilir. Buradaki temel amaç ısı transfer yüzeyini arttırmaktan ziyade sınır tabakasını deforme etmektir. Sınır tabakanın deforme edilmesi ile yüzeye yakın yerlerde akışkana bir girdap hareketi kazandırılır ve ısı transferinde iyileşme sağlanır.

1.2.2. Genişletilmiş Yüzeyler

Isı transferi uygulamalarında en çok kullanılan yöntemdir. Burada ısı transferinin gerçekleştiği yüzeye çeşitli profillerde kanatçıklar eklenir ve yüzey alanında önemli bir artış sağlanır. Böylelikle ısı transferinde iyileşme sağlanır.

1.2.3. Akışkana Yapılan İlave Katkılar

Isı transferi ekipmanlarında kullanılan su, yağ, polimer solüsyonları ve etilen glikol gibi temel ısı transfer akışkanlarının termal özellikleri düşüktür. Bu durum etkin bir ısı transferi önündeki en önemli kısıtlamalardan birini oluşturmaktadır. Temel akışkanların içine metalik veya metalik olmayan katı parçacıkların ilavesi termal özellikleri iyileştirmek için kullanılan pasif

yöntemlerden biridir. Mikrometre veya milimetre boyutundaki bu katı parçacıklar termal özellikleri iyileştirse de daha az kararlı yapıda olduklarından dolayı çökelme problemleri meydana gelmekte ve ısı transfer ekipmanlarında aşırı basınç kayıplarına, aşınma ve tortulaşma gibi problemlere neden olmaktadır.

Modern üretim tekniklerindeki hızlı gelişmeler temel akışkanlarda ısı transferini arttırmak için boyutları 1 ve 100 nm arasında değişen nanopartiküllerin üretimine olanak sağlamış ve akışkan içine partiküllerin katılması tekrar gündeme gelmiştir. Choi (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışmada nano boyuttaki katı partiküller temel akışkan içine karıştırılarak termal özelliklerde önemli bir iyileşme sağlanmıştır. Bu yeni tip sıvı-katı karışımları nanoakışkan olarak adlandırılmıştır. Nanoakışkanların en önemli özelliği ısı transferini arttırmanın yanında mikrometre veya milimetre boyutundaki karışımlarda gerçekleşen basınç kaybı, aşınma ve tıkanma gibi problemlerin görülmemesidir. Bu özelliklerinden dolayı nanoakışkanlar geleneksel ısı transferi akışkanlarına yeni bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır.

1.3. Nanoakışkanlarda Isı Transferini İyileştirme Mekanizmaları

Geleneksel ısı transferi akışkanlarının içerisinde nano boyuttaki katı partiküllerin ilavesi ile ısı transferinin gelişmesine neden olan mekanizmalar aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

- İlave edilen katı partiküller temel akışkanın ısı iletkenlik ve özgül ısı gibi termo-fiziksel özelliklerini önemli ölçüde geliştirir.
- Akışkan içerisine ilave edilen partiküller akışkan ve katı çeperler arasındaki temas yüzeyini arttırır.
- Akışkan içerisindeki mikro boyuttaki çalkantılar ve türbülans şiddeti artar.
- Akışkan ve partikül arasında meydana gelen mikro taşınımlar toplam ısı geçişini arttırır.

Görüldüğü üzere nanoakışkanlardaki ısı transferi geleneksel akışkanlara göre daha karmaşık olan mekanizmaları içermektedir. Literatürde nanoakışkanların ısı transferi davranışlarını belirtmek için birçok model önerilmiştir. Önerilen bu modeller nanoakışkanı bir karışım olarak ele alan iki farklı yaklaşıma dayanmaktadır. Bunlar tek fazlı yaklaşım ve iki fazlı yaklaşımlardır. Tek fazlı yaklaşımda, temel akışkan içinde süspanse edilmiş nanopartiküller çok küçük boyutlarda olduğu için kolayca akışkanlaştırılmaktadır. Temel akışkan ve nanopartikülün aynı hızda hareket ettiği ve termal dengede olduğu varsayılmaktadır. Böylece temel akışkanlar için kullanılan konvansiyonel ısı transfer denklemleri nanoakışkan uygulamaları için kullanılabilir hale gelmektedir. Nanopartiküllerin ısı transferi üzerindeki etkileri kurucu denklemlerde yer alan termofiziksel parametrelerin değişimiyle belirtilmektedir. Bu yaklaşımın en önemli avantajları basit olması ve çözüm için daha az zaman gerektirmesidir. Bu özelliklerinden dolayı, bu

yaklaşım kullanılarak nanoakışkanlarda taşınım ile ısı transferiyle ilgili bir çok teorik çalışma gerçekleştirilmiştir. Mai'ga *et al.* (2005) laminar ve türbülanslı akım şartlarında, bir boru içerisindeki nanoakışkanın ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında nanoakışkanın hidrodinamik ve ısı davranışlarını tek fazlı yaklaşım ile ifade etmişlerdir. Nanopartikül hacimsel fraksiyonun artmasıyla ısı transferinin yanında basınç kayıplarında da önemli bir artışın olduğunu belirtmişlerdir. Roy *et al.* (2004) radyal bir soğutma sisteminde nanoakışkanların ısı transferini tek fazlı yaklaşım yardımıyla sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında %10'luk nanopartikül hacimsel fraksiyonuna karşılık ısı transferinde %100'lük bir artışın sağlandığını not etmişlerdir. Khanafer *et al.* (2003) tek fazlı yaklaşımı kullanarak nanoakışkanların doğal taşınım ile ısı transferini açıklayan analitik bir model geliştirmişlerdir. Bu model yardımıyla verilen bir Grashof sayısında, nanopartikül hacimsel fraksiyonunun artmasıyla ısı transferinin arttığını belirtmişlerdir. Namburu *et al.* (2009) türbülanslı akım şartları altındaki bir boruda üç farklı tipteki nanoakışkanın taşınım ile ısı transferini tek fazlı yaklaşım yardımıyla sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, temel akışkan olan su ile karşılaştırıldığında, verilen bir Reynolds sayısı için partikül hacimsel fraksiyonun artmasıyla ısı transferinin önemli bir ölçüde geliştiğini not etmişlerdir. Akbarinia ve Behzadmehr (2007) nanoakışkanların tam gelişmiş ve laminar akım şartları altındaki karışık taşınım ile ısı transferini sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında tek fazlı yaklaşım ile elde edilen homojen bir model kullanmışlardır. Nanopartikül hacimsel fraksiyonunun ısı transferinin artmasında ve sürtünme katsayısının düşmesinde pozitif bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

İki fazlı yaklaşımda ise temel akışkan ve katı nanopartiküller ayrı birer faz olarak kabul edilmekte ve fazlar arasındaki kayma hızı ısı transfer denklemlerinde dikkate alınmaktadır. Akbarinia ve Laur (2009), laminar akım şartlarında nanoakışkanların taşınım ile ısı transferini eğik bir boruda iki fazlı karışım modelini kullanarak teorik olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan modelde fazlar arasındaki bağlantının kuvvetli olduğu ve katı nanopartiküllerin temel akışkan akışını yakından takip ettiği varsayılmaktadır. Kurucu denklemler her bir faz için ayrı ayrı ele alınmaktansa karışım için ele alınmakta ve fazlar arasındaki kayma hızı denklemlerde dikkate alınmaktadır. Çalışmanın sonucunda nanopartikül boyutunun artması ile ısı transfer performansının düştüğünü vurgulamışlardır. Mirmasoumi ve Behzadmehr (2008) laminar akım şartı altındaki nanoakışkanların karışık taşınımını iki fazlı karışım modeli yardımıyla sayısal olarak incelemişlerdir. Isı transferinin partikül hacimsel fraksiyonu ile belirgin bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Buldukları sonuçları literatürde yer alan deneysel sonuçlar ile karşılaştırdıklarında iki fazlı karışım modelinin tatmin edici sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bianco *et al.* (2009) türbülanslı akım şartı altındaki nanoakışkanın taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında tek fazlı homojen modeli ve iki fazlı karışım modelini birlikte kullanmışlardır. Isı transferinin Reynolds sayısı ve partikül hacimsel fraksiyonu ile arttığını belirtmişlerdir. Her iki modeli literatürdeki deneysel çalışmalar ile karşılaştırmışlar ve

iki fazlı karışım modelinin nanoakışkan davranışını daha iyi ifade ettiğini vurgulamışlardır. Fard *et al.* (2010), düz bir boruda nanoakışkanların taşınımıyla ısı transferini tek fazlı homojen model ve iki fazlı karışım modelini kullanarak araştırmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada elde ettikleri sayısal sonuçları literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve iki fazlı karışım modelinin tek fazlı modele kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Tahir ve Mital (2012), bir boru içerisinde laminar akım şartları altındaki nanoakışkanın zorlanmış taşınımını ayrık faz modelini kullanarak araştırmışlardır. Bu modelde temel akışkan fazı sürekli ortam olarak ele alınmakta ve hız alanı Navier-Stokes denklemlerinin çözümüyle bulunmaktadır. Nanopartiküller ise ayrık bir faz olarak varsayılmakta ve Newton'un ikinci hareket kanununa dayanan Lagrangian yaklaşımı ile ele alınmaktadır. Nanopartiküller için oluşturulan hareket denklemi atalet kuvvetlerini, hidrodinamik kuvvetleri, Brownian kuvvetini ve termoforez kuvvetini içermektedir. Çalışmalarının sonucunda partikül hacimsel fraksiyonun ısı transferi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

1.4. Çalışmanın Kapsamı

Literatürde yapılan incelemeler sonucunda nanoakışkanlar için iki yaklaşımı kullanılarak oluşturulan matematiksel modelleri bir arada değerlendirip farklarını ortaya koyan kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında nanoakışkanların taşınımıyla ısı transferi, tek fazlı yaklaşım yardımıyla oluşturulan iki farklı homojen model ve iki fazlı yaklaşım yardımıyla oluşturulan ayrık faz modeli, karışım modeli ve Euler modeli kullanılarak araştırılmıştır. Nanoakışkan davranışına en uygun model belirlenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde nanopartiküllerin üretimi ve nanoakışkanların hazırlanması hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bununla birlikte nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ve potansiyel kullanım alanlarından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde nanoakışkanların zorlanmış taşınım analizi iki farklı homojen model, ayrık faz modeli, karışım modeli ve Euler modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulunan sonuçlar literatürdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Euler modelinin nanoakışkan davranışına en uygun model olduğu sonucuna varılmıştır.

Dördüncü bölümde de nanoakışkanların karışık taşınım analizi homojen model ve Euler modeli yardımıyla yapılmıştır. Nanoakışkanlarda karışık taşınım analizinde de en uygun modelin Euler modeli olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte her iki modelin ısı transferi üzerindeki etkileri detaylı bir biçimde gösterilmiştir.

2. Nanopartikül Üretimi, Nanoakışkanların Hazırlanması ve Potansiyel Uygulama Alanları

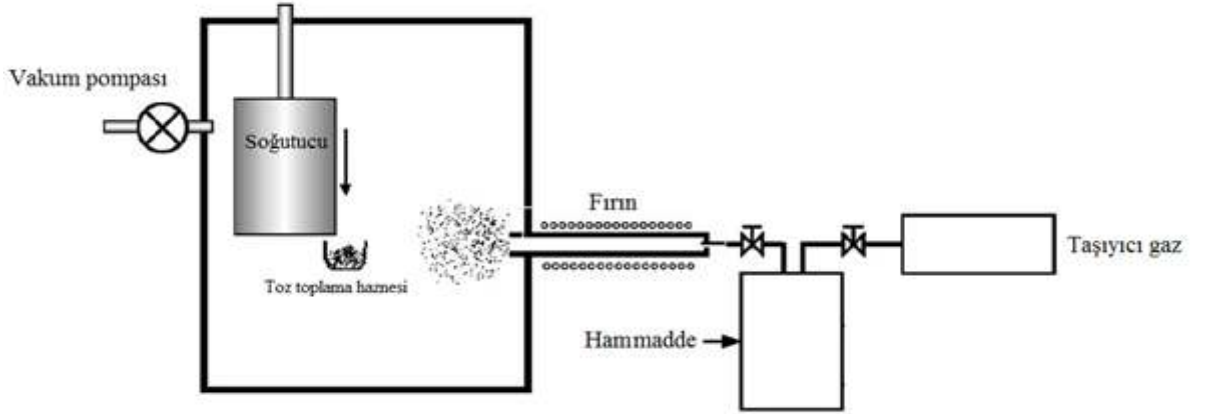
Temel ısı transferi akışkanlarının performanslarını arttırmak amacıyla nanopartiküllerin akışkan içine süspanse edilmesi özen gösterilmesi gereken bir konudur. Hazırlanan nanoakışkanların kararlı bir yapıda olabilmesi için nanopartikül üretiminden bu partiküllerin akışkan içine süspanse edilmesine kadar yapılacak tüm işlemler büyük bir öneme sahiptir.

2.1 Nanopartikül üretimi

Nanopartikül üretimi fiziksel ve kimyasal temelli yöntemler olmak üzere iki ayrı sınıfa ayrılmaktadır. Mekanik enerjinin ön plana çıktığı yöntemlere fiziksel temelli yöntemler, kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yöntemlere ise kimyasal temelli yöntemler denilmektedir. Kimyasal buhar yoğunlaştırma, asal gaz yoğunlaştırma ve mekanik aşındırma nanopartikül üretiminde en fazla kullanılan yöntemlerdir.

2.1.1 Kimyasal buhar yoğunlaştırma yöntemi

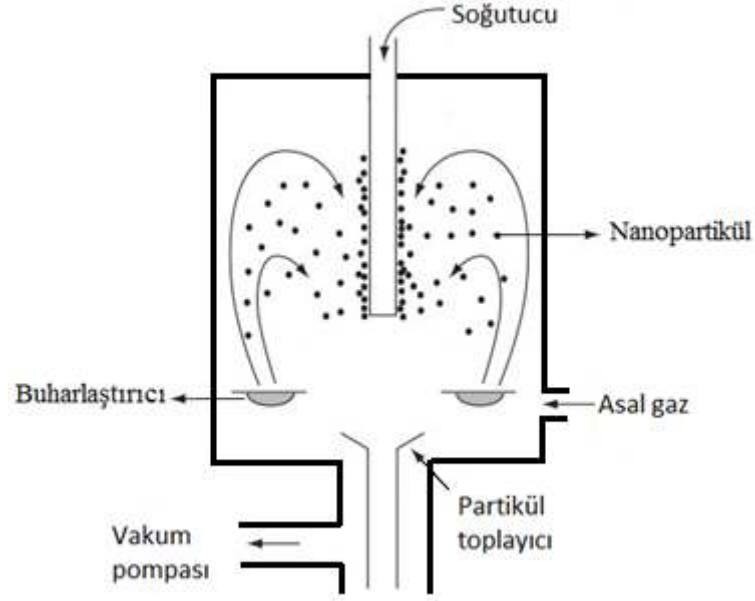
Kimyasal buhar yoğunlaştırma yöntemi endüstriyel ölçekte nanopartikül üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde hammadde olarak metal organikler, karboniller, klorürler ve hidrürler gibi buhar fazına kolaylıkla geçebilen maddeler kullanılmaktadır. Hammaddenin gaz fazına geçtiği bölgeye gaz akışı verilerek buharın reaktör olarak da adlandırılan fırın içine taşınıp burada ısı parçalanması sağlanır. Taşıyıcı gaz olarak He, Ar veya N₂ gibi soygazlar kullanılmakla birlikte bileşiğin indirgenmesi için H₂, CO veya CH₄ gibi gazlar da taşıyıcı gaza ilaveten kullanılabilir. Isıl parçalanma sonucu oluşan atom kümeleri veya nanopartiküller fırın çıkışındaki farklı toz toplama yöntemleriyle toplanmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı, içerisinden sıvı azot geçen bir soğutucu etrafında partiküllerin çöktürülmesidir. Şekil 2.1'de yöntemin şematik gösterimi verilmiştir (Wang *et al.* (2003), Lee *et al.* (2004)).



Şekil 2.1. Kimyasal buhar yoğunlaştırma yöntemi

2.1.2 Asal gaz yoğunlaştırma yöntemi

Asal gaz yoğunlaştırma yöntemi ile metalik, kompozit, seramik ve oksit bileşikler halinde nanopartikül üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Yöntemin şematik gösterimi şekil 2.2’de verilmiştir. Buna göre sistem içerisinde yer alan buharlaştırıcılar çalıştırılmadan önce sistem vakuma alınıp asal gaz ile doldurulur. Daha sonra buharlaştırıcılar dışarıdan bir enerji kaynağının yardımıyla devreye alınır ve nanopartikülü oluşturacak hammadde potalarda buharlaştırılır. Buharlaşan atomlar veya moleküller homojen olarak toplanarak ısı kaynağının hemen yakınlarında atom kümelerini oluştururlar. Başlangıç malzemesinin buharlaşan atomları, sistem içinde var olan gaz molekülleri ile çarpışarak enerjilerini kaybederler. Bunun sonucunda, çekirdeklenme ve partikül oluşumu gerçekleşir. Sentezlenen nanopartiküllerin boyutu sistemde kalma sürelerinden, başlangıç malzemesinin buharlaşma hızından, ortam sıcaklığından, gaz basıncından ve asal gazın cinsinden etkilenmektedir (Türker,(2004)).



Şekil 2.2. Asal gaz yoğunlaştırma yöntemi

2.1.3 Mekanik aşındırma yöntemi

Mekanik aşındırma yöntemi yukarıdan aşağıya üretim yaklaşımına sahiptir. Bu yöntemde, nanopartiküller iri taneli yapıların plastik deformasyonu sonunda ayrışmasıyla oluşur. Ayrışan tozların ince partikül boyutuna inebilmesi için gerekli enerji kullanılan yüksek frekans ve düşük genlikli titreşimlerden elde edilir. Mekanik aşındırma yöntemi sayesinde alaşımın, intermetalik, seramik ve kompozit gibi amorf veya nano-yapılı malzemelerin geniş bir bileşim aralığında üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Tekniğin endüstriyel kullanımı işlem sırasında kolaylıkla kırılabilen sert ve gevrek özellikli malzemeler ile sınırlıdır.

2.2 Nanoakışkanların Hazırlanması

Nano boyutlarda üretilmiş çeşitli şekillerde katı parçacıklarını temel akışkanların içine süspanse etmek için iki yöntem kullanılmaktadır.

- İki adım yöntemi
- Tek adım yöntemi

2.2.1 İki adım yöntemi

Nanoakışkanların hazırlanmasında en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde ilk adım olarak nanopartiküller asal gaz yoğunlaştırma, kimyasal buhar yoğunlaştırma veya mekanik aşındırma gibi yöntemlerle kuru toz halinde üretilmektedir. Daha sonra üretilen bu nanopartiküller ikinci adım olarak ultrasonik veya mekanik karıştırma yöntemleri ile belirli sürelerde ve sıcaklıklarda temel akışkan içine karıştırılırlar. Nano boyuttaki tozların mevcut teknoloji sayesinde endüstriyel ölçeklerde üretimi gerçekleştirilebildiğinden dolayı iki adım yöntemi nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan en ekonomik yöntemdir. Nanopartiküller büyük yüzey alanları ve yüksek yüzey aktiviteleri nedeniyle temel akışkan içerisinde topaklanıp kümelenmeye meyillidirler. Bu durum nanoakışkanın kararlılığını düşürdüğünden istenmeyen bir durumdur. Temel akışkan içine dağılmış nanopartiküllerin kümelenmesini önlemek için sürfaktan kullanımı bu yöntemdeki en önemli tekniklerden biridir. Bunun yanında kullanılan sürfaktanlar yüksek sıcaklıklarda işlevselliğini yitirdiği için bu yöntem ile üretilmiş nanoakışkanların yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımı sınırlıdır.

2.2.2 Tek adım yöntemi

Nanoakışkanlarda oluşan partikül kümelenmesini azaltmak için Eastman *et al.* (2001) tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem ile nanoakışkanların elde edilişi, metal buharının doğrudan düşük buharlaşma basıncına sahip akışkan ile teması neticesinde nanopartikül elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem ile topaklaşma minimize edilirken, sadece düşük buharlaşma basıncına sahip akışkanlar kullanıldığı için uygulama alanı kısıtlıdır. Büyük ölçeklerde üretim yapılamaması ve maliyetinin yüksek olması bu yöntemin diğer dezavantajlarıdır.

2.3 Nanoakışkanlarda Kararlılığın Arttırılması

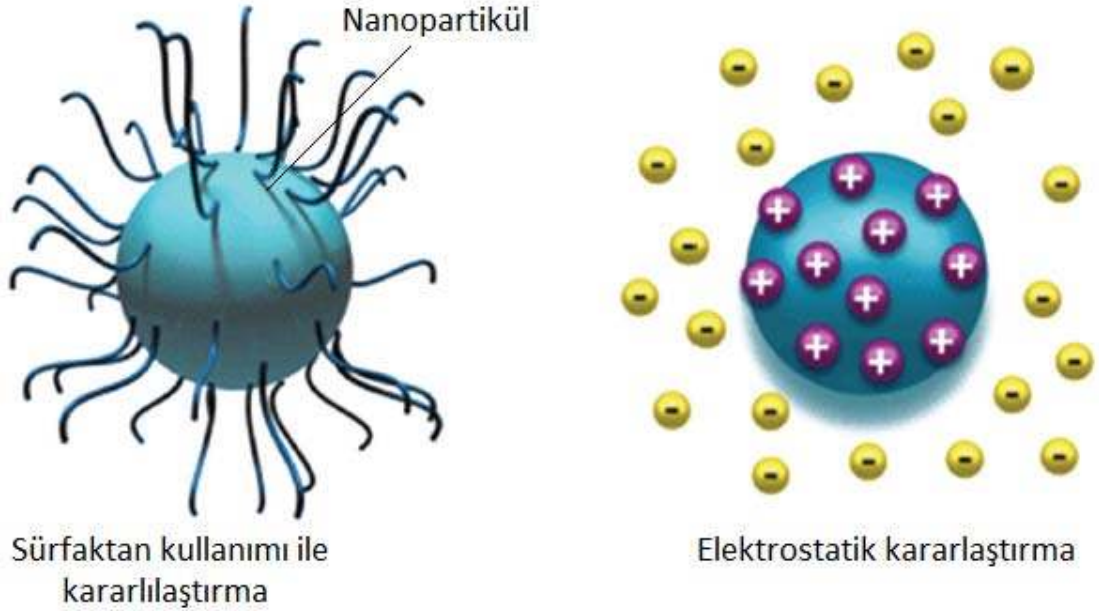
Isı transferi uygulamalarında istenen yüksek termal performansların elde edilebilmesi için üretilen nanoakışkanların kararlı bir yapıda olması gerekmektedir. Durgun bir akışkan içindeki küresel katı parçacıklar için çökelme hızı Stokes yasasına göre;

$$V = \frac{2R^2}{9\mu_f} (\rho_p - \rho_f) g \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki V küresel partiküllerin çökme hızı, R partikül yarıçapı, μ_f temel akışkan viskozitesi, ρ_p ve ρ_f sırasıyla partikül ve akışkan yoğunluğu, g ise yerçekimi ivmesidir. Denklemden görüldüğü üzere partikül boyutundaki azalma, temel akışkan viskozitesindeki artış veya partikül ve temel akışkan arasındaki yoğunluk farkının azalması çökme hızını düşürmektedir. Düşük çökme hızları hazırlanan sıvı-katı karışımlarının daha uzun bir süre kararlı kalmalarını sağlar. Nanoakışkanlarda ise partiküllerin mikro veya mili boyutlardaki süspansiyonlara göre daha küçük olması bunların daha uzun süre kararlı bir şekilde kalmasına neden olmaktadır. Uygun partikül boyutlarının belirlenmesi, temel akışkanın seçimi ve partikül malzemesinin belirlenmesi nanoakışkan kararlılığının artırılması için kullanılan kombinasyonlardan bazılarıdır. Bunların yanında sürfaktan kullanımı, pH kontrolü ve ultrasonik karıştırma da kararlılık artırıcı yöntemler olarak kullanılmaktadır.

Nanoakışkanların kararlılığını arttırmak için sürfaktan kullanımı en basit ve ekonomik yoldur. Sürfaktanlar nanopartiküller gibi küçük boyutlardaki maddelerin yüzey aktivitelerini önemli ölçüde değiştirebilmektedirler. Sürfaktan maddeler, suyun yüzey gerilimini azaltan "yüzey aktif" maddeler olarak ifade edilmektedirler. Bunun yanında sürfaktanlar; farklı yüzeyleri bir araya getiren özellik göstermekte, kimyasal yollarla ya da mikrobiyolojik yollarla üretilmektedir. Sürfaktanlar hidrofilik bir baş ve hidrofobik bir kuyruktan oluşmaktadırlar. Hidrofilik baş bileşimine göre sürfaktan maddeler anyonik sürfaktanlar, katyonik sürfaktanlar, noniyonik sürfaktanlar ve amfoterik sürfaktanlar olmak üzere dört gruba ayrılmaktadırlar. Sodyum dodesil sülfat, oleik asit, setil trimetil amonyum bromit, Dodesil trimetil amonyum bromit, sodyum oktanoat, heksadesil trimetil amonyum bromür, polivinil pirrolidon ve Arabik gam nanoakışkanların hazırlanmasında en yaygın olarak kullanılan sürfaktanlardandır.

Kararlılığı artırmak için kullanılan diğer bir yöntem ise pH kontrolüdür. Nanoakışkanlarda kararlılık hazırlanan katı-sıvı süspansiyonun elektriksel özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Partikül ve temel akışkan arasındaki elektriksel yük yoğunluğu ortamın pH değeriyle önemli bir biçimde değişebilmektedir. Değişen bu yük yoğunluğu partikül ve akışkan arasında elektriksel kuvvetlerin doğmasına ve partikülün temel akışkan içinde kümelenmeden daha uzun süre asılı kalabilmesine imkan vermektedir. Xie *et al.* (2003) gerçekleştirdikleri çalışmada karbon nanotüp nanoakışkanına yapılan asit katkısıyla pH düzeyini değiştirmişler ve nanotüplerin kararlılığının arttığını tespit etmişlerdir. Lee *et al.* (2006) Al_2O_3 nanoakışkanlarında pH düzeyinin kararlılığa etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan deneylerde pH değeri 1.7 iken nanopartikül kümelenmesinin %18 azaldığını, pH değerinin 7.66 olduğu durumda ise kümelenmenin nötr duruma göre %51 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Şekil 2.3'de nanopartiküllerdeki sürfaktan kullanımı elektrostatik etkilerle gerçekleştirilen kararlaştırma mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Farklı kararlaştırma mekanizmaları

Ultrasonik karıştırma yönteminde ise saniyede 20.000 veya daha fazla titreşim gerçekleştiren ses dalgaları ile temel akışkan içerisinde enerji meydana getirilmektedir. Genellikle, ultrason düzeneğinde 20 kHz'den 10 MHz'e kadar değişen frekanslar kullanılmaktadır. Ses enerjisi sürekli dalga-tipi bir hareket oluşturarak nanoakışkan ortamına girdiğinde, bu hareketin bir sonucu olarak boylamsal dalgalar oluşur ve bu durumda ortamdaki partiküller üzerinde bir sıkışma ve gevşeme meydana gelir. Yüksek şiddetli ultrasonik karıştırma uygulanan sıvıda yüksek basınç ve düşük basınçlı dalgalar oluşur. Düşük basınçlı dalga oluşumu sırasında, ultrasonik dalgalar küçük vakum baloncukları meydana getirirler ve bu baloncuklar daha fazla enerji absorblayamayacak hacme ulaştıklarında, yüksek basınçlı dalga oluşumu ortaya çıkar ve bu sırada içe doğru patlarlar. Bu olaya kavitasyon adı verilir. Bu oluşturulan kavitasyon neticesinde kümelenen nanopartiküller arasındaki bağlar kopartılır ve temel akışkan içinde düzgün bir şekilde dağıtılırlar.

2.4 Nanoakışkanların Potansiyel Uygulama Alanları

Nanoakışkanlar sahip oldukları yüksek ısı özelliklerinden dolayı otomotiv sektöründen medikal uygulamalara, enerji üretimine ve elektronik endüstrisine kadar birçok alanda

potansiyel uygulama sahasına sahiptir. Aşağıdaki alt bölümlerde literatürde en çok karşılaşılan nanoakışkan uygulamalarının bazıları detaylı bir şekilde verilmiştir.

2.4.1 Elektronik Uygulamaları

Hızla gelişen elektronik ve bilgisayar teknolojisinde kullanılan elektronik elemanların uygun bir şekilde çalışabilecekleri sıcaklık aralıkları bellidir. Yeni ve daha sıkı bir biçimde imal edilmiş bu cihazların kendi içlerinde ürettikleri ısının etkin bir şekilde uzaklaştırılması günümüz mühendisliğinin en önemli problemlerinden biridir. Genel olarak, elektronik elemanların üzerinden oluşan ısıyı uzaklaştırmak için iki yaklaşım kullanılır. Bunlardan biri soğutma için optimum geometrik dizaynı bulmak diğeri ise sistemin ısı transfer kapasitesini arttırmaktır. Nanoakışkanlar temel ısı transferi akışkanları ile karşılaştırıldıklarında yüksek termal özelliklerinden dolayı ısı transfer kapasitesini arttırmada ciddi bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Jang ve Choi (2006) elektronik cihazlar için mikrokanaallı bir soğutucu tasarlamışlardır. Cu-su süspansiyonu şeklinde hazırlanan nanoakışkanla yürütülen çalışmada, sabit pompalama gücü ve ısı akısı uygulanarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Mikrokanaallarda nanoakışkan kullanımının ısı transferini, içerisindeki su kullanılan mikrokanaala göre daha fazla arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, nanoakışkanların ısı direnci azalttıkları ve akışkanla mikrokanaalın duvarları arasındaki sıcaklık farkını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Chein ve Chung (2007) mikrokanaallı soğutucularda CuO-su nanoakışkanın soğutma performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Nanoakışkan kullanılan mikrokanaalların su kullanılan mikrokanaallara göre daha fazla ısı emdiği ve daha düşük duvar sıcaklıklarına ulaşıldığı gözlemlenmiş ve bu uygulamanın elektronik cihazların soğutulmasında kullanılabileceği vurgulanmıştır.

2.4.2 Taşıma endüstrisi uygulamaları

Taşıma endüstrisinde kullanılan otomobil, kamyon gibi araçların performansları yükselmeye devam ettikçe, performansa paralel olarak artan etkin soğutma ihtiyaçları gereği malzeme, boyut, hacim ve ağırlık kısıtlarını da dikkate alarak ısı atabilecekleri etkili akışkanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bugün soğutma sistemlerinde kullanılan antifriz-su karışımları, motor yağları ve sentetik yüksek sıcaklık ısı transferi akışkanları yapıları gereği yüksek termal performanslara sahip değildirler. Bu akışkanların kullanıldığı sistemlerde nanoakışkan kullanarak ısı kapasiteler artırılabilir. Nanoakışkan kullanarak tasarlanmış ısı değiştiricilere sahip motorlar daha uygun sıcaklıklarda çalışabilecektir. Böylece daha küçük pompa, motor, radyatör ve diğer bileşenler üretilebilecek, bunun sonucunda ise yakıt ekonomisi sağlanırken çevreye salınan zararlı emisyonların miktarı azalacaktır. Peyghambarzadeh *et al.* (2011)

gerçekleştirdikleri çalışmada araba radyatörlerinde soğutma sıvısı olarak nanoakışkan kullanımının ısı transferi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada nanoakışkan olarak Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanılmıştır. Yapılan gözlemler sonucu nanoakışkan kullanımıyla ısı transferinin maksimum %40 oranında arttığı tespit edilmiş ve nanoakışkanların taşıt motorlarının soğutulması için ciddi bir alternatif olduğu vurgulanmıştır.

2.4.3 Enerji depolama uygulamaları

Özellikle yenilenebilir enerjinin kullanıldığı uygulamalarda enerji arzı ve talebindeki zamana bağlı farklılıklar enerji depolanmasını gerekli kılmaktadır. Isıl enerjinin gizli veya duyulur ısı şeklinde depolanması endüstriyel alanlarda ve binalarda atık ısı ve güneş enerjisinin etkin bir şekilde kullanımı için büyük bir öneme sahiptir. Uygulama kolaylığı ve etkinliği açısından ısı enerjinin gizli ısı şeklinde depolanması günümüzde en çok kullanılan depolama yöntemidir. Liu *et al.* (2009) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada BaCl_2 solüsyonunun içine TiO_2 nanopartiküllerini ilave ederek oluşturdukları nanoakışkanı yeni bir faz değişim malzemesi olarak önermişler ve performansını incelemişlerdir. Nanopartikül ilavesi ile BaCl_2 solüsyonunun ısı depolama kapasitesinin önemli bir şekilde arttığını ve bu tür nanoakışkanların ısı enerji depolama sistemlerinde kullanımı için büyük bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamışlardır.

2.4.4 Güneş enerjisi uygulamaları

Yenilenebilir enerji kaynaklarından önde gelen güneş enerjisi; tükenmeyen tek enerji kaynağı olması, düşük CO_2 emisyonlarına sahip olması, enerjiye gereksinim duyulan her yerde kullanılabilmesi, koku ya da ses yapmaması; işletme masraflarının düşüklüğü nedeniyle evsel ve ticari kullanımda akışkan ısıtması için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Günümüzde kullanılan güneş kolektörleri güneş ışığını ısıya dönüştürürler. Kapalı devre olarak çalışan kolektörün içerisinde bulunan ısıtıcı sıvı akışkan güneşin etkisi ile ısı alır ve bir pompa vasıtasıyla sirkülasyon gerçekleştirilir. Bu sayede serpantinler vasıtasıyla ısını kullanıma aktaran ısıtıcı akışkan soğuyarak tekrar güneş kolektörlerine dönmektedir. Güneş kolektörlerindeki boyut ve performans açısından en büyük sorunu ısıtıcı sıvı akışkanın düşük termal özellikleri oluşturmaktadır. Yousefi *et al.* (2012) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada Al_2O_3 -su nanoakışkanının düzlemsel güneş kolektöründe kullanımını ve verim üzerindeki etkisini incelemişlerdir. %0.2 ağırlık oranında hazırlanan Al_2O_3 nanoakışkanın, düzlemsel kolektör ısı verimini, suya kıyasla %28.2 oranında arttırdığını belirtmişlerdir. Lu *et al.* (2011) vakumlu boru tipi güneş kolektörlerinde nanoakışkan kullanımının termal performans üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Nanoakışkan olarak CuO -su süspansiyonu kullanılan çalışmada termal performansta su kullanımına göre önemli bir iyileşme sağlanmıştır.

2.4.5 Isı eşanjörü uygulamaları

Endüstriyel uygulamalarının en önemli ve en çok karşılaşılan işlemlerinden birisi, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı değişimidir. Bu değişimin yapıldığı cihazlar genelde ısı eşanjörü olarak adlandırılmakta olup, pratikte termik santrallerde, kimya endüstrilerinde, ısıtma, iklimlendirme, soğutma tesisatlarında, taşıtlarda, elektronik cihazlarda, alternatif enerji kaynaklarının kullanımında, ısı depolanması gibi birçok yerde bulunabilmektedir. Isı eşanjörlerindeki ısı yükleri arttırmak için başvurulan konvansiyonel yol ısı transfer yüzeyini arttırmaktır. Eşanjör performansını belirlemede eşanjörde gerçekleşen ısı transferi ve eşanjör içindeki akışkanın hareket ettirmek için harcanan pompalama gücü arasında hassas bir denge vardır. Eşanjör boyutlarının artması akışkan hareketi için harcanacak pompalama gücünü arttırdığından dolayı bu denge bozulmakta ve eşanjör performansı bundan olumsuz etkilenmektedir. Nanoakışkanlar sahip oldukları üstün termal özelliklerinden dolayı ısı eşanjörü uygulamalarında da büyük bir ilgi çekmektedir. Farajollahi *et al.* (2010) gerçekleştirdikleri çalışmada Al_2O_3 -su ve TiO_2 -su nanoakışkanlarının türbülanslı akım şartları altında bir kabuk tüp ısı eşanjöründeki performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Eşanjörde nanoakışkan kullanımının ısı performansını önemli ölçüde artırdığı ve bu sayede daha kompakt eşanjörler tasarlanabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada ısı transferinde Al_2O_3 -su nanoakışkanıyla elde edilen iyileşmenin TiO_2 -su nanoakışkanına göre daha fazla olduğu kaydedilmiştir. Zamzamian *et al.* (2011) farklı hacimsel fraksiyonlarda hazırladıkları Al_2O_3 -etilen glikol ve CuO -etilen glikol nanoakışkanlarının ısı performanslarını türbülanslı akım şartlarında plakalı ısı eşanjörlerinde deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan deneylerde ısı transferinde %3 ile %49 arasında değişen iyileşmeler sağlandığı not edilmiştir.

2.5 Nanoakışkanların ısı iletkenliği

Temel ısı transferi akışkanlarının içine nano boyutlarda katı partiküllerin ilavesi ile oluşturulan nanoakışkanların ısı özellikleri temel akışkanınkinden ve katı partiküllerden oldukça farklıdır. Nanoakışkanların ısı özellikleri üzerine yapılan çalışmaların en çarpıcı sonucu ise çok küçük nanopartikül konsantrasyonlarında dahi nanoakışkanların şaşırtıcı mertebede yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip olmasıdır. Nanoakışkanların ısı iletim katsayılarını tam anlamıyla ifade eden özel teoriler henüz geliştirilmemiştir. Bu nedenle bir kısım araştırmacı tarafından iki fazlı karışımlara ait ısı iletkenlik katsayısı için önerilen değişik modellerin kullanılması yoluna gidilmiştir.

Mili veya mikro boyutlardaki küresel katı partiküllerden oluşan süspansiyonların ısı iletkenlik katsayılarını veren ilk ifade Maxwell (1881) tarafından geliştirilmiştir.

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} k_f \quad (2.2)$$

denklemdaki k_{eff} , k_p ve k_f sırasıyla süspansiyonun, katı partikülün ve temel akışkanın ısı iletkenlik katsayılarını göstermektedir. φ ise katı partiküllerin hacimsel fraksiyon değeridir. Maxwell denkleminde görüldüğü üzere süspansiyonun ısı iletim katsayısı sadece partikül ve temel akışkanın ısı iletkenlik katsayıları ve hacimsel fraksiyonun bir fonksiyonudur.

Hamilton ve Crosser (1962) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar ile küresel şekilli partiküller için kullanılan Maxwell denklemine şekil faktörünü ilave ederek farklı şekillerde katı partiküller içeren süspansiyonların ısı iletkenliklerini veren yeni bir ifade elde etmişlerdir.

$$k_{eff} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\varphi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \varphi(k_f - k_p)} k_f \quad (2.3)$$

buradaki n ampirik şekil faktörüdür ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (2.4)$$

denklemdaki ψ küresellik katsayısıdır ve partikül yüzey alanı ile partikül hacmine eşit bir kürenin yüzey alanının oranına eşittir. Hamilton ve Crosser denklemi $\psi = 1$ olduğu durumda Maxwell denklemine dönüşmektedir.

Nanoakışkanların ısı iletkenlikleri ile ilgili gerçekleştirilen ilk çalışmalarda ısı iletkenlikteki artışı belirlemek için bu denklemler kullanılmıştır. Lee *et al.* (1999), nanoakışkanların ısı iletkenliğini deneysel olarak araştırmışlar ve ısı iletkenliğin temel akışkanlara göre önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar Hamilton-Crosser denklemiyle karşılaştırılmış ve modelin Al_2O_3 nanoakışkanı için uygun sonuçlar verdiğini fakat CuO nanoakışkanı için yetersiz olduğu sonucuna varmışlardır. Choi *et al.* (2001), nanotüp-yağ süspansiyonlarında ısı iletkenliğin çok büyük ölçüde arttığını gözlemlemişler ve bu artışı ifade etmekte bu denklemlerin başarısız olduğu sonucuna varmışlardır. Murshed *et al.* (2005) silindirik ve küresel şekle sahip nano boyutlardaki TiO_2 partiküllerini suyun içine karıştırarak elde ettikleri nanoakışkanın ısı iletkenliğini deneysel olarak incelemişler ve buldukları sonuçları Hamilton-Crosser denkleminde elde edilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışmalarında %5 partikül hacimsel fraksiyonuna

karşılık ısı iletkenlikte suya göre %30'luk bir artış sağlamışlardır. Elde edilen bu deneysel artışın Hamilton-Crosser denklemiyle elde edilen artışa kıyasla oldukça yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Murshed *et al.* (2008) Al_2O_3 nanoakışkanlarının ısı iletkenliğini deneysel olarak araştırmışlar ve ısı iletkenlikteki artışı belirlemek için Maxwell ve Hamilton-Crosser denklemlerini kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre ısı iletkenliğin partikül hacimsel fraksiyonu ile önemli bir ölçüde arttığını gözlemlemişler ve bu artışı ifade etmekte Maxwell ve Hamilton-Crosser denklemlerinin yetersiz olduğu sonucuna varmışlardır. Literatürde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçlarına göre Maxwell ve Hamilton-Crosser denklemlerinin nanoakışkanların ısı iletkenliklerini belirlemede yetersiz olduğu görülmüştür. Bunun ana nedeni ise nano boyutlarda önem kazanan partikül ve temel akışkan arasındaki etkileşimlerin bu denklemlerde dikkate alınmamasıdır. Bundan dolayı nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayılarını ifade etmek üzere alternatif model arayışına başlanmıştır.

Yu ve Choi (2003), partikül-sıvı ara yüzeyindeki moleküler tabakalaşma kavramını kullanarak Maxwell denkleminde modifikasyon yapmışlar ve ısı iletkenlik katsayısını veren yeni bir ifade elde etmişlerdir. Moleküler tabakalaşma kavramına göre, temel akışkan ve katı nanopartiküllerin ara yüzeyinde moleküller arası kuvvetlerden dolayı h kalınlığında bir tabaka oluşmaktadır. Oluşan bu tabakanın termofiziksel özellikleri temel akışkan ve nanopartikülün termofiziksel özelliklerinin arasındadır. Yu ve Choi (2003) bu h kalınlığındaki tabaka ile katı nanopartikülü birleştirerek yeni bir efektif partikül tanımlamışlar ve bu partikülün ısı iletkenliğini efektif ortam teorisini kullanarak

$$k_{e,p} = \frac{\left[2(1-\gamma) + (1+\xi)^3(1+2\gamma) \right] \gamma}{-(1-\gamma) + (1+\xi)^3(1+2\gamma)} k_p \quad (2.5)$$

şeklinde elde etmişlerdir. Buradaki $\gamma = k_{\text{tabaka}}/k_p$ şeklindedir ve moleküler tabakanın ısı

iletkenliğinin partikül ısı iletkenliğine oranını göstermektedir. $\xi = h/r$ ise tabaka kalınlığının partikül yarıçapına oranını göstermektedir. Elde edilen bu ifadeler Maxwell denkleminde kullanılarak, nanoakışkanın ısı iletkenliğini

$$k_{nf} = \frac{k_{e,p} + 2k_f - 2\varphi(1+\xi)^3(k_f - k_{e,p})}{k_{e,p} + 2k_f + \varphi(1+\xi)^3(k_f - k_{e,p})} k_f \quad (2.6)$$

olarak bulmuşlar ve denklemden elde ettikleri sonuçlarını nanoakışkanlar için yapılmış pek çok deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve modellerinin nanoakışkanların ısı iletkenlik katsayısını ifade etmede oldukça başarılı olduğunu görmüşlerdir .

Xuan *et al.* (2003) nanoakışkanların ısı iletkenlikleri üzerindeki Brownian hareketinin ve partiküllerin kendi aralarında toplanıp kümelenmesinin etkilerini araştırmışlardır. Bu etkileri göz önüne alıp Maxwell denklemini modifiye ederek ısı iletkenlik için

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} k_f + \frac{\rho_p \varphi c_{p,p}}{2} \sqrt{\frac{k_b T}{3\pi r_c \mu_f}} \quad (2.7)$$

ifadesini türetmişlerdir. Buradaki ρ_p partikülün yoğunluğunu, $c_{p,p}$ partikülün özgül ısısını, k_b Boltzmann sabitini, T mutlak sıcaklığı, μ_f temel akışkan viskozitesini ve r_c ise kümelenen partiküllerin yarıçapını göstermektedir.

Koo ve Kleinstreuer (2005), nanoakışkanların ısı iletkenliği için partikül boyutu, hacimsel fraksiyon, sıcaklık ve Brownian hareketinin etkilerini içeren yeni bir ifade geliştirmişlerdir.

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} k_f + 5 \times 10^4 \beta(\varphi) \varphi \rho_p c_{p,p} \sqrt{\frac{k_b T}{\rho_p D}} f(T, \varphi) \quad (2.8)$$

denklemdaki D partikül çapıdır. $\beta(\varphi)$ ve $f(T, \varphi)$ ise deneysel verilerden eğri uydurma yöntemi ile türetilmiş fonksiyonlardır. Koo ve Kleinstreuer (2005) bu fonksiyonların yapılarını CuO nanoakışkanı için aşağıdaki şekilde vermiştir.

$$\beta(\varphi) = 0.0011(100\varphi)^{-0.7272} \quad (2.9)$$

$$f(T, \varphi) = (-6.04\varphi + 0.4705)T + (1722.3\varphi - 134.63) \quad (2.10)$$

Chon *et al.* (2005) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmanın sonuçlarına Buckingham-Pi teoremini uygulayarak Al_2O_3 nanoakışkanlarının ısı iletkenliği için ampirik bir bağıntı elde etmişlerdir.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7 \phi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.7476} \text{Pr}^{0.9955} \text{Re}_p^{1.2321} \quad (2.11)$$

buradaki d_f temel akışkanın moleküler çapı, d_p nanopartikülün çapıdır. Pr Prandtl sayısı, Re_p ise partikül Reynolds sayısıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilirler.

$$\text{Pr} = \frac{c_{p,f} \mu_f}{k_f}, \quad \text{Re}_p = \frac{\rho_f k_b T}{3\pi \mu_f^2 l_f} \quad (2.12)$$

buradaki $c_{p,f}$ temel akışkanın özgül ısısı, ρ_f temel akışkanın yoğunluğu ve l_f ise temel akışkanın molekülünün ortalama sabit yoludur ve değeri su için 0.17 nm'dir.

2.6 Nanoakışkanların viskozitesi

Nanoakışkanların ısı transferi performansını etkileyen diğer bir önemli parametre de viskozitedir. Isı transferi uygulamalarının çoğunda akışkan hareketini sağlamak için dışarıdan bir pompalama gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Nanoakışkanların kullanıldığı sistemlerde viskoziteden dolayı ihtiyaç duyulan pompalama gücünde ekstrasdan bir artış olmaktadır. Bu artış ısı iletkenlik katsayısında sağlanan artışın sistem üzerindeki olumlu etkilerini önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Nanoakışkanlarda viskozite, kullanılan partikülün malzemesi, boyutu, şekli, hacimsel fraksiyonu ve temel akışkan viskozitesi gibi faktörlerle önemli bir değişim göstermektedir. Literatürde nanoakışkanların viskozitesiyle ilgili birçok akademik çalışma gerçekleştirilmiştir. Murshed *et al.* (2008) Al_2O_3 -su ve TiO_2 -su nanoakışkanlarında partikül hacimsel fraksiyonun viskozite üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. %5'lik hacimsel fraksiyona karşılık Al_2O_3 -su ve TiO_2 -su nanoakışkanlarının viskozitelerinde sırasıyla %82 ve %86 oranında bir artışın gerçekleştiğini not etmişlerdir. Das *et al.* (2003) ve Putra *et al.* (2003) %1 ve %4 hacimsel fraksiyonlarında hazırladıkları Al_2O_3 -su nanoakışkanlarının Newtonyen bir davranış sergilediğini ve hacimsel fraksiyonun artmasıyla viskozitenin arttığını belirtmişlerdir. Nguyen *et al.* (2008) partikül boyutunun ve hacimsel fraksiyonun nanoakışkanların viskozitesi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Nanopartikülün boyutundaki azalma veya hacimsel fraksiyonun artmasıyla viskozitenin arttığını not etmişlerdir. Lu ve Fan (2008) farklı boyutlardaki Al_2O_3 nanopartiküllerini su ve etilen glikol içerisinde süspanse ederek oluşturdukları nanoakışkanların viskozitelerinin değişimini deneysel olarak incelemişlerdir. Nanoakışkan viskozitesinin partikül boyutunda gerçekleşen bir artışla azaldığını tespit etmişlerdir. Bunun yanında 30 nm'den büyük partiküller içeren nanoakışkanlarda viskozitenin artan partikül boyutundan fazla etkilenmediğini belirlemişlerdir.

Nanoakışkanların efektif mutlak viskozitesi iki fazlı karışımlar için önerilmiş modeller kullanılarak ifade edilmektedir. Katı küresel partiküller içeren süspansiyonların efektif viskozitesini veren ilk model Einstein (1906) tarafından geliştirilmiştir. Düşük hacimsel fraksiyonlar ($\varphi < \%2$) için geçerli olan bu model, viskozitenin partikül hacimsel fraksiyonu ile lineer bir şekilde değiştiği prensibine dayanmaktadır.

$$\mu_{eff} = \mu_f (1 + 2.5\varphi) \quad (2.13)$$

denklemdaki μ_{eff} süspansiyonun efektif viskozitesi, μ_f ise temel akışkanın viskozitesidir. Brinkman (1952) Einstein modelini genişleterek daha yüksek hacimsel fraksiyonlu süspansiyonlar için

$$\mu_{eff} = \mu_f (1 - \varphi)^{2.5} \quad (2.14)$$

denklemini elde etmiştir. Lundgren (1972) süspansiyonun viskozitesini hacimsel fraksiyonun fonksiyonu olarak Taylor serisine açarak

$$\mu_{eff} = \mu_f \left(1 + 2.5\varphi + \frac{25}{4}\varphi^2 + f(\varphi^3) \right) \quad (2.15)$$

ifadesini türetmiştir. Bunların yanında nanoakışkanların viskozitesiyle ilgili yapılmış deneysel çalışmalardan türetilen ampirik viskozite ifadeleri de mevcuttur. Chen *et al.* (2010) TiO₂-etilen glikol nanoakışkanı ile ilgili gerçekleştirdikleri deneysel çalışmanın verilerini kullanarak viskozite için

$$\mu_{nf} = \mu_f \left(1 + 10.6\varphi + (10.6\varphi)^2 \right) \quad (2.16)$$

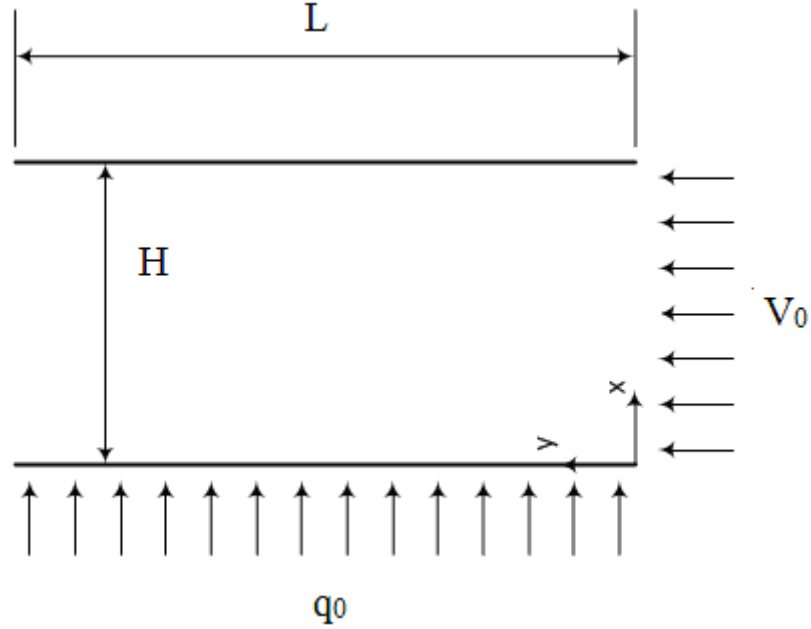
ifadesini önermişlerdir. Denklemdaki μ_{nf} nanoakışkan viskozitesini göstermektedir. Mai'ga *et al.* (2005) literatürdeki deneysel çalışmaların verilerine eğri uydurma işlemini uygulayarak Al₂O₃-su nanoakışkanının viskozitesini

$$\mu_{nf} = \mu_f (123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \quad (2.17)$$

Wen ve Ding (2004) gerçekleştirdikleri deneylerin sonuçlarına göre taşınım ile ısı transferinin Reynolds sayısı ve partikül hacimsel fraksiyonu ile belirgin bir şekilde arttığını belirtmişlerdir. Buna ek olarak ısı taşınımında gerçekleşen iyileşmenin borunun giriş bölgesinde daha fazla olduğuna dikkat çekmişlerdir. Hwang *et al.* (2009), tam gelişmiş laminar akış bölgesinde Al_2O_3 nanoakışkanlarının akış yapılarını ve taşınım ile ısı transferini incelemişler ve %0.3 nanopartikülün hacim fraksiyonuna karşılık ısı transfer katsayısında %8'lik bir artış kaydetmişlerdir. Buna ek olarak, ısı transfer katsayısındaki artışın ısı iletkenliğinde gerçekleşen artıştan fazla olduğuna ve literatürdeki tek fazlı temel akışkanlar için oluşturulmuş ısı transfer katsayısı korelasyonlarının bunu belirlemede yetersiz olduğuna dikkat çekmişlerdir. Heris *et al.* (2006), sabit duvar sıcaklığına sahip bir boruda laminar akım şartlarında Al_2O_3 nanoakışkanlarının taşınım ile ısı transferini incelemişler ve ısı transferinde nanopartikül hacim fraksiyonunun artmasıyla önemli bir artışın gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Bu artışın sadece ısı iletim katsayısındaki artış ile açıklanamayacağını rapor etmişlerdir. Bu çalışmada dikkat çeken diğer bir sonuç ise ısı transfer katsayısındaki artışın klasik ısı transfer katsayısı korelasyonlarından elde edilen değerlere göre daha yüksek olduğudur. Jung *et al.* (2009), bir mikrokanal içindeki nanoakışkanların ısı transfer katsayısını deneysel olarak ölçmüşler ve Al_2O_3 nanoakışkanları için sürtünme kayıplarında yüksek bir artış olmadan %1.8 nanopartikülün hacim fraksiyonunda ısı transfer katsayısında suya göre %32'lik bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Anoop *et al.* (2009), laminar akım şartlarında nanopartikül boyutunun nanoakışkanlarda taşınım ile ısı transferi üzerindeki etkisini incelemişler ve partikül boyutundaki azalma ile ısı transferinin geliştiğini gözlemlemişlerdir. Xuan ve Li (2003), türbülanslı akış şartlarında Cu nanoakışkanlarında taşınım ile ısı transferini araştırmışlar ve ısı transferinde nanopartikül kullanılması ile önemli bir gelişme olduğunu ve bu gelişmenin türbülanslı akım için oluşturulmuş klasik ısı transfer katsayısı korelasyonları tarafından belirlenemediğine dikkat çekmişlerdir.

3. NANOAKIŞKANLARDA ZORLANMIŞ TAŞINIM ANALİZİ

Bu bölümde nanoakışkanlarda zorlanmış taşınım analizini gerçekleştirmek üzere tek fazlı ve iki fazlı yaklaşımlardan faydalanılmış ve oluşturulan matematiksel modellerin her biri için kurucu denklemler elde edilmiştir. Nanoakışkan olarak Al_2O_3 -su karışımı kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan geometri ve koordinat sistemi Şekil 3.1'de verilmiştir. Nanoakışkanın aktığı mikrokanaletin yüksekliği H ve uzunluğu L 'dir. Kanalın genişliği yüksekliğine göre çok büyük kabul edilmiştir ve böylelikle akış analizi iki boyuta indirgenmiştir. Kanal alttaki yüzeyden sabit q_0 ısı akısına maruz kalmakta ve nanoakışkan kanala üniform bir V_0 hızında girmektedir. Kanalın üst yüzeyi ise adyabatik olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.1. Problem geometrisi

3.1 Tek Fazlı homojen model I

Bu modelde temel akışkan içinde süspansiyon edilmiş nanopartiküller çok küçük boyutlarda olduğu için kolayca akışkanlaştırılmaktadır. Temel akışkan ve nanopartikülün aynı hızda hareket ettiği ve termal dengede olduğu varsayılmaktadır. Böylece temel akışkanlar için kullanılan konvansiyonel ısı transfer denklemleri nanoakışkan uygulamaları için kullanılabilir hale gelmektedir. Nanopartiküllerin ısı transferi üzerindeki etkileri kurucu denklemlerde yer alan termodinamik parametrelerin değişimiyle belirtilmektedir. Yukarıda geometrisi verilen

mikrokanaldaki nanoakışkanın daimi, iki boyutlu ve laminar akışına ait kurucu denklemler tek fazlı homojen model kullanarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V) = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{nf} \nabla V) \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} c_{p,nf} V T) = -\nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) \quad (3.3)$$

Yukarıda V hız alanı, ∇ gradyen operatörü, p basınç ve T sıcaklıktır. ρ_{nf} , μ_{nf} , $(\rho c_p)_{nf}$ ve k_{nf} sırasıyla nanoakışkanın yoğunluğunu, viskozitesini, ısı kapasitesini ve ısı iletkenliğini temsil etmektedir.

Homojen modelin hassasiyetini belirlemede yukarıdaki denklemlerdeki termofiziksel özelliklerin doğru seçilmesi kritik bir öneme sahiptir ve literatürde nanoakışkanların termofiziksel özellikleri için bir çok ifade mevcuttur. Bu modelde kullanılan ifadeler aşağıdaki şekildedir.

Nanoakışkan yoğunluğu;

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (3.4)$$

nanoakışkan ısı kapasitesi;

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_p \quad (3.5)$$

nanoakışkan viskozitesi için (Brinkman, 1952);

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (3.6)$$

ve son olarak nanoakışkanın ısı iletkenliği için (Maxwell, 1873);

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} \quad (3.7)$$

İfadeleri kullanılmıştır. Denklemlerdeki φ nanopartiküllerin hacimsel fraksiyonu olup ve nf, f ve p alt indisleri ise sırasıyla nanoakışkan, temel akışkan ve nanopartikülü temsil etmektedir.

3.2 Tek Fazlı homojen model II

Nanoakışkanların ısı iletkenliği ve viskozitesini ifade etmek üzere önerilmiş özel teoriler henüz geliştirilmemiştir. Bu nedenle çoğu araştırmada bu terimleri belirlemek için mikrometre veya milimetre boyutunda katı parçacıklar içeren süspansiyonlar için önerilmiş ısı iletkenlik ve viskozite ifadeleri kullanılmaktadır. Bu ifadelerden elde edilen değerler deneysel verilerle uyumsuzluk içindedir. Bu uyumsuzluk nanoakışkanların ısı transfer uygulamalarını matematiksel olarak modellemek için kullanılan homojen modellerin geçerliliği üzerine en önemli handikapı oluşturmaktadır. Yukarıda verilen homojen modelde ısı iletkenlik ve viskozite terimleri için mikro boyutlardaki süspansiyonlar için geçerli ifadeler kullanılmıştır. Bu alt bölümdeki homojen modelde yukarıdaki kurucu denklemler yine geçerlidir fakat denklemlerdeki viskozite ve ısı iletkenlik terimleri literatürde nanoakışkanlar için oluşturulmuş ifadelerle belirtilmiştir. Sonuç olarak, homojen modellerde termofiziksel parametrelerin ısı transferi üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, nanoakışkan viskozitesi için (Ma'ga *et al*, 2005);

$$\mu_{nf} = \mu_f (123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \quad (3.8)$$

nanoakışkanın ısı iletkenliği için (Chon *et al*, 2005);

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7\varphi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.7476} \text{Pr}^{0.9955} \text{Re}_p^{1.2321} \quad (3.9)$$

alınmıştır. Yukarıda d_f temel akışkanın moleküler çapı, d_p nanopartikülün çapı, Pr Prandtl sayısı, Re_p ise partikül Reynolds sayısıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilirler.

$$\text{Pr} = \frac{c_{p,f} \mu_f}{k_f}, \quad \text{Re}_p = \frac{\rho_f k_b T}{3\pi \mu_f^2 l_f} \quad (3.10)$$

yukarıda k_b Boltzmann sabiti ve l_f ise temel akışkanın molekülünün ortalama sabit yoludur ve değeri su için 0.17 nm'dir.

3.3 Ayırık Faz Modeli

Bu alt bölümde iki fazlı yaklaşımdan faydalanarak oluşturulmuş ayırık faz modeli için kurucu denklemler elde edilecektir. Bu modelde temel akışkan sürekli faz olarak kabul edilmekte ve akış ve ısı transferi davranışları kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleriyle belirlenmektedir. Ayırık faz olarak tanımlanan nanopartiküllerin hareketi Newton'un ikinci hareket kanununa dayanan Lagrangian yaklaşımıyla ele alınmaktadır. Nanopartikülün hareket denklemleri hidrodinamik kuvvetleri, Brownian ve termoforez kuvvetlerini içermektedir. Sürekli faz ve ayırık faz arasındaki bağlantı ise Newton'un üçüncü hareket kanunu yoluyla sağlanmaktadır.

3.3.1 Temel Akışkan Fazı İçin Kurucu Denklemler

Sürekli faz olarak kabul edilen temel akışkan için kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\nabla \cdot (\rho_f V) = 0 \quad (3.11)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f V V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_f \nabla V) + S_m \quad (3.12)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f c_{p,f} V T) = -\nabla \cdot (k_f \nabla T) + S_e \quad (3.13)$$

buradaki S_m ve S_e sırasıyla akışkan ve partikül fazları arasındaki momentum ve enerji transferini gösteren kaynak terimleridir ve aşağıdaki şekilde ifade edilirler. (Tahir and Mital (2012))

$$S_m = \sum n \frac{m_p}{\delta g} \frac{dV_p}{dt} \quad (3.14)$$

$$S_e = \sum n \frac{m_p}{\delta g} c_{p,p} \frac{dT_p}{dt} \quad (3.15)$$

burada n nanopartiküllerin sayısını, m_p nanopartikül kütleini, $\delta\mathcal{G}$ kontrol hacmini, t zamanı, V_p ve T_p sırasıyla nanopartikül hızını ve sıcaklığını göstermektedir.

3.3.2 Nanopartikül Fazı İçin Kurucu Denklemler

Yukarıdaki denklemlerde yer alan nanopartikül hızı ve sıcaklığı ile ilgili bilgiler bu alt bölümden elde edilecektir. Bu amaçla Newton'un ikinci kanunundan faydalanarak nanopartikülün hareket denklemi;

$$\frac{dV_p}{dt} = F_D + F_G + F_B + F_T \quad (3.16)$$

şeklindedir. Yukarıda F_D partikül üzerine etki eden birim kütlede sürüklenme kuvvetidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir. (Ostberg ve Dam-Johansen, (1994)).

$$F_D = \frac{18\mu_f}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (3.17)$$

denklemdeki C_c Cunningham düzeltme terimidir.

$$C_c = 1 + \frac{2l_f}{d_p} \left(1.257 + 0.4e^{-\left(\frac{1.1d_p}{2l_f}\right)} \right) \quad (3.18)$$

F_G terimi ise partikül üzerine etki eden birim kütlede yerçekimi kuvvetidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$F_G = \frac{g(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} \quad (3.19)$$

yukarıda g yerçekimi ivmesidir.

F_B ise birim kütlede Brownian kuvvetidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir. (Levy *et al*, (1981) ve Li ve Ahmadi, (1992)).

$$F_B = G_i \left(\frac{216}{\pi} \frac{\nu_f k_b T}{\rho_p d_p^5 \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right)^2 C_c \Delta t} \right)^{1/2} \quad (3.20)$$

yukarıda G_i Gauss sayısıdır ve ν_f ise temel akışkanın kinematik viskozitesidir.

F_T birim kütlede termoforez kuvvetidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir. (Talbot, (1980)).

$$F_T = - \frac{6\pi d_p \mu_f^2 C_s (K + C_t Kn)}{\rho_p (1 + 3C_m Kn)(1 + 2K + 2C_t Kn) T} \nabla T \quad (3.21)$$

Yukarıda Kn Knudsen sayısı, K temel akışkan ve nanopartikülün ısı iletkenlik oranlarıdır, $K = k_f / k_p$, ve C_s , C_m ve C_t deneysel sabitlerdir ve değerleri sırasıyla $C_s = 1.17$, $C_m = 1.14$ ve $C_t = 2.18$ şeklindedir.

Nanopartikül fazı için enerji denklemi (Minkowycz *et al*, (2006) ve Das *et al*, (2008));

$$\rho_p c_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = \frac{6h}{d_p} (T - T_p) \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilir. Denklemdaki h nanopartikül yüzeyindeki ısı transfer katsayısıdır (Ranz ve Marshall, (1952));

$$\frac{hd_p}{k_f} = 2 + 0.6 \text{Re}_p^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \quad (3.23)$$

Re_p partikül çapı ve fazlar arasındaki kayma hızı esas alınarak hesaplanan Reynolds sayısıdır;

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_f d_p |V_f - V_p|}{\mu_f} \quad (3.24)$$

3.3.3 Karışım Modeli

Karışım modelinde temel akışkan ve nanopartikül fazlarının birbirine tam olarak karıştığı kabul edilir. Homojen modele benzer olarak süreklilik, momentum ve enerji denklemleri karışım için yazılır. Denklemlerdeki termodinamik parametreler karışımın ortalama özellikleri için değerlendirilir. Nanopartikül fazı için hacimsel fraksiyon denklemi kurucu denklemlere eklenir. Bunlara ek olarak fazlar arasındaki kayma hızı denklemlerde dikkate alınır. Böylelikle bu model için kurucu denklemler;

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m) = 0 \quad (3.25)$$

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m V_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_m \nabla V_m) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right) \quad (3.26)$$

$$\nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \rho_k c_{p,k} \varphi_k V_k T \right) = \nabla \cdot (k_m \nabla V_m) \quad (3.27)$$

$$\nabla \cdot (\varphi_p \rho_p V_m) = -\nabla \cdot (\varphi_p \rho_p V_{dr,p}) \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilir.

ρ_m karışım yoğunluğudur ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k \quad (3.29)$$

μ_m karışım viskozitesidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \varphi_k \mu_k \quad (3.30)$$

V_m karışımın ortalama hızıdır.

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k V_k}{\rho_m} \quad (3.31)$$

k_m karışımın ısı iletkenliğidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$k_m = \sum_{k=1}^n \varphi_k k_k \quad (3.32)$$

$V_{dr,k}$ k fazının sürüklenme hızıdır.

$$V_{dr,k} = V_k - V_m \quad (3.33)$$

Fazlar arasındaki kayma hızı ise

$$V_{pf} = V_p - V_f \quad (3.34)$$

şeklinde ifade edilir. Sürüklenme hızı ve kayma hızı ile aşağıdaki şekilde ilişkilendirilebilir.

$$V_{dr,p} = V_{pf} - \sum_{k=1}^n \frac{\varphi_k \rho_k}{\rho_m} V_{f,k} \quad (3.35)$$

Denklemdaki kayma hızı V_{pf} aşağıdaki ifadeden bulunur.

$$V_{pf} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} a \quad (3.36)$$

$$f_{drag} = 1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687} \quad (3.37)$$

a ise ivme terimidir ve

$$a = g - (V_m \cdot \nabla) V_m \quad (3.38)$$

şeklinde ifade edilir.

3.3.4 Euler - Euler Modeli

Bu modelde fazlar matematiksel olarak sürekli etkileşim içinde değerlendirilir. Fazların hacimsel fraksiyonlarının yer ve zamanın sürekli bir fonksiyonu ve toplamalarının 1'e eşit olduğu kabulü yapılır. Her bir faz için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri ayrı- ayrı çözülür. Fazlar arası momentum ve enerji transferleri kurucu denklemlere eklenen fazlar arası momentum ve enerji transfer terimleri ile bulunur. Bu terimler ampirik ifadelerden veya temel akışkan gaz fazında ise kinetik teoriden faydalanılarak oluşturulur. Bu model için kurucu denklemler her bir faz için aşağıdaki şekilde ifade edilir. (Kaltah *et al.* (2012))

$$\nabla \cdot (\rho_f \phi_f V_f) = 0 \quad (3.39)$$

$$\nabla \cdot (\rho_p \phi_p V_p) = 0 \quad (3.40)$$

$$\phi_f + \phi_p = 1 \quad (3.41)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f \phi_f V_f V_f) = -\phi_f \nabla p + \nabla \cdot (\mu_f \phi_f \nabla V_f) - K_{fp} (V_f - V_p) \quad (3.42)$$

$$\nabla \cdot (\rho_p \phi_p V_p V_p) = -\phi_p \nabla p + \nabla \cdot (\mu_p \phi_p \nabla V_p) - K_{fp} (V_p - V_f) \quad (3.43)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f c_{p,f} \phi_f V_f T_f) = \nabla \cdot (k_f \phi_f \nabla T_f) + h_{fp} (T_p - T_f) \quad (3.44)$$

$$\nabla \cdot (\rho_p c_{p,p} \phi_p V_p T_p) = \nabla \cdot (k_{eff,p} \phi_p \nabla T_p) + h_{fp} (T_f - T_p) \quad (3.45)$$

Denklemlerdeki μ_p terimi partikül viskozitesini göstermektedir. Nanopartiküller için türetilmiş bir viskozite terimi henüz literatürde bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında partikül viskozitesini belirlemek için nanoakışkan viskozitesinin;

$$\mu_{nf} = \varphi_f \mu_f + \varphi_p \mu_p \quad (3.46)$$

şeklinde olduğu varsayılmıştır. Bu kabul sayesinde, Al_2O_3 -su nanoakışkanının viskozitesi için Wang *et al.* (1999) ve Li ve Peterson (2007) tarafından gerçekleştirilmiş deneysel çalışmaların dataları baz alınarak eğri uydurma işlemi uygulanmış ve nanopartikül viskozitesi;

$$\mu_p = \left(79.1\varphi_p^3 - 3.917\varphi_p^2 + 0.0467\varphi_p + 0.005019 \right) g(\varphi_p) \quad (3.47)$$

şeklinde tanımlanmıştır. $g(\varphi_p)$ ifadesi denklemde radyal dağılım terimidir ve

$$g(\varphi_p) = \left(1 - \left(\frac{\varphi_p}{\varphi_{p,\max}} \right)^{1/3} \right)^{-1} \quad (3.48)$$

şeklindedir. (Savage,(1988)). Denklemdaki $\varphi_{p,\max}$ maksimum katı partikül yükleme sınırıdır ve üniform katı küreler için değeri $\pi / 3\sqrt{2}$ 'dir.

K_{fp} fazlar arası momentum transfer terimidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir (Wen ve Yu, (1966)).

$$K_{fp} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varphi_f \varphi_{ep} \rho_f |\vec{V}_p - \vec{V}_f|}{d_p} \varphi_f^{-2.65} \quad (3.49)$$

Yukarıdaki C_D sürüklenme katsayısıdır ve

$$C_D = \frac{24}{\varphi_f \text{Re}_p} \left[1 + 0.15 \left(\varphi_f \text{Re}_p \right)^{0.687} \right] \quad (3.50)$$

şeklindedir.

Katı nanopartikül fazı için yazılan enerji denklemindeki $k_{eff,p}$ terimi nanopartikülün efektif ısı iletkenliğini göstermektedir. Literatürde bulunan çift fazlı mikro boyuttaki süspansiyonlar için yapılmış çalışmalarda bu terimin ifadesinde akışkan yatak teorisinden faydalanılmıştır. Nano boyuttaki süspansiyonlarda moleküler kuvvetler önem kazandığı için akışkan yatak teorisinin geçerliliği sorgulanabilmektedir. Bu tez çalışmasında ısı iletkenlik için Yu ve Choi (2003) tarafından önerilen moleküler tabakalaşma kavramı kullanılmıştır. Buna göre, temel akışkan ve katı nanopartiküllerin ara yüzeyinde moleküller arası kuvvetlerden dolayı h kalınlığında bir tabaka oluşur. Bu tabakanın termofiziksel özellikleri temel akışkan ve nanopartikülün termofiziksel özelliklerinin arasındadır. Genel kabul olarak bu h kalınlığındaki tabaka ile katı nanopartikül birleştirilerek yeni bir efektif partikül tanımına gidilmiştir. Böylelikle nanopartikül boyutundaki değişiminden dolayı hacimsel fraksiyonda bir artış meydana gelmekte ve yeni hacimsel fraksiyon aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\varphi_{ep} = \varphi_p (1 + \xi)^3 \quad (3.51)$$

buradaki φ_{ep} terimi nanopartikül fazı için yeni hacimsel fraksiyonu göstermektedir. Sonuç olarak Euler - Euler modeli için yazılmış denklemlerdeki φ_p teriminin yerini φ_{ep} terimi alacaktır. $\xi = h/r$ ise tabaka kalınlığının partikül yarıçapına oranıdır. Tez çalışmasında, h değeri 1 nm olarak alınmıştır (Yu ve Choi, (2003)).

Moleküler tabakalaşma kavramını kullanarak nanopartikülün efektif ısı iletkenliği

$$k_{eff,p} = \frac{\left[2(1 - \gamma) + (1 + \xi)^3 (1 + 2\gamma) \right] \gamma}{-(1 - \gamma) + (1 + \xi)^3 (1 + 2\gamma)} k_p \quad (3.52)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklemdaki $\gamma = k_{tabaka}/k_p$ şeklindedir ve moleküler tabakanın ısı iletkenliğinin partikül ısı iletkenliğine oranını göstermektedir. Moleküler tabakanın ısı iletkenliği (Xie *et al*, (2005))

$$k_{tabaka} = \frac{k_f M^2}{(M - \xi) \ln(1 + M) + \xi M}, \quad M = \varepsilon_p (1 + \xi) - 1, \quad \varepsilon_p = k_p/k_f \quad (3.53)$$

şeklindedir.

Enerji denklemlerindeki h_{fp} terimi fazlar arasındaki enerji transferini göstermektedir. Bu tez çalışmasında h_{fp} terimi (Ranz ve Marshall, (1952)) ;

$$h_{fp} = \frac{6k_f \phi_f \phi_p Nu_p}{d_p^2}, \quad Nu_p = 2 + 0.6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.54)$$

şeklinde belirtilmiştir. Buradaki Nu_p , Re_p ve Pr ifadeleri sırasıyla partikül yüzeyindeki Nusselt sayısını, partikül boyutu baz alınarak oluşturulmuş Reynolds sayısını ve temel akışkanın Prandtl sayısını göstermektedir.

3.4 Sayısal Analiz

Nanoakışkanların zorlanmış taşınım analizini gerçekleştirmek üzere her bir model için elde edilen kurucu denklemlerin sayısal çözümü bu bölümde yapılacaktır. Kurucu denklemler içlerindeki taşınım terimleri nedeniyle lineer olmayan bir yapıdadırlar. Bunları çözmek için ilk olarak denklemlerin cebirsel denklemlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Başka bir deyişle ayrıklaştırma olarak bilinen bu işlem, bu çalışmada Sonlu Hacimler Metodu ile gerçekleştirilmiştir.

3.4.1 Sonlu Hacimler Metodu

Sonlu hacimler metodunda kısmi diferansiyel denklemler kontrol hacmi üzerinden integre edilir. Bu hacim integrasyonundaki diverjans içeren terimler diverjans teoremi yardımı ile yüzey integrallerine dönüştürülür. Dönüştürülen bu integraller her bir sonlu hacim yüzeyindeki akılar olarak değerlendirilir. Bir hacme giren akı miktarı ona komşu hacimden çıkan akı miktarına eşit olacağından yöntem korunumlu bir yöntemdir. Bu yöntemi kısaca açıklamak için kontrol hacmi içinde genel bir değişken olarak ϕ 'yi düşünelim ve bu değişken için korunum denklemi;

$$\nabla \cdot (\rho \phi V) = \nabla \cdot (D \nabla \phi) + S_\phi \quad (3.55)$$

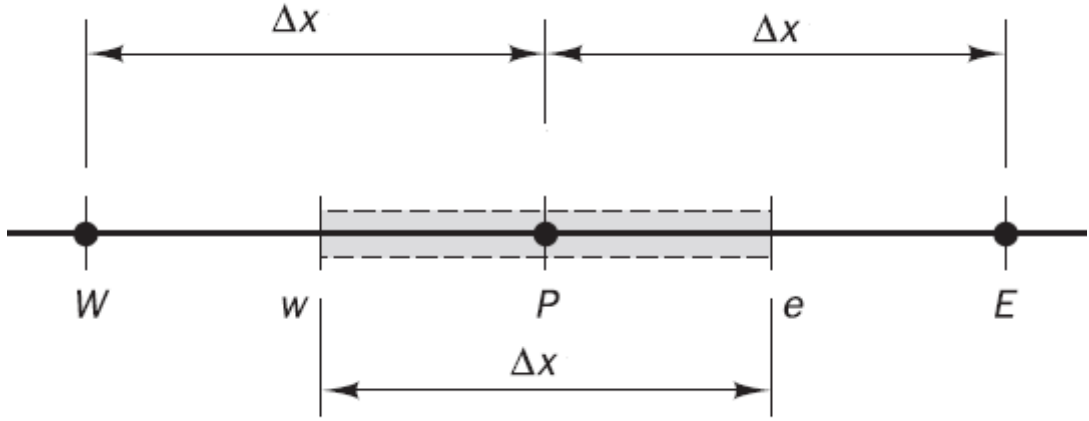
şeklinde ifade edilir. Denklemdaki D terimi difüzyon katsayısını ve S terimi kontrol hacmi içindeki ϕ özelliğinin üretimini göstermektedir. Bu denklemi kontrol hacmi üzerinden integre edersek;

$$\int_{\mathcal{V}} \nabla \cdot (\rho \phi V) d\mathcal{V} = \int_{\mathcal{V}} \nabla \cdot (D \nabla \phi) d\mathcal{V} + \int_{\mathcal{V}} S_{\phi} d\mathcal{V} \quad (3.56)$$

şeklini alır. Yukarıdaki integrasyonlara diverjans teoremini uygularsak;

$$\int_A n \cdot (\rho \phi V) dA = \int_A n \cdot (D \nabla \phi) dA + \int_{\mathcal{V}} S_{\phi} d\mathcal{V} \quad (3.57)$$

şeklini alır. Denklemdaki n yüzeyin normalini göstermektedir. Şekil 3.2'de gösterildiği üzere bir boyutlu üniform grid ve P düğüm noktası etrafındaki kontrol hacmi için denklem (3.57)'yi ele alırsak;



Şekil 3.2. Bir boyutlu kontrol hacmi ve grid yapısı

$$(\rho V A \phi)_e - (\rho V A \phi)_w = \left(D A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(D A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w + S_{\phi} \Delta \mathcal{V} \quad (3.58)$$

şeklini alır. $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ terimi için merkezi fark yaklaşımını kullanırsak ve $A_e = A_w = A$ olduğunu kabul edersek, yukarıdaki denklem;

$$(\rho V \phi)_e - (\rho V \phi)_w = \left(D \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} \right) - \left(D \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} \right) + S_{\phi} \Delta x \quad (3.59)$$

halini alır. Kontrol hacmi sınırlarındaki değerler için lineer interpolasyonu kullanırsak;

$$\phi_e = \frac{\phi_P + \phi_E}{2} \quad (3.60)$$

$$\phi_w = \frac{\phi_W + \phi_P}{2} \quad (3.61)$$

elde edilir. Bu değerler denklem (3.56)'da yerine konursa ayrıklaştırılmış ifade;

$$\frac{D}{\Delta x} \left[2 - \rho \left(\frac{V_w - V_e}{2} \right) \right] \phi_P = \left[\frac{D}{\Delta x} + \rho \frac{V_w}{2} \right] \phi_W - \left[\frac{D}{\Delta x} - \rho \frac{V_e}{2} \right] \phi_E + S_\phi \Delta x \quad (3.62)$$

şeklinde elde edilir. İki ve üç boyutlu problemler içinde ayrıklaştırma bir boyutlu durumdakine benzer şekilde elde edilebilir. Sonlu hacimler metodu ile birlikte bu tez çalışmasında momentum denklemlerindeki basınç-hız çiftini çözmek için SIMPLE iteratif çözüm algoritması kullanılmıştır.

SIMPLE algoritmasında başlangıçta bir basınç alanı tahmin edilir (p^*) , bu tahmin edilen basınç alanı ile ayrıklaştırılmış momentum denklemleri çözülür ve buna karşılık gelen hızlar (u^*, v^*) bulunur. Daha sonra bir düzeltme basınç alanı (p') tanımlanır. Düzeltme basınç alanı doğru basınç alanıyla tahmini basınç alanı arasındaki farktır.

$$p = p^* + p' \quad (3.63)$$

Buna benzer olarak hız düzeltme alanları da tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} u &= u^* + u' \\ v &= v^* + v' \end{aligned} \quad (3.64)$$

Gerçek ayrıklaştırılmış denklemlerden, tahmini basınç alanını koyarak elde ettiğimiz denklemleri çıkarırsak, düzeltme hız alanını düzeltme basınç alanının fonksiyonu olarak elde edebiliriz. Bu durum

$$\begin{aligned} u' &= f(p') \\ v' &= f(p') \end{aligned} \quad (3.65)$$

şeklinde gösterilebilir. Böylelikle doğru hız alanı da, tahmini hız alanı ile düzeltme basınç alanına bağlı fonksiyonunun toplamı haline gelir. Bütün bu adımlar sadece bir iterasyon döngüsünü ifade eder ve yakınsama kriterleri sağlanıncaya kadar döngü devam eder.

3.4.2 Sınır Şartları ve Grid Bağımsızlığı

Her bir model için oluşturulmuş kurucu denklemler, giriş ve sınır şartları ile çözümlenir. Hesaplama bölgesinde problemin çözümü için girişte üniform hız ve sıcaklık şartı, duvarlarda kaymama koşulu ve çıkış bölgesinde sabit basınç şartı tanımlanmıştır. Isıl sınır şartlar ise üst duvar adyabatik kabul edilirken alttaki duvarda üniform bir ısı akısı olduğu varsayılmıştır. Fluent yazılım programı ile yapılan iterasyonlar sonucunda süreklilik, momentum ve enerji denklemleri uygun yakınsama kriterleri sağlanarak çözümler elde edilmiştir. Sonuçlar iki boyutsuz parametre üzerinden değerlendirilmiştir. Problem girdisi için boyutsuz sayı Reynolds sayısıdır ve;

$$Re = \frac{\rho_f V_0 D_h}{\mu_f} \quad (3.66)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklemdaki D_h kanalın hidrolik çapıdır.

Problem çıktısı için boyutsuz sayı Nusselt sayısıdır ve;

$$Nu = \frac{h D_h}{k_f} \quad (3.67)$$

şeklindedir. Buradaki h ısı taşınım katsayısıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir;

$$h = \frac{q_0}{(T_w - T_m)} \quad (3.68)$$

T_w ısıtılan yüzeyin duvar sıcaklığı iken T_m ortalama akışkan sıcaklığıdır.

Sayısal analiz sonucunun doğru elde edilmesi için uygun grid yapısının oluşturulması çok önemlidir. Uygun oluşturulmayan grid yapısı, sonucun ıraksamasına veya hatalı olmasına neden olacaktır. Bu amaçla, farklı grid sayılarına bağlı olarak ısıtılan yüzey üzerindeki ortalama Nusselt sayılarının değişimine bakılmış ve bunlar Tablo 3.1' de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Grid sayısına bağılı olarak ortalama Nusselt sayısının değişimi

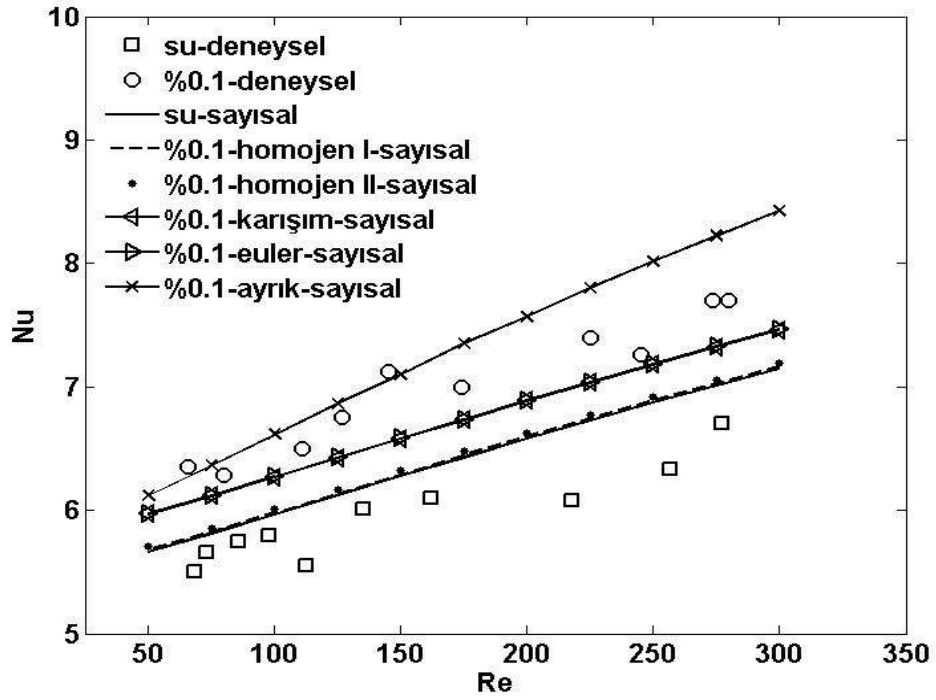
x yönündeki grid sayısı	y yönündeki grid sayısı	Nu
100	10	6.7011
250	30	6.6781
300	50	6.6235
400	50	6.5802
500	100	6.5768
800	200	6.5767

Yapılan denemeler sonucunda x ve y doğrultularındaki grid sayılarının sırasıyla 400 ve 50'den daha fazla artırılması durumunda sonucun fazla etkilenmediği görülmüştür. Bu nedenle çözüm alanın grid yapısı 400x50 şeklinde seçilmiştir.

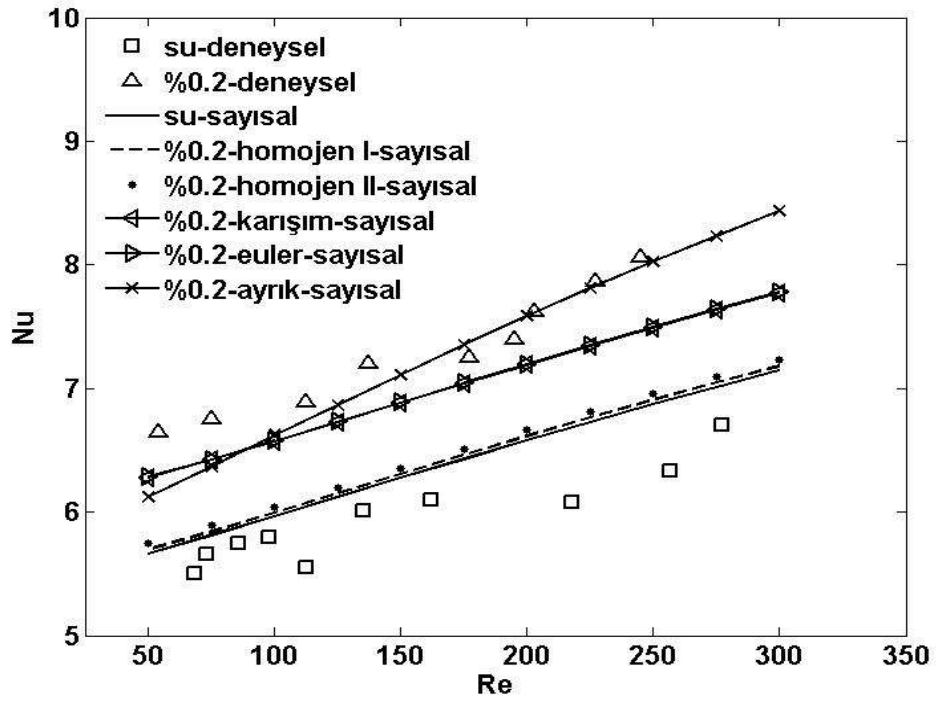
3.5 Analiz Sonuçları

Bu bölümde, elde edilen sayısal çalışma sonuçları ile literatürde yer alan deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın gerçekleştirilebilmesi için Kalteh *et al.* (2012) tarafından bulunan deneysel sonuçlar ile sayısal analiz sonuçları aynı grafik üzerinde gösterilecektir. Bu grafik Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi biçiminde çizdirilmiştir.

Şekil 3.3 ve 3.4'te nanoakışkanlar için oluşturulmuş matematiksel modellerin sayısal sonuçları ile Kalteh *et al.* (2012)'nin deneysel sonuçları farklı nanopartikül hacimsel fraksiyonları için karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.3. DeneySEL ve sayısal sonuçların karşılaştırılması $\phi_p = \%0.1$



Şekil 3.4. DeneySEL ve sayısal sonuçların karşılaştırılması $\phi_p = \%0.2$

Bütün modeller için ısıtılan yüzey üzerindeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile arttığı görülmektedir. Bu teorik olarak beklenen bir sonuçtur. Tek fazlı yaklaşımla oluşturulmuş homojen modellerin deneysel sonuçlara yakınsayamadığı net olarak şekillerde gözükmemektedir. Buna ek olarak homojen model I ve homojen model II eğrileri dikkate alındığında, nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini belirlemede kullanılan ifadelerin değişiminin zorlanmış taşınım üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuç nanoakışkanlarda ısı transferinin gelişmesinde termofiziksel özellikler yanında başka mekanizmalarında rol aldığı açık bir delili olarak ortaya çıkmaktadır.

İki fazlı yaklaşımla oluşturulmuş ayrık faz, karışım ve Euler-Euler modellerinin homojen modellere kıyasla deneysel sonuçlara yakın sonuçlar verdiği şekillerden açıkça görülmektedir. Detaylı bir inceleme için önce karışım modelini ele alalım. Bilindiği üzere karışım modelinde homojen modele benzer olarak süreklilik, momentum ve enerji denklemleri karışım için yazılmakta ve fazlar arası oluşan kayma hızı dikkate alınmaktadır. Kayma hızı ihmal edildiğinde bu model homojen modele dönmektedir. Sonuç olarak bu modeldeki temel etkiyi fazlar arasındaki kayma hızı oluşturmaktadır. Tablo 3.2'de karışım modelindeki kayma hızının farklı nanopartikül hacimsel fraksiyonlarında ve Reynolds sayılarında ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkileri verilmiştir.

Tablo 3.2. Karışım modelinde kayma hızının ortalama Nusselt sayısına etkisi

ϕ_p	Re	Nu	Nu,Homojen I Kayma yok	Nu, Homojen I
0.5	100	7.4783	7.4781	6.0404
2.0	100	12.0560	12.0550	6.2900
3.0	100	15.1092	15.1071	6.4606
0.5	150	7.7901	7.7900	6.3574
0.5	200	8.1041	8.1041	6.6674

Tablo 3.2'den görüldüğü üzere Nusselt sayısı bütün durumlar için hacimsel fraksiyon ve Reynolds sayısının artmasıyla artmaktadır. Bununla birlikte kayma hızının farklı fraksiyon değerleri ve Reynolds sayıları için ihmal edilmesinin Nusselt sayısı üzerinde bir etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir. Buna rağmen karışım modeli homojen modele kıyasla bütün durumlarda daha yüksek bir Nusselt sayısı vermektedir. Bu durum karışım modelinde nanoakışkanın ısı iletkenliğinin belirlenmesinde kullanılan denklem (3.32)'teki karışım kuralından kaynaklanmaktadır. Bu denkleme göre küçük hacimsel fraksiyon değerlerinde bile nanoakışkan ısı iletkenliği deneysel verilere (Lee *et al.* (1999), Xuan ve Lie (2000), Choi *et al.* (2001)) kıyasla yüksek çıkmakta bu da ısı transferinde gerçekçi olmayan bir artışa sebep

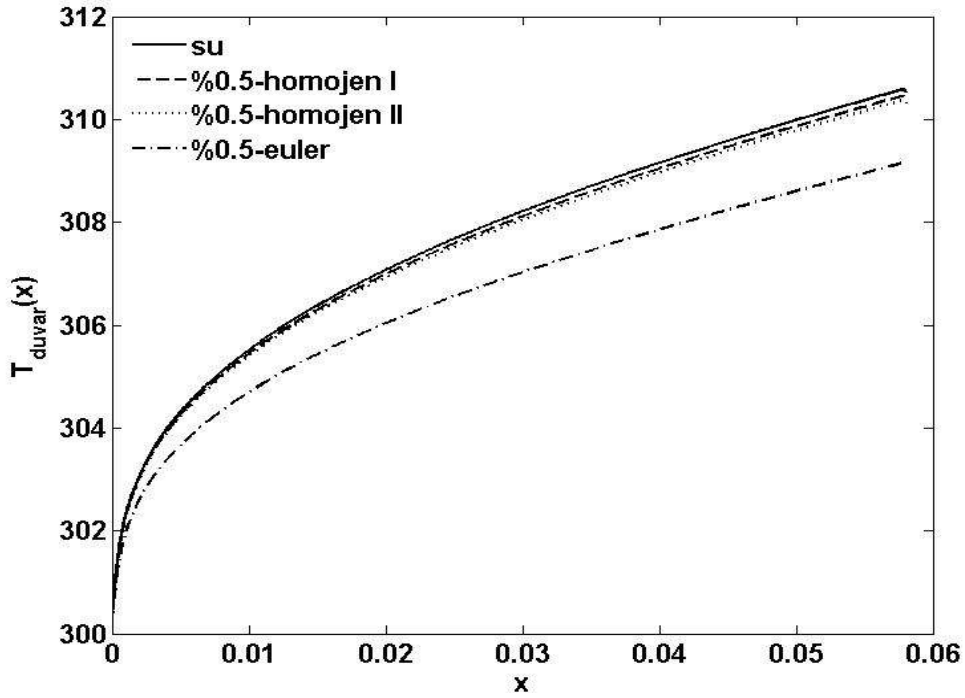
olmaktadır. Bu nedenle zorlanmış ısı transferinde, karışım modelinin nanoakışkan davranışını ifade etmekte başarısız olduğu sonucuna varılmıştır.

Ayrık faz modelinin farklı Reynolds sayıları ve hacimsel fraksiyon değerleri için deneysel sonuçlara tatmin edici bir şekilde yakınsadığı yine Şekil 3.3 ve 3.4'ten açık bir şekilde görülmektedir. Tablo 3.3'te ayrık faz modeli için gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.3. Ayrık faz modeli ve homojen modelin farklı hacimsel fraksiyon değerleri ve Reynolds sayıları için karşılaştırılması

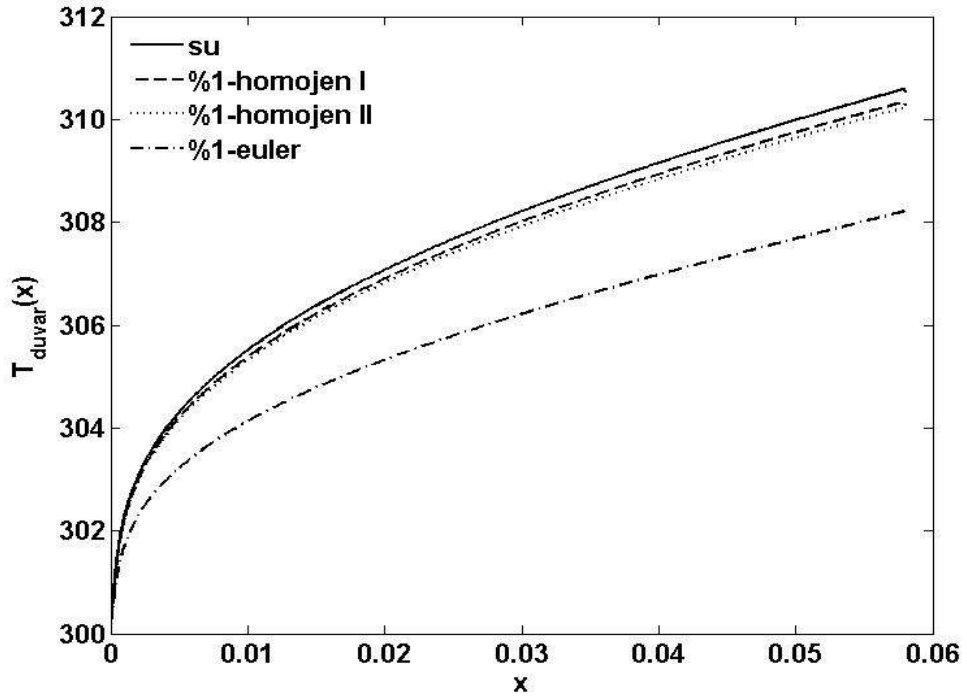
ϕ_p	Re	Nu, Ayrık faz	Nu, Homojen I
0.5	100	6.6240	6.0404
2.0	100	6.6361	6.2900
3.0	100	6.6457	6.4606
0.5	150	7.1168	6.3574
0.5	200	7.5931	6.6674

Tablo 3.3'ten görüldüğü üzere ayrık faz modeli için hacimsel fraksiyonun artması ısı transferinde önemli bir değişime neden olmamaktadır. Isı transferi kuvvetli bir biçimde Reynolds sayısına bağlı kalmaktadır. Buna benzer bir sonucu da Tahir ve Mital (2012) ayrık faz modelini kullanarak gerçekleştirdikleri teorik çalışmada elde etmişlerdir. Nanoakışkanlarda zorlanmış ısı transferini inceleyen deneysel çalışmalarda ise ayrık faz modelinin tersine ısı transferinin kuvvetli bir biçimde hacimsel fraksiyona bağlı kaldığı vurgulanmıştır. Deneysel verilerle çelişki içinde kalması bu modelin en önemli handikabı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumun partikül ve temel akışkan fazları arasındaki momentum ve enerji transferini tanımlayan ifadelerin nano boyutlar için uygun olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle ayrık faz modelinin de nanoakışkan davranışını ifade etmekte başarısız olduğu sonucuna varılmıştır.



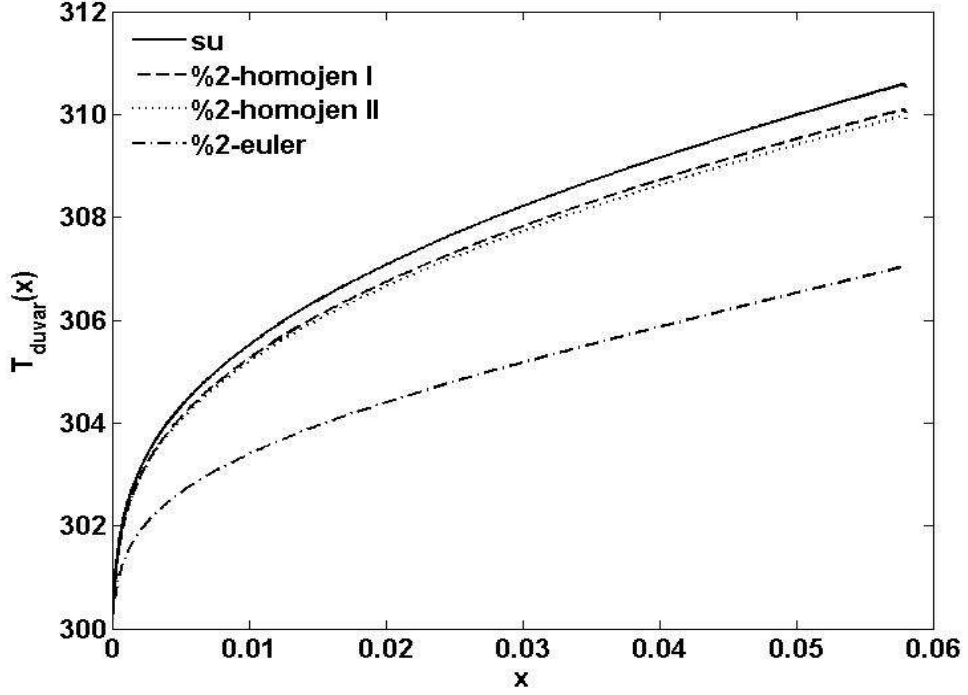
Şekil 3.5. Nanopartikül hacimsel fraksiyonunun $\phi_p = \%0.5$ olduğu durumda duvar sıcaklığının değişimi ($Re = 200$, $q_0 = 20.5kW$)

Şekil 3.3 ve 3.4'ten görüldüğü üzere Euler-Euler modeli deneysel verilere yakın sonuçlar vermektedir. Bu model diğer iki fazlı modellerden farklı olarak bünyesinde ısı transferi için farklı mekanizmalar barındırmaktadır. Bunlardan en önemlisi partikül ve akışkan fazları arasındaki mikro konveksiyon mekanizmasıdır. Zira nanopartiküller küçük boyutlarından dolayı önemli bir ısı transferi yüzeyine sahiptirler. Bundan dolayı partikül ve temel akışkan arasındaki ısı transferinin yoğunluğu artmakta ve nanoakışkanlarda ısı transferi gelişmektedir. Her bir model için yapılan ayrıntılı araştırmalardan sonra iki fazlı yaklaşımlardan Euler-Euler modelinin nanoakışkan davranışını en iyi ifade eden model olduğu sonucuna varılmıştır. Tez çalışmasının bundan sonraki kısmında Euler-Euler modeli ile tek fazlı homojen modellerin kıyaslaması yapılacak ve bu iki yaklaşımın farkları detaylı bir biçimde ortaya konulacaktır.



Şekil 3.6. Nanopartikül hacimsel fraksiyonunun $\varphi_p = \%1$ olduğu durumda duvar sıcaklığının değişimi ($Re = 200$, $q_0 = 20.5kW$)

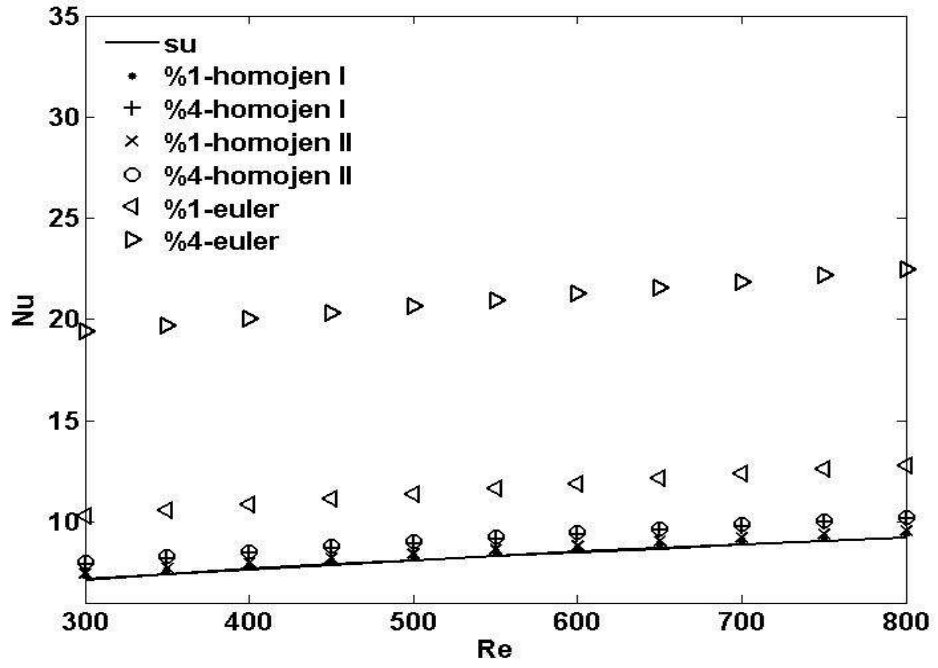
Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7’de her iki homojen model ve Euler-Euler modeli için farklı hacimsel fraksiyonlarda ve sabit bir Reynolds sayısında ısıtılmış yüzeyin duvar sıcaklığının değişimi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere her bir model için hacimsel fraksiyonun artmasıyla duvar sıcaklığı düşmektedir. Bu düşüş Euler modelinde daha belirgindir. Küçük hacimsel fraksiyon değerlerinde homojen modellerdeki sıcaklık düşüşü ihmal edilebilecek seviyelerde gerçekleşmektedir.



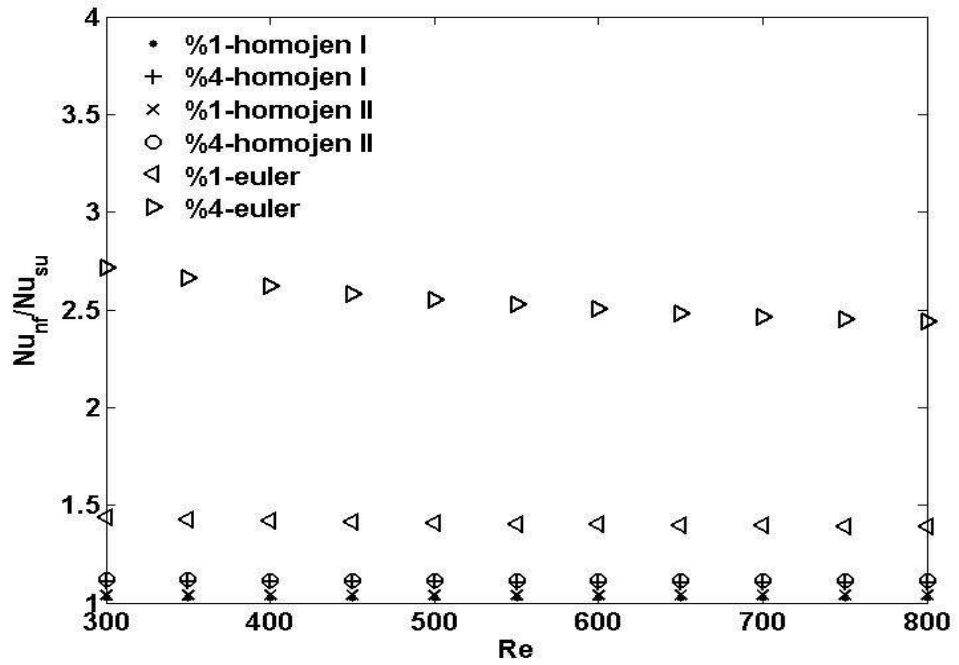
Şekil 3.7. Nanopartikül hacimsel fraksiyonunun $\varphi_p = \%2$ olduğu durumda duvar sıcaklığının değişimi ($Re = 200$, $q_0 = 20.5kW$)

Şekil 3.8'de ısıtılmış yüzey üzerindeki ortalama Nusselt sayısının her iki homojen model ve Euler modelleri için farklı hacimsel fraksiyon değerlerinde Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Beklendiği gibi bütün modeller için Reynolds sayısının artmasıyla ısı transferi gelişmekte ve Nusselt sayısı artmaktadır. Yine şekilden görüldüğü üzere hacimsel fraksiyondaki artış ısı transferine olumlu bir şekilde yansımaktadır. Bununla birlikte ısı transferinde Euler modeliyle kaydedilen gelişme homojen modellere kıyasla daha fazladır ve her iki homojen model neredeyse aynı sonuçlar vermektedir.

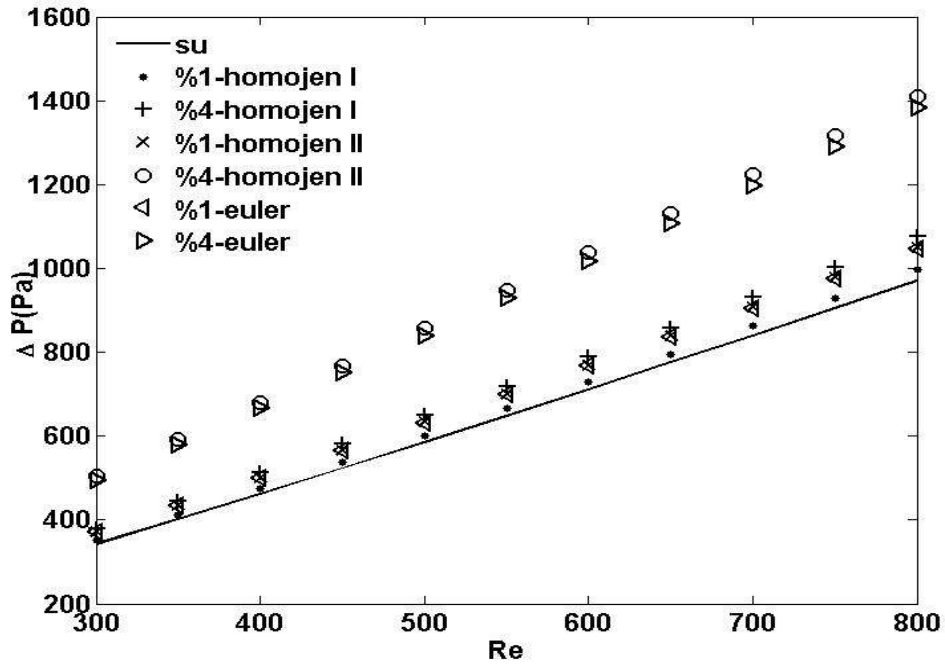
Şekil 3.9'da suyun ortalama Nusselt sayılarına göre normalize edilmiş nanoakışkan ortalama Nusselt sayılarının Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere normalize edilmiş Nusselt değerleri Reynolds sayısı ile azalmaktadır. Bununla birlikte bütün modeller benzer bir azalma trendi göstermektedir.



Şekil 3.8. Isıtılmış yüzeydeki ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi
($q_0 = 20.5kW$)



Şekil 3.9. Suya göre normalize edilmiş nanoakışkan ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi ($q_0 = 20.5kW$)



Şekil 3.10. Kanal boyunca gerçekleşen basınç düşüşünün Reynolds sayısına göre değişimi

Şekil 3.10'da mikrokanaalda oluşan basınç düşüşünün farklı modeller ve hacimsel fraksiyonlarda Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Buna göre her bir model için Reynolds sayısının artmasıyla basınç düşüşü artmaktadır. Bununla birlikte nanopartikül hacimsel fraksiyonundaki bir artış nanoakışkanın viskozitesini artırdığından dolayı basınç düşüşü hacimsel fraksiyonla artmaktadır. Yine şekilden görüldüğü üzere yüksek hacimsel fraksiyon değerlerinde homojen model II ve Euler modelinde gerçekleşen basınç düşüşleri homojen model I'e kıyasla daha yüksektir. Bu fark modellerde kullanılan viskozite ifadelerinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak düşük hacimsel fraksiyon değerlerinde ısı transferinin aksine basınç düşüşü için bütün modellerde birbirine yakın sonuçlar elde edilmektedir.

Tablo 3.4'de Euler ve homojen modellerde suya göre basınç düşüşü ve ısı transferinde gerçekleşen artışların yüzdelik değerleri sabit bir Reynolds sayısı ve farklı hacimsel fraksiyon değerleri için verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere homojen modellerde ısı transferinde gerçekleşen artış basınç düşüşünde meydana gelen artıştan daha düşüktür. Bu durum homojen model II'de daha açık bir şekilde görülmektedir. Bu da nanoakışkanların homojen modellerle ifade edildiği zaman ısı transferini iyileştirdikleri konusunu sorgulanabilir hale getirmekte ve literatürdeki deneysel çalışmalarla çelişkiyi göstermektedir.

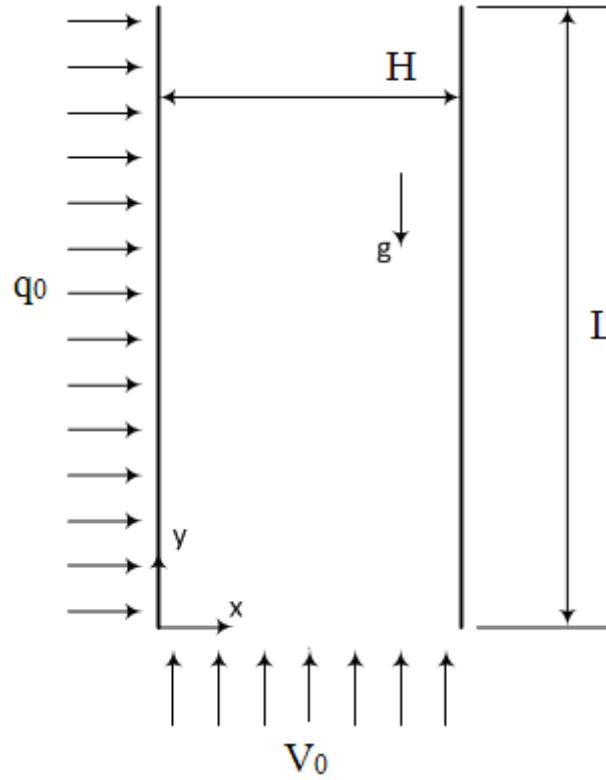
Tablo 3.4. Euler ve homojen modellerde suya göre basınç düşüşü ve ısı transferindeki artışların yüzdelik değerleri (Re=500)

	Homojen I		Homojen II		Euler	
$\% \varphi_p$	$\% \Delta P$	$\% Nu$	$\% \Delta P$	$\% Nu$	$\% \Delta P$	$\% Nu$
0.5	1,264173	1,295007	3,790111	2,312513	3,72864	20,69699
1.0	2,540538	2,587702	8,165838	3,945147	7,862854	40,66554
1.5	3,854127	3,903522	13,11557	5,395093	12,16985	60,19471
2.0	5,179276	5,212404	18,63833	6,73635	16,6113	79,43713
2.5	6,528842	6,542099	24,73473	8,001295	21,34076	98,49918

Euler modelinde ise ısı transferinde kaydedilen artışlar basınç düşüşüne göre daha fazladır. Sonuç olarak nanoakışkanların ısı transferi uygulamalarındaki performansını ifade etmekte bu model daha uygun durmaktadır. Bununla birlikte bu model yüksek hacimsel fraksiyon değerleri için deneysel sonuçlara kıyasla ısı transferinde daha büyük artışlar vermektedir. Literatürde yapılan incelemeler sonucu bu modelin küçük hacimsel fraksiyon değerleri için nanoakışkan davranışını başarılı bir şekilde ifade ettiği sonucuna varılmıştır.

4. NANOAKIŞKANLARDA KARIŞIK TAŞINIM ANALİZİ

Bu bölümde Al_2O_3 -su nanoakışkanının karışık taşınım analizi homojen model I ve Euler modeli kullanılarak küçük hacimsel fraksiyon değerleri için gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan geometri ve koordinat sistemi Şekil 4.1'de verilmiştir. Buna göre nanoakışkan dikey doğrultudaki kanala alt taraftan üniform bir V_0 hızında girmektedir. Kanal genişliği H ve yüksekliği L 'dir. Kanalın sol yüzeyine üniform bir ısı akısının etki ettiği sağ yüzeyinin ise yalıtımlı olduğu kabulü yapılmıştır. Nanoakışkanın termofiziksel özellikleri momentum denklemindeki kaldırma kuvveti ifadesi içindeki yoğunluk terimi haricinde sabit kabul edilmiştir. Yerçekimi kuvvetinin negatif y doğrultusunda etki ettiği varsayılmıştır.



Şekil 4.1. Problem geometrisi

4.1 Tek Fazlı homojen model I

Daimi, iki boyutlu ve laminar akım şartı altındaki nanoakışkanların karışık taşınımını belirten kurucu denklemler homojen model yardımıyla aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V) = 0 \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} V V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{nf} \nabla V) + \rho_{nf} g \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} c_{p,nf} VT) = -\nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) \quad (4.3)$$

denklemdaki g yerçekimi ivmesidir. Momentum denkleminin sağ tarafındaki en son terim yoğunluk farkından dolayı oluşan kaldırma kuvvetini göstermektedir. Buradaki yoğunluk ifadesi değişken olarak kabul edilmiştir. Bu değişimi ifade etmek için Boussinesq yaklaşımı kullanılmıştır. Boussinesq yaklaşımı;

$$\rho_{nf} = \rho_{nf,0} [1 - \beta_{nf} (T - T_0)] \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki T_0 nanoakışkanın kanala giriş sıcaklığıdır. $\rho_{nf,0}$ ise akışkanın giriş sıcaklığındaki yoğunluğudur. β_{nf} ise ısı genleşme katsayısıdır. Boussinesq yaklaşımının geçerliliği Laaroussi *et al.* (2009) tarafından araştırılmıştır. Bu araştırmada sıcaklık farkı 20 dereceden az ise yaklaşımın geçerli olduğu sonucuna varılmıştır. Böylece tez çalışmasındaki ısı akıları bu sonuç dikkate alınarak düzenlenmiştir.

Bu modelde kullanılan nanoakışkanın termofiziksel özellikleri aşağıdaki şekildedir.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_p \quad (4.5)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho c_p)_f + \varphi (\rho c_p)_p \quad (4.6)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho \beta)_f + \varphi (\rho \beta)_p \quad (4.7)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (4.8)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} \quad (4.9)$$

4.2 Euler - Euler Modeli

Bu model için kurucu denklemler her bir faz için aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\nabla \cdot (\rho_f \varphi_f V_f) = 0 \quad (4.10)$$

$$\nabla \cdot (\rho_p \varphi_p V_p) = 0 \quad (4.11)$$

$$\varphi_f + \varphi_p = 1 \quad (4.12)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f \varphi_f V_f V_f) = -\varphi_f \nabla p + \nabla \cdot (\mu_f \varphi_f \nabla V_f) - K_{fp} (V_f - V_p) + \varphi_f \rho_f g \quad (4.13)$$

$$\nabla \cdot (\rho_p \varphi_p V_p V_p) = -\varphi_p \nabla p + \nabla \cdot (\mu_p \varphi_p \nabla V_p) - K_{fp} (V_p - V_f) + \varphi_p \rho_p g \quad (4.14)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f c_{p,f} \varphi_f V_f T_f) = \nabla \cdot (k_f \varphi_f \nabla T_f) + h_{fp} (T_p - T_f) \quad (4.15)$$

$$\nabla \cdot (\rho_p c_{p,p} \varphi_p V_p T_p) = \nabla \cdot (k_{eff,p} \varphi_p \nabla T_p) + h_{fp} (T_f - T_p) \quad (4.16)$$

Denklemlerdeki μ_p terimi partikül viskozitesidir ve

$$\mu_p = (79.1\varphi_p^3 - 3.917\varphi_p^2 + 0.0467\varphi_p + 0.005019) g(\varphi_p) \quad (4.17)$$

şeklinde tanımlanmıştır. $g(\varphi_p)$ ifadesi denklemde radyal dağılım terimidir ve

$$g(\varphi_p) = \left(1 - \left(\frac{\varphi_p}{\varphi_{p,\max}} \right)^{1/3} \right)^{-1} \quad (4.18)$$

şeklindedir. (Savage,(1988)). Denklemdaki $\varphi_{p,\max}$ maksimum katı partikül yükleme sınırıdır ve üniform katı küreler için değeri $\pi / 3\sqrt{2}$ 'dir.

K_{fp} fazlar arası momentum transfer terimidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir (Wen ve Yu, (1966)).

$$K_{fp} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varphi_f \varphi_{ep} \rho_f |\vec{V}_p - \vec{V}_f|}{d_p} \varphi_f^{-2.65} \quad (4.19)$$

burada C_D sürüklenme katsayısıdır ve

$$C_D = \frac{24}{\varphi_f \text{Re}_p} \left[1 + 0.15 (\varphi_f \text{Re}_p)^{0.687} \right] \quad (4.20)$$

şeklindedir.

$k_{eff,p}$ terimi nanopartikülün efektif ısı iletkenliğini göstermektedir. Moleküler tabakalaşma kavramını kullanarak nanopartikülün efektif ısı iletkenliği

$$k_{eff,p} = \frac{\left[2(1-\gamma) + (1+\xi)^3 (1+2\gamma) \right] \gamma}{-(1-\gamma) + (1+\xi)^3 (1+2\gamma)} k_p \quad (4.21)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklemdaki $\gamma = k_{tabaka} / k_p$ şeklindedir ve moleküler tabakanın ısı iletkenliğinin partikül ısı iletkenliğine oranını göstermektedir. Moleküler tabakanın ısı iletkenliği (Xie *et al*, (2005))

$$k_{tabaka} = \frac{k_f M^2}{(M - \xi) \ln(1 + M) + \xi M}, \quad M = \varepsilon_p (1 + \xi) - 1, \quad \varepsilon_p = k_p / k_f \quad (4.22)$$

şeklindedir.

Enerji denklemlerindeki h_{fp} terimi fazlar arasındaki enerji transferini göstermektedir. Bu tez çalışmasında h_{fp} terimi (Ranz ve Marshall, (1952)) ;

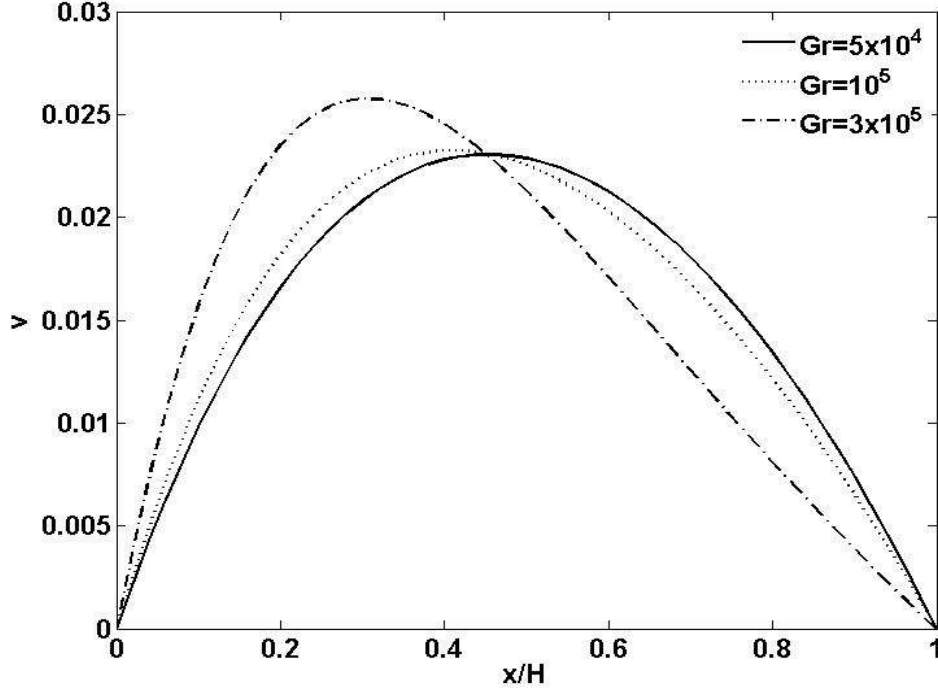
$$h_{fp} = \frac{6k_f \varphi_f \varphi_p Nu_p}{d_p^2}, \quad Nu_p = 2 + 0.6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.23)$$

şeklinde ifade edilmiştir

4.3 Analiz Sonuçları

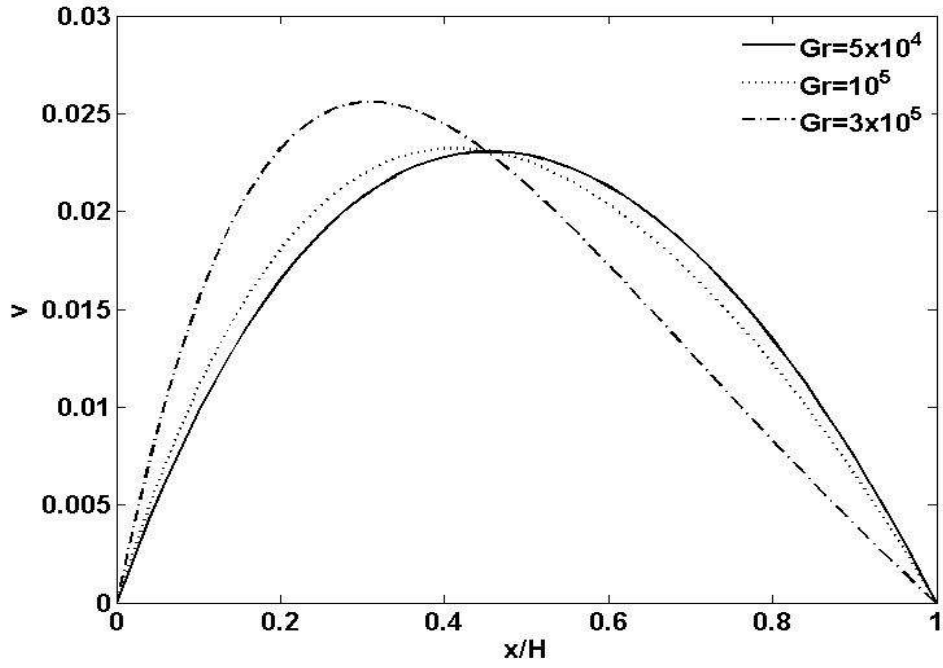
Nanoakışkanların karışık taşınım analizini gerçekleştirmek üzere her bir model için elde edilen kurucu denklemlerin sayısal çözümü bölüm 3'de kullanılan sayısal yöntemle yapılmıştır. Bununla birlikte hesaplama alanının grid yapısı ve sınır şartları yine bölüm 3'de kullanılanlarla aynıdır. Bölüm 3'de kullanılan boyutsuz sayılara ek olarak bu bölümde Grashof sayısı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$Gr = \frac{g \beta_f q_w D_h^4}{k_f \nu_f^2} \quad (4.24)$$

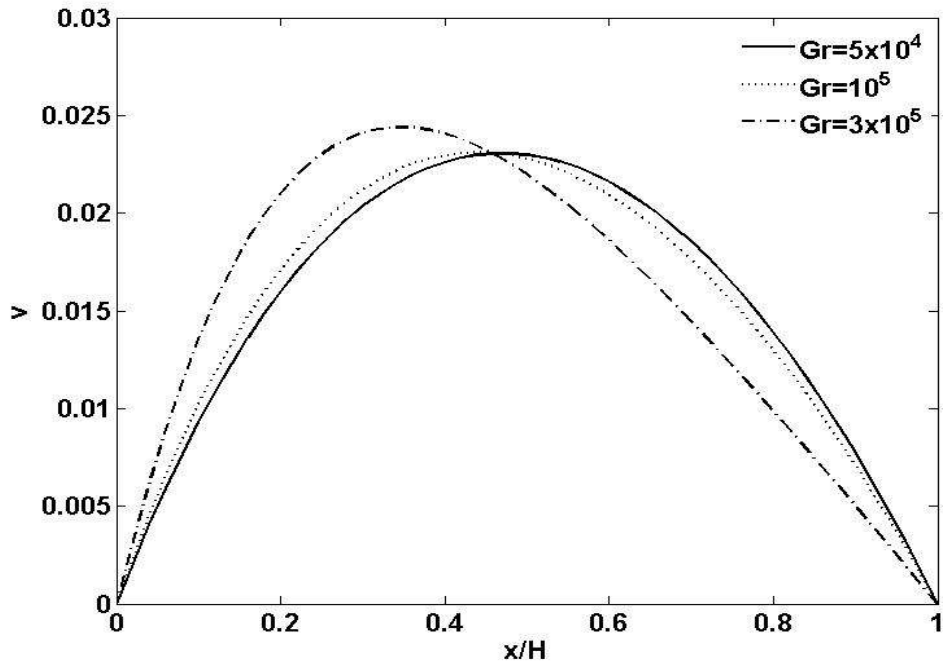


Şekil 4.2. Su için farklı Grashof sayılarında tam gelişmiş hız profilinin değişimi ($Re = 400$)

Şekil 4.2'de su için tam gelişmiş hız profilinin farklı Grashof sayılarına göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.3 ve 4.4'te ise hacimsel fraksiyon değerinin %0.8 olduğu durum için sırasıyla homojen ve Euler modellerindeki hız profilleri gösterilmiştir. Bütün şekiller sabit bir Reynolds sayısı için çizdirilmiştir. Görüldüğü üzere her iki model için elde edilen hız profilleri suda elde edilen hız profiline benzemektedir. Bununla birlikte temel akışkanın içine nanopartikül ilave edilmesinin hız profilleri üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Yine şekillerden görüldüğü üzere homojen modelde elde edilen maksimum hız değerleri Euler modeline kıyasla daha fazladır. Bütün durumlar için Grashof sayısının artmasıyla maksimum hız değeri ısıtılmış yüzeye doğru kaymakta ve kaldırma kuvvetinden dolayı hız profillerindeki simetri bozulmaktadır.

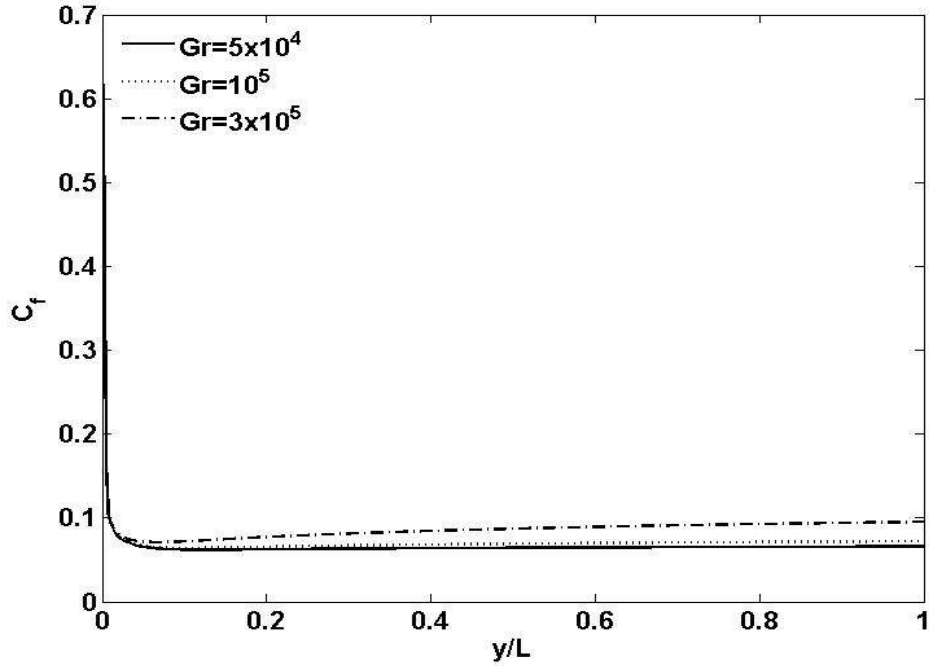


Şekil 4.3 Homojen model I için hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda farklı Grashof sayılarında tam gelişmiş hız profilinin değişimi ($Re = 400$)

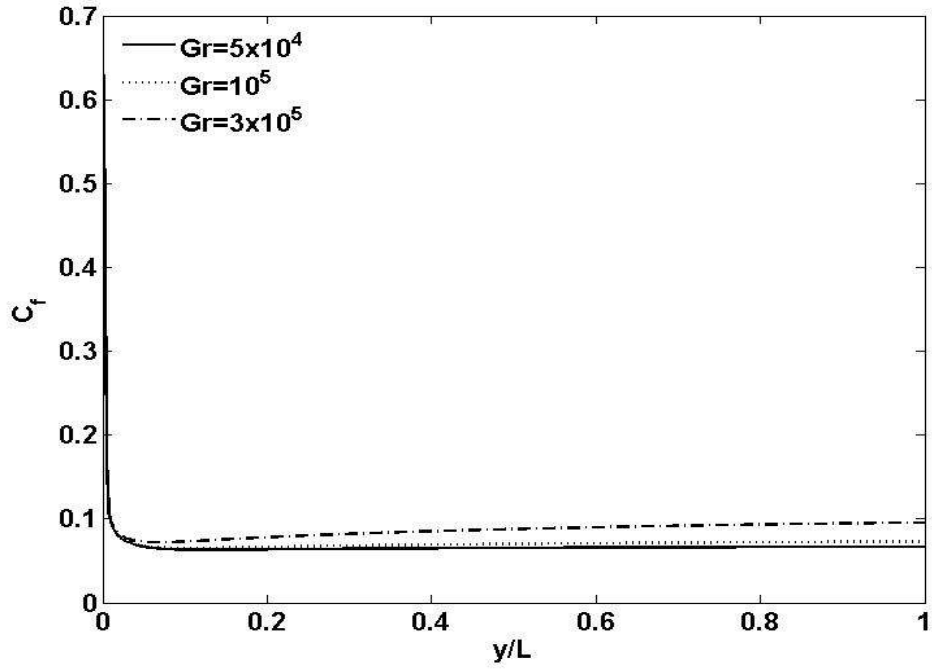


Şekil 4.4 Euler modeli için hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda farklı Grashof sayılarında tam gelişmiş hız profilinin değişimi ($Re = 400$)

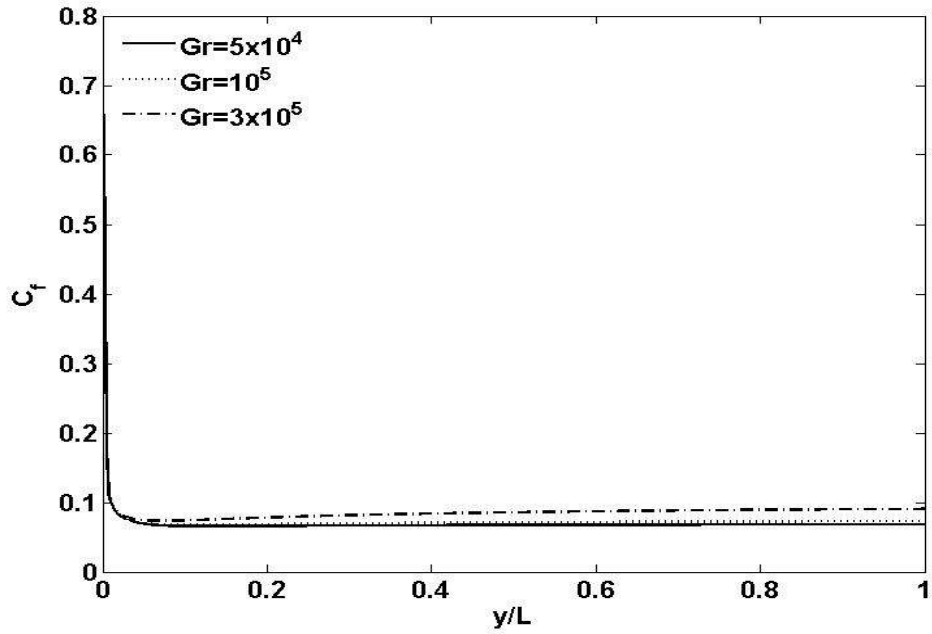
Şekil 4.5'te su için lokal sürtünme katsayısının farklı Grashof sayılarına göre değişimi verilmiştir. Şekil 4.6 ve 4.7'te ise hacimsel fraksiyon değerinin %0.8 olduğu durum için sırasıyla homojen ve Euler modellerindeki lokal sürtünme katsayısı gösterilmiştir. Bütün şekiller sabit bir Reynolds sayısı için çizdirilmiştir. Görüldüğü üzere düşük hacimsel fraksiyonlarda lokal sürtünme katsayısının değerleri sudaki değerlere çok yakındır. Isı transferini geliştirme uygulamalarında bu durum nanoakışkanların dikkat çeken özelliklerinden biridir. Bununla birlikte homojen ve Euler modelleri birbirlerine çok yakın sonuçlar vermektedir. Böylece nanoakışkanların hidrodinamik davranışlarını karakterize etmede tek fazlı ve çift fazlı yaklaşımlar arasında önemli bir fark olmadığı sonucu çıkarılabilmektedir. Kanalin giriş bölgesi geçildikten sonra Grashof sayısının artmasıyla lokal sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. Bu artış artan Grashof sayısı ile önem kazanan kaldırma kuvvetlerinin hız alanı üzerindeki etkilerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.5. Su için farklı Grashof sayılarında lokal sürtünme katsayısının değişimi ($Re = 400$)

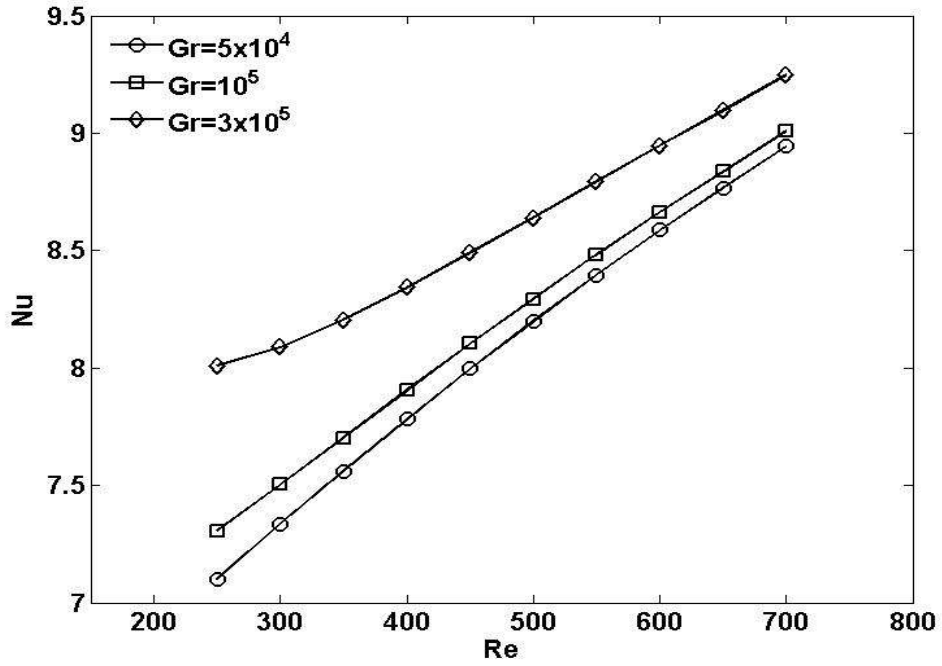


Şekil 4.6 Homojen model I için hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda farklı Grashof sayılarında lokal sürtünme katsayısının değişimi ($Re = 400$)

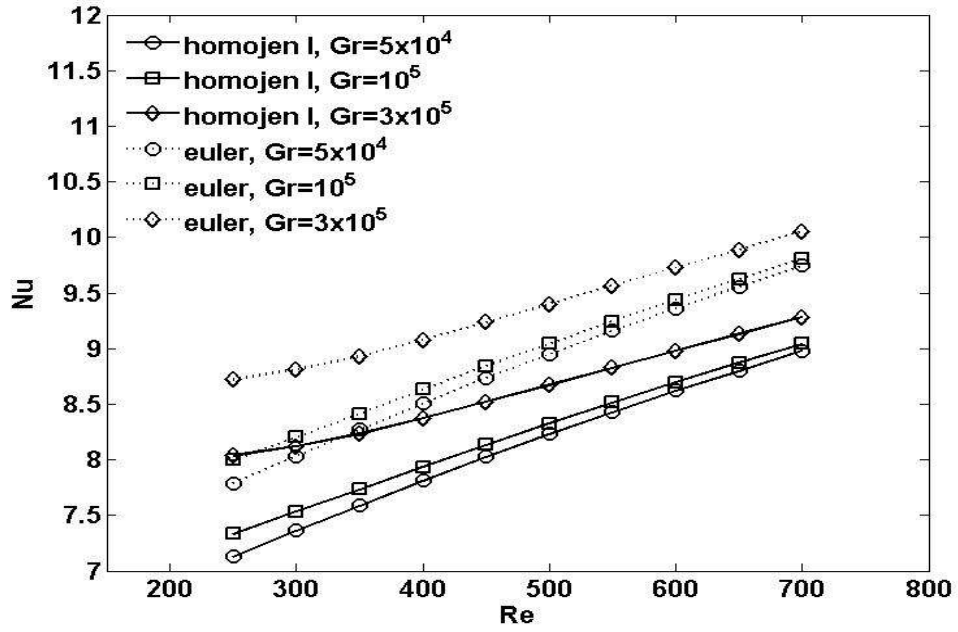


Şekil 4.7 Euler modeli için hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda farklı Grashof sayılarında lokal sürtünme katsayısının değişimi ($Re = 400$)

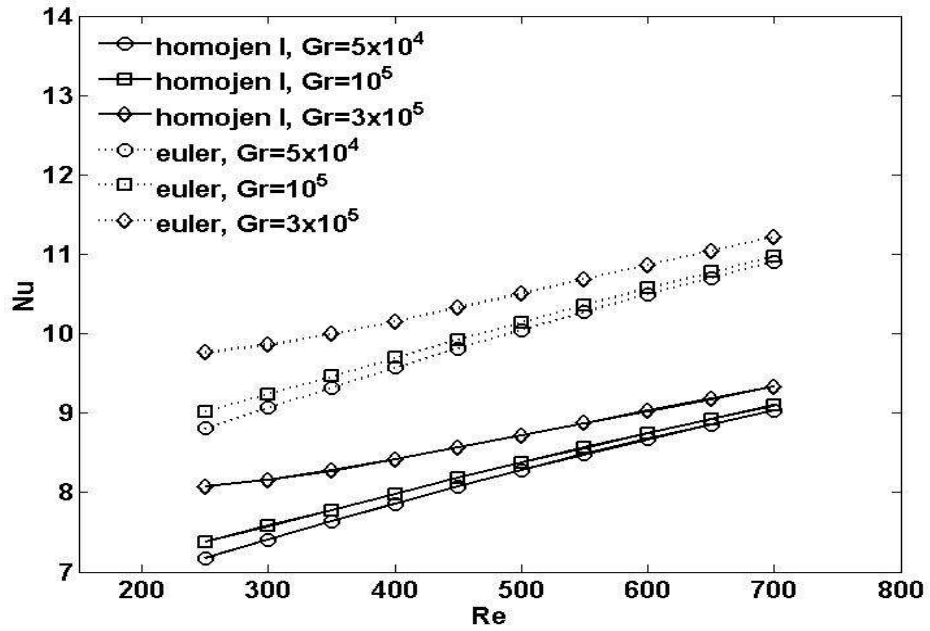
Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11'de farklı hacimsel fraksiyon değerleri ve Grashof sayılarında homojen ve Euler modelleri için ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere temel akışkan suya yapılan nanopartikül ilavesi ısı transferini arttırmaktadır. Bu artış Euler modeli için homojen modele kıyasla daha belirgindir. Bu durumun Euler modelinde dikkate alınan mikrotaşınım etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira nanopartiküller düşük hacimsel fraksiyonlarda bile küçük boyutlarından dolayı önemli bir ısı transfer yüzey alanına sahiptirler ve buda temel akışkan ve nanopartikül arasındaki ısı transferi yoğunluğunu önemli bir ölçüde artırmaktadır. Bununla birlikte Grashof sayısının artmasıyla Nusselt sayısının her bir durum için arttığı görülmektedir. Bu artış küçük Reynolds sayılarında daha fazla göze çarpmaktadır. Zorlanmış taşınımın baskın olduğu bölgede Nusselt sayısı Reynolds sayısı ile lineer bir şekilde artar iken doğal taşınımın baskın olduğu bölgelerde bu artışın lineer olmayan bir yapıda olduğu yine şekillerden görülmektedir.



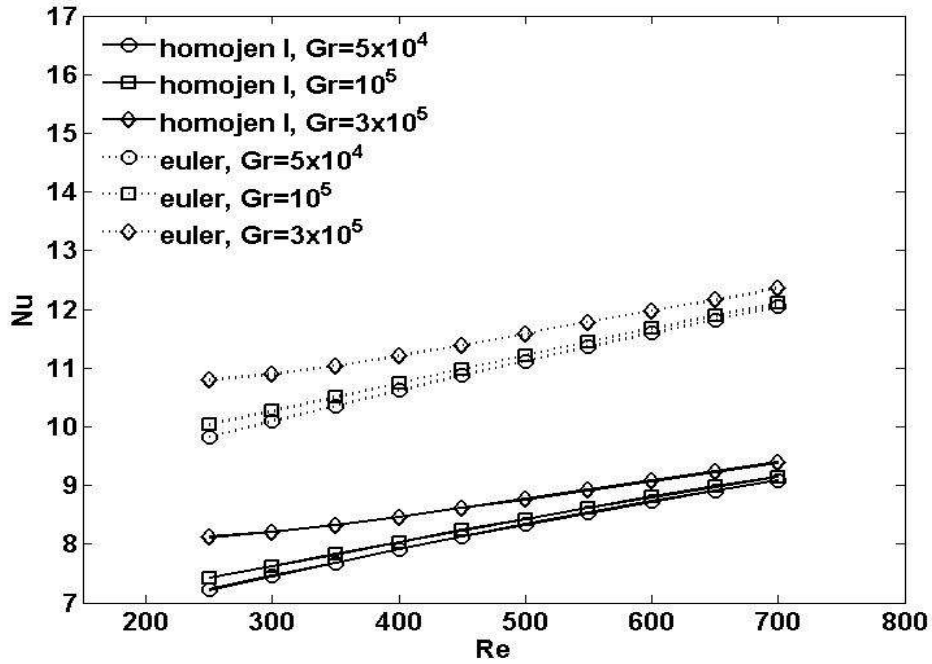
Şekil 4.8 Su için farklı Grashof sayılarında ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil 4.9 Hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.2$ olduğu durumda homojen ve Euler modelleri için farklı Grashof sayılarında ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil 4.10 Hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.5$ olduğu durumda homojen ve Euler modelleri için farklı Grashof sayılarında ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil 4.11 Hacimsel fraksiyonun $\varphi_p = \%0.8$ olduğu durumda homojen ve Euler modelleri için farklı Grashof sayılarında ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısına göre değişimi

Tablo 4.1'de çeşitli hacimsel fraksiyon değerleri ve iki farklı Reynolds sayısı için homojen ve Euler modellerinde suya göre ısı transferinde gerçekleşen yüzdelik artışlar verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere her iki modelde de Reynolds sayısının artmasıyla ısı transferindeki yüzdelik artışlarda bir azalma görülmektedir. Bu durum nanoakışkanın yüksek viskozitesinden kaynaklanmaktadır. Zira verilen bir Reynolds sayısında nanoakışkanın sınır tabakası suya kıyasla daha kalın olmakta bu da ısı transfer performansında tablodaki gibi bir düşüşe neden olmaktadır. Yine tablodan görüldüğü üzere Euler modelinde kaydedilen artışlar homojen modelden daha fazladır ve literatürde yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına daha yakındır.

Tablo 4.1. Farklı hacimsel fraksiyon değerlerinde homojen ve Euler modellerinde suya göre ısı transferinde gerçekleşen yüzdelik artışlar ($Gr=10^5$)

	Re=200		Re=500	
% ϕ_p	Homojen I	Euler	Homojen I	Euler
0.1	0,188105	4,512455	0,164362	4,299625
0.2	0,389867	8,675641	0,361756	8,246076
0.3	0,580557	12,47344	0,557719	11,84494
0.4	0,774937	15,94276	0,753683	15,14486
0.5	0,969318	19,1525	0,945356	18,18158
0.6	1,160008	22,11496	1,138459	20,99087
0.7	1,350697	24,86704	1,331561	23,59275
0.8	1,545078	27,42597	1,524664	26,0187
0.9	1,734537	29,80283	1,713476	28,28015
1.0	1,922766	32,0382	1,903718	30,39713

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında nanoakışkanların hidrodinamik ve ısı transferi davranışlarını matematiksel olarak modellemek için iki temel yaklaşım kullanılmıştır. İlk olarak bir kanal içinde akan nanoakışkanın zorlanmış taşınımı ele alınmıştır. İki temel yaklaşım temel alınarak oluşturulmuş matematiksel modellerden nanoakışkanların zorlanmış taşınım analizi için kurucu denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler sayısal olarak çözülmüş ve literatürde yer alan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmalar yapılmıştır. Daha sonra nanoakışkan davranışına uygun görülen modellerle nanoakışkanın karışık taşınım analizi gerçekleştirilmiştir. Bunlara göre tek fazlı yaklaşımdan faydalanılarak oluşturulan homojen modellerin nanoakışkanların zorlanmış taşınımını ifade etmekte başarısız olduğu görülmüştür. Ayrıca homojen modellerdeki nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini belirten ifadelerin değişmesinin nanoakışkanın ısı performansını üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır. Bundan hareketle nanoakışkanlarda ısı transferinin gelişmesinde termofiziksel özelliklerin yanında başka mekanizmalarında varlığının kanıtı yapılmıştır. İki fazlı yaklaşımlardan oluşturulmuş karışım ve ayrık faz modellerinin de nanoakışkanlarda başarısız olduğu görülmüştür. Bütün kullanılan modeller içinde nanoakışkan davranışına en yakın modelin Euler modeli olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan detaylı karşılaştırmalardan sonra nanoakışkanların hidrodinamik davranışlarını karakterize etmede homojen modeller ile Euler modelinin birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bundan dolayı her iki modelinde hidrodinamik analiz için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu iki modelin ısı transfer sonuçları ise birbirinden oldukça farklı bulunmuştur.

Nanoakışkanlarda taşınım ile ısı transferi ile ilgili literatürde gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar detaylı incelendikten sonra Euler modelinin düşük hacimsel fraksiyonlarda tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür. Yüksek hacimsel fraksiyonlarda ise bu model deney sonuçlarına kıyasla ısı transferi için daha büyük değerler vermektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için temel akışkan ve partikül arasındaki ısı transferini ifade eden mikro taşınım ifadeleri üzerine yeni bir çalışma yapılabilir. Bununla birlikte partikülün ve temel akışkanın efektif ısı iletim katsayılarını veren ifadeler üzerinde modifikasyonlar yapılarak bu model yüksek hacimsel fraksiyonlara uygun hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

Akbarinia, A., Behzadmehr, A., 2007. Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal curved tube. *Journal of Applied Thermal Engineering* 27, 1327–1337.

Akbarinia, A., Laur, R., 2009. 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, 706-713.

Anoop, K.B., Sundararajan, T., Das, S.K., 2009. Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *International Journal of Heat Mass Transfer* 52, 2189–2195.

Bianco, V., Chiacchio, F., Manca, O., Nardini, S., 2009. Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes. *Journal of Applied Thermal Engineering* 29, 3632-3642.

Brinkman, H.C., 1952. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *Journal of Chemical Physics* 20, 571–581.

Chein R., Chuang J., 2007. Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences* 46 (1), 57–66.

Chen H., Ding Y., Tan C., 2010. Rheological behaviour of nanofluids. *New Journal of Physics* 9 (10) , 267.

Choi, S.U.S., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: *The Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Francisco, USA, ASME, FED 231/MD 66, 99–105.

Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, F.E., Grulke, E.A., 2001. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Applied Physics Letters* 79, 2252–2254.

Chon C.H., Kihm K.D., Lee S.P., Choi S.U.S., 2005. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters* 87(15), 153-157.

Das S.K., Putra N., Thiesen P., Roetzel W., 2003. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of Heat Transfer* 125(4), 567–574.

Das, S.K., Choi, S.U.S., Yu, W., Pradeep, T., 2008. *Nanofluids Science and Technology* (first ed.) John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

Eastman, J.A., S.U.S. Choi, Li, S., Yu, W. Thompson, 2001. Anomalously increased effective thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters* 78(6), 718–720.

Einstein A., 1906. A new determination of the molecular dimensions. *Annals of Physics* 19(2), 289–306.

Farajollahi B., Etemad S.G., Hojjat M., 2010. Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat Mass Transfer* 53, 12–7.

Fard, M. H., Esfahany, M. N., Talaie, M.R., 2010. 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.

Hamilton R.L. and Crosser O.K., 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1, 187–191.

Heris, S.Z., Etemad, S.Gh., Esfahany, M.N., 2006. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33, 529–535.

Hwang, K.S., Jang, S.P., Choi, S.U.S., 2009. Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed laminar flow regime. *International Journal of Heat Mass Transfer* 52, 193–199.

Jang S.P., Choi S.U.S., 2006 Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Journal of Applied Thermal Engineering* 26, 2457–2463.

Jung, J. Y., Oh, H. S., Kwak, H. Y., 2009. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. *International Journal of Heat Mass Transfer* 52, 466–472.

Kalteh, M., Abbassi, A., Saffar-Avval, M., Frijns, A., Darhuber, A., Harting, J., 2012. Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink. *Journal of Applied Thermal Engineering* 36, 260-268.

Khanafer, K., Vafai, K., Lightstone, M., 2003. Bouyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 3639–3653.

Koo, J. Kleinstreuer, C., 2005. Impact analysis of nanoparticle motion mechanisms on the thermal conductivity of nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 32, 1111–1118.

Koo, J., and Kleinstreuer, C., 2005. Laminar nanofluid flow in micro heat-sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 2652–2661.

Laaroussi, N., Lauriat, G., Desrayaud, G., 2009. Effects of variable density for film evaporation on laminar mixed convection in a vertical channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, 151–164.

Lee, D., Kim, J.-W., and Kim, B. G., 2006. A new parameter to control heat transport in nanofluids: Surface charge state of the particle in suspension. *Journal of Physical Chemistry B* 110, 4323–4328.

Lee, J. S., Im, S. S., Lee, C. W., Yu, J. H., Choa, Y. H. and Oh, S.T., 2004. Hollow nanoparticles of β -iron oxide synthesized by chemical vapor condensation. *Journal of Nanoparticle Research* 6, 627-631.

Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A., 1999. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Heat Transfer* 121, 280–289.

Levy, J. M., Chen, L. K., Sarofim, A. F., Beer, J. M., 1981. NO/Char reactions at pulverized coal flame conditions. In 18th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute.

Li, A., Ahmadi, G., 1992. Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow. *Aerosol Science and Technology* 16, 209-226.

Li, C.H., Peterson, G.P., 2007. Mixing effect on the enhancement of the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, 4668-4677.

Liu, Y.D., Zhou, Y.G., Tong, M.W., Zhou X.S., 2009. Experimental study of thermal conductivity and phase change performance of nanofluids PCMs. *Microfluid Nanofluid* 7, 579–584.

Lu L., Liu Z., Xiao H., 2011. Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluids for high-temperature evacuated tubular solar collectors, part 1: indoor experiment. *Solar Energy* 85, 379–387.

Lu, W., Fan Q., 2008. Study for the particle's scale effect on some thermophysical properties of nanofluids by a simplified molecular dynamics method. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 32 (4), 282–289.

Lundgren T.S., 1972. Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres. *Journal of Fluid Mechanics* 51 (2), 273–299.

Mai'ga, S.E.B., Palm, S.J., Nguyen, C.T., Roy, G., Galanis, G.N., 2005. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26, 530–546.

Maxwell, J.C., 1873. *Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford: Clarendon Press.

Minkowycz, W.J., Sparrow, E.M., Murthy, J.Y., 2006. *Handbook of Numerical Heat Transfer* (second ed.) John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.

Mirmasoumi, S., Behzadmehr, A., 2008. Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model. *Journal of Applied Thermal Engineering* 28, 717-727.

Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C., 2005. Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences* 44, 367-373.

Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C., 2008. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences* 47(5), 560–568.

Namburu, P. K., Das, D. K., Tanguturi, K. M., Vajjha, R. S., 2009. Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties. *International Journal of Thermal Sciences* 48, 290–302.

Nguyen C.T., Desgranges F., Galanis N., Roy G., Mare T., Boucher S., Mintsa H.A., 2008. Viscosity data for Al_2O_3 -water nanofluid hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable ? *International Journal of Thermal Sciences* 47, 103–111.

Ostberg, M., Dam-Johansen, K., 1994. Empirical modeling of the selective non-catalytic reduction of NO: Comparison with large-scale experiments and detailed kinetic modeling. *Chemical Engineering Science* 49, 1897-1904.

Peyghambarzadeh S.M., Hashemabadi S.H., Hoseini S.M., Jamnani M.S., 2011. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38, 1283–90.

Putra, N., Roetzel, W., Das, S.K., 2003. Natural convection of nano-fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39, 775–784.

Ranz, W. E., Marshall, W. R., 1952. Evaporation from drops, Part I. *Chemical Engineering Progress* 48, 141-146.

Roy, G., Nguyen, C. T., Lajoie, P.-R., 2004. Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids. *Superlattices and Microstructures* 35, 497–511.

Savage, S.B., 1988. Streaming motions in a bed of vibrationally fluidized dry granular material. *Journal of Fluid Mechanics* 194, 457–478.

Tahir, S., Mital, M., 2012. Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel. *Journal of Applied Thermal Engineering* 39, 8-14.

Talbot, L., 1980. Thermophoresis of particles in a heated boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics* 101, 737-758.

Tseng W.J., Lin C.L., 2003. Effect of dispersants on rheological behavior of BaTiO_3 powders in ethanol–isopropanol mixtures. *Materials Chemistry and Physics* 80 (1), 232–238.

Turker M., 2004. Effect of production parameters on the structure and morphology of Ag nanopowders produced by inert gas condensation. *Materials Science and Engineering A367*, 74–81.

Wang, X., Xu, X., Choi, S.U.S., 1999. Thermal conductivity of nanoparticlefluidmixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 13, 474–480.

Wang, Z. H., Choi, C. J. Kim, B. K., Kim J. C. and Zhang Z. D., 2003. Microstructure and magnetic property of Fe-Co nanoparticles prepared by chemical vapor condensation process. *Journal of Alloys and Compounds* 351, 319-323.

Wen, C.-Y., Yu, Y. H., 1966. Mechanics of fluidization. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 62, 100-111.

Wen, D., Ding, Y., 2004. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47, 5181–5188.

Xie H., Lee H., Youn W., Choi M., 2003. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. *Journal of Applied. Physics*. 94 (8), 4967–4971.

Xie, H., Fujii, M., Zhang, X., 2005. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 2926–2932.

Xuan Y., Li Q., Hu W., 2003. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. *AIChE Journal* 49(4), 1038–1043.

Xuan, Y., Li, Q., 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21, 58–64.

Xuan, Y., Li, Q., 2003. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. *Journal of Heat Transfer* 125, 151–155.

Yousefi T., Shojaeizadeh E., Veysi F., Zinadini S., 2012. An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT–H₂O nanofluid on the efficiency of a flat plate solar collector. *Solar Energy* 86, 771–779.

Yu, W., Choi, S.U.S., 2003. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *Journal of Nanoparticle Research* 5, 167–171.

Zamzamian A., Oskouie S.N., Doosthoseini A., Joneidi A., Pazouki M., 2011. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. *Experimental Thermal and Fluid Science* 35, 4

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Mehmet Bahattin AKGÜL
Doğum Tarihi	: 13.01.1984
Doğum Yeri	: Akhisar
Eylül 1998 - Haziran 2002	: Akhisar Anadolu Lisesi
Eylül 2002 - Temmuz 2006	: Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Lisans Programı
Eylül 2006 -Ağustos 2008	: Celal Bayar Üniversitesi - Fen Bilimler Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Dinamiği Programı'nda Yüksek Lisans Eğitimi
Eylül 2008 - ..	: Celal Bayar Üniversitesi - Fen Bilimler Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Dinamiği Programı'nda Doktora Eğitimi