



T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEKLİSANS TEZİ

Betül TEYMUR

İZOTERMAL OLMAYAN KANAL AKIŞINDA
NANOAKIŞLARIN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSMANIYE – 2015

**T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İZOTERMAL OLMAYAN KANAL AKIŞINDA
NANOAKIŞLARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Betül TEYMUR

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**OSMANİYE
HAZİRAN-2015**

TEZ ONAYI

İZOTERMAL OLMAYAN KANAL AKIŞINDA NANOAKIŞLARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Betül TEYMUR tarafından Doç. Dr. Coşkun ÖZALP danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği/çokluğu ile **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Coşkun ÖZALP
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Doç.Dr. Mustafa ÖZCANLI
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Üye: Yrd.Doç.Dr. Bülent YANIKTEPE
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. A. Ali GÜRTEN
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Bu Çalışma OKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: OKÜBAP2014-PT3-037

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir..

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Betül TEYMUR

ÖZET

İZOTERMAL OLMAYAN KANAL AKIŞINDA NANOAKIŞLARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Betül TEYMUR
Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Coşkun ÖZALP

Haziran 2015, 98 sayfa

Bu çalışmada sabit basınç gradyanının etkisi altındaki nanoakışkanın izotermal olmayan kanaldaki akışı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın birinci kısmında literatürde sıklıkla karşılaşılan teorik ve deneysel modeller (Einstein, Batchelor, Brinkman, Wang, Chen ve Heyhat modeli) sıcaklık ve hız profillerine bakılarak karşılaştırılmış ve birbirlerine olan uyumları incelenmiştir. İkinci kısımda ise kanal içindeki alümina-su nanoakışkanın hacimsel konsantrasyon, basınç gradyanı ve Reynolds sayısının sıcaklık ve hız profiline etkisi incelenmiştir. Ayrıca kanal merkezi boyunca kayma gerilmesi dağılımı ve farklı hacimsel debilerdeki basınç gradyanı değişimi de incelenmiştir. Bu kısımda momentum ve enerji denklemlerinde yer alan ısı iletkenlik ve viskozite değerleri için hacimsel konsantrasyona bağlı olarak sırasıyla Maxwell ve Brinkman modelleri kullanılmıştır. Kanal akışının çözümünde akışın iki boyutlu, izotermal olmayan, sıkıştırılmaz, hidrodinamik ve ısı olarak tam gelişmiş ve sürekli olduğu kabul edilmiştir. Kanal alt ve üst cidarlarına sabit ısı akısı sınır şartı uygulanmış olup alümina-su nanoakışkanın tek fazlı ve homojen olduğu varsayılmıştır. Denklemlerin ayrıklaştırılması Chebyshev polinom açılımlarına dayanan Pseudospectral yöntemi kullanılarak yapılmış ve doğrusal olmayan sınır değer problemleri Chebyshev Pseudospectral yöntemi ile Fortran bilgisayar programı kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Nanoakışkan, viskozite modelleri, Spectral yöntem, sayısal analiz Alümina

ABSTRACT

NUMERICAL ANALYSIS OF NANOFLUID FLOW IN NONISOTHERMAL CHANNEL FLOW

Betül TEYMUR

M.Sc., Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Assoc.Prof.Dr Coşkun ÖZALP

June 2015, 98 pages

This study investigates the nanofluid for a nonisothermal channel flow under the effect of a constant pressure gradient acting along the channel axis. In the first part of the present study, the theoretical and experimental models commonly encountered in the literature (Einstein, Batchelor, Brinkman, Wang, Chen and Heyhat models) are compared by observing temperature and velocity profiles and are examined for compliance with each other. In the second part of the present study, the effects of volume fraction, pressure gradient and Reynolds numbers on velocity and temperature profiles are investigated for the alumina-water nanofluid. In addition, pressure gradient for different volumetric flow rate and shear stress distribution along the channel center are examined as well. In this part, to consider the effect of thermal conductivity and viscosity which situate in the momentum and the energy equations, Brinkman and Maxwell model depending volumetric concentration are used respectively. Two-dimensional, non-isothermal, hydrodynamically and thermally fully developed, steady flow of an incompressible fluid inside a channel is taken into consideration. Upper and lower walls of the channel are kept at the same constant heat flux and are assumed that alumina-water nanofluid is the homogeneous and single-phase fluid. Discretization is performed using a Pseudospectral technique based on Chebyshev polynomial expansions. The resulting nonlinear, coupled boundary value problem is numerically solved using Fortran computer program with Chebyshev pseudospectral method.

Keywords: Nanofluids, viscosity models, Spectral method, numerically analysis Alumina

Çok kıymetli aileme...

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütölmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Coşkun ÖZALP'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez ailelerimizin desteği olmadan mümkün olmazdı. Hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen, her zorluğun altından kalkmam için dualarıyla bana güç veren, kıymetlim annem Rukiye TEYMUR 'a hiç bitmeyen sevgisi, sabrı ve cesareti için minnettarım.

Ayrıca tez çalışmam süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşım Serkan ÇAĞ'a teşekkür ederim.

Değerli katkı ve önerilerinden dolayı tez jürimde yer alan Doç. Dr. Mustafa ÖZCANLI, Doç.Dr. Hasan SERİN, Yrd. Doç. Dr. Bülent YANIKTEPE, Yrd. Doç. Dr. Nehir TOKGÖZ 'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bölümdeki çalışmalarım süresince beni destekleyen diğer bölüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Nanoakışkanlar.....	3
1.1.1 Nanoakışkanların Potansiyel Uygulamaları	3
1.1.2 Nanoparçacıklar ve Mikroparçacıklara Göre Üstünlükleri	4
1.2 Temel Akışkanlar	6
1.3 Isı Transferinin Artmasına Neden Olan Termofiziksel Olaylar.....	6
1.4 Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri.....	9
1.5 Spectral Metot	10
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	11
2.1 Deneysel Çalışmalar.....	12
2.2 Teorik Çalışmalar.....	20
2.3 Viskozite Modelleri.....	23
3. TEORİ VE YÖNTEM	33
3.1 Termofiziksel özelliklerin belirlenmesi	33
3.1.1 Isıl iletkenlik.....	33
3.1.1.1 Maxwell Modeli	33
3.1.2 Yoğunluk ve Isıl Kapasite	34
3.1.3 Viskozite.....	34
3.2 Sayısal Modelin Tanımlanması.....	36
3.2.1 Tam Gelişmiş Akış Koşulları	38
3.2.1.1 Hareketsiz ve Paralel Yüzeyler Arasında Akışın Hidrodinamik Olarak Gelişimi.....	38
3.2.1.2 Hareketsiz ve Paralel Yüzeyler Arasında Akışın Isıl Olarak Gelişimi	39

3.3	Sürekliлик, Momentum ve Enerji Denklemleri.....	41
3.3.1	Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması	42
3.3.2	Sınır Koşulları	44
3.3.3	Momentum ve Enerji Denklemlerinin Sayısal Olarak Çözümü.....	44
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	49
4.1	Modellerin Karşılaştırılması.....	57
4.2	Al ₂ O ₃ -su Nanoakışkanın Brinkman Modeli İçin İncelenmesi.....	72
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
	KAYNAKLAR	81
	ÖZGEÇMİŞ	91
	EKLER.....	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Nanoakışkan viskozitesi ile ilgili incelenen deneysel çalışmalar	15
Çizelge 2.2 Klasik modeller.....	24
Çizelge 2.3 Klasik modellere dayanan veya deneysel çalışmalarla elde edilen teorik ve deneysel korelasyonlar.....	25
Çizelge 2.4 Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından elde edilen deneysel korelasyondaki sabit değerler.....	32
Çizelge 2.5 Timofeeva, vd. (2009) tarafından elde edilen korelasyonun deneysel sabit değerleri (25°C de).....	32
Çizelge 3.1 Sayısal analizde kullanılan viskozite modelleri.....	35
Çizelge 3.2 293 K deki malzemelerin özellikleri (Manca, vd., 2012).....	44
Çizelge 4.1 $0.0 \leq \phi \leq 0.1$ hacimsel konsantrasyonlarında viskozite değerleri.....	53
Çizelge 4.2 $0.001 \leq \phi \leq 0.01$ hacimsel konsantrasyonlarında viskozite değerleri..	53
Çizelge 4.3 $0.0 \leq \phi \leq 0.1$ hacimsel konsantrasyonlarında maksimum hız değerleri.....	54
Çizelge 4.4 $0.001 \leq \phi \leq 0.01$ hacimsel konsantrasyonlarında maksimum hız değerleri.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Bazı malzemelerin 300 K de ısıl iletkenlik değerleri.....	4
Şekil 1.2 Isı transfer akışkanını içerisindeki nanoparçacıkların mikroparçacıklarla karşılaştırılması (Şahin, vd., 2006).....	5
Şekil 1.3 Nanoparçacık etrafındaki sıvı tabakanın şematik olarak gösterimi, k_l , k_f ve k_p sırası ile nanotabakanın, temel akışkanın ve nanoparçacığın ısıl iletkenliklerini ifade etmektedir (Özerinç, vd., (2010a)).....	7
Şekil 1.4 Ara yüzey etkisinin nanoakışkan ısıl özellikleri üzerindeki etkisi (Timofeeva, 2011).....	8
Şekil 1.5 Kümelenme mekanizması (Prasher, vd., 2006).....	9
Şekil 1.6 Termofiziksel özelliklerin ısı transferi ile ilişkisi (Timofeeva, 2011).....	10
Şekil 3.1 Akış geometrisinin şematik gösterimi.....	37
Şekil 3.2 Kanalda hız sınır tabakasının gelişimi.....	38
Şekil 3.3 Kanal içerisinde ısıl tabakanın gelişimi.....	39
Şekil 3.4 Çalışma alanının Pseudospectral alana transfer edilmesi.....	45
Şekil 3.5 Farklı konsantrasyonlara göre hız değerlerinin yakınsaması.....	49
Şekil 4.1 Modellerin hacimsel konsantrasyona bağlı olarak bağlı viskozitelerinin değişimi a) $0.0 \leq \phi \leq 0.1$, b) $0.001 \leq \phi \leq 0.01$	55
Şekil 4.2 Modellerin hacimsel konsantrasyona bağlı olarak maksimum hız değerlerinin değişimi a) $0.0 \leq \phi \leq 0.1$, b) $0.001 \leq \phi \leq 0.01$	56
Şekil 4.3 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması, $Re = 20, G = -0.5$; a) $\phi = 0.0$, b) $\phi = 0.02$	58
Şekil 4.4 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması, $Re = 20, G = -0.5$; a) $\phi = 0.06$, b) $\phi = 0.1$	59
Şekil 4.5 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması, $Re = 20, G = -0.5$; a) $\phi = 0.0$, b) $\phi = 0.02$	60
Şekil 4.6 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması, $Re = 20, G = -0.5$; a) $\phi = 0.06$, b) $\phi = 0.1$	61
Şekil 4.7 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması, $\phi = 0.1, Re = 20$; a) $G = -0.5$, b) $G = -1.0$, c) $G = -2.0$	63
Şekil 4.8 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması, $\phi = 0.1, Re = 20$; a) $G = -0.5$, b) $G = -1.0$, c) $G = -2.0$	64

Şekil 4.9 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması, $\phi = 0.02, Re = 20$; a) $G = -0.5$, b) $G = -1.0$, c) $G = -2.0$	65
Şekil 4.10 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması, $\phi = 0.02, Re = 20$; a) $G = -0.5$, b) $G = -1.0$, c) $G = -2.0$	66
Şekil 4.11 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması, $\phi = 0.1, G = -0.5$; a) $Re = 20$, b) $Re = 50$, c) $Re = 100$	68
Şekil 4.12 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması, $\phi = 0.1, G = -0.5$; a) $Re = 20$, b) $Re = 50$, c) $Re = 100$	69
Şekil 4.13 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması, $\phi = 0.02, G = -0.5$; a) $Re = 20$, b) $Re = 50$, c) $Re = 100$	70
Şekil 4.14 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması, $\phi = 0.02, G = -0.5$; a) $Re = 20$, b) $Re = 50$, c) $Re = 100$	71
Şekil 4.15 Hacimsel konsantrasyonun farklı değerleri için a) hız b) sıcaklık c) kayma gerilmesi profilleri.....	74
Şekil 4.16 Basınç gradyanının farklı değerleri için a) hız b) sıcaklık c) kayma gerilmesi profilleri.....	75
Şekil 4.17 Reynolds sayısının farklı değerleri için a) hız b) sıcaklık c) kayma gerilmesi profilleri.....	76
Şekil 4.18 Hacimsel konsantrasyonun farklı değerleri için farklı hacimsel debilerde basınç gradyanının değişimi.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

ρ	Yoğunluk	(kg/m ³)
p	Basınç	(Pa)
u	x yönündeki hız bileşeni	(m/s)
v	y yönündeki hız bileşeni	(m/s)
x	Eksen doğrultusundaki boyut	(m)
y	Eksene dik doğrultudaki boyut	(m)
μ	Dinamik viskozite	(Pas)
c_p	Sabit basınç altındaki özgül ısı kapasitesi	(J/kgK)
d_p	Parçacık çapı	(m)
k	Isıl iletkenlik	(W/mK)
M	Temel akışkanın moleküler ağırlığı	(kg/mol)
N	Avogadro sayısı (6.022x10 ²³)	(mol ⁻¹)
Pr	Prandtl sayısı ($c_p\mu/k$)	-
q_s''	Isı akısı	(W/m ²)
Re	Reynolds sayısı ($\rho ul/\mu$)	-
Ri	Richardson sayısı (Gr/Re^2)	-
T	Sıcaklık	(K, °C)
ϕ	Hacimsel konsantrasyon	-
θ	Boyutsuz sıcaklık	-
l	Levhalar arasındaki mesafe	(m)

Alt İndisler

bf, f	Temel akışkan
nf	Nanoakışkan
m	Ortalama değer
o	Referans değer
p	Özgül ısı için sabit basınç
r	Bağıl
s	Nanoparçacık; yüzey (sıcaklık ve ısı akısı için)

Üst İndisler

-	Boyutlu sayılar
---	-----------------

1. GİRİŞ

Isı transferinin artırılması ve buna bağı olarak enerjiden ve malzemeden tasarruf etmek ısı transfer uygulamalarının en temel amaçlarından biridir. Bu nedenle ısı transferinin artırılmasına yönelik farklı yöntemler uygulanmaktadır. Isı transferini iyileştirmeye yönelik yöntemler genel olarak “aktif”, “pasif” ve “karma” yöntemler olarak gruplandırılmaktadır. Aktif yöntemler olarak adlandırdığımız yöntemlerde dış güç kaynağının kullanılması gerekmektedir. Akışkan titreşimi, yüzey titreşimi, elektrostatik alanlar gibi yöntemler ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik aktif yöntemler arasında sayılabilir. Pasif yöntemler ise dış güç kullanılmasını gerektirmeyen yöntemlerdir. Pürüzlü yüzeyler, genişletilmiş yüzeyler, yerleşik iyileştirme elemanları, dönmeli akış cihazları, ilave katkı maddeleri ve benzeri yöntemler pasif yöntemlere örnek olarak verilebilir. Karma yöntemlerde ise aktif veya pasif yöntemlerden iki veya daha fazlası birlikte kullanılmaktadır (Bergles, 1998). Pasif yöntemler uygulandığında ısı transferinde önemli miktarda iyileşmeler gözlenirken, basınç düşümünden dolayı gerekli pompa gücünde büyük bir artış meydana gelmektedir. Bunun yanında, pasif iyileştirme yöntemlerinin kullanılması, sistemde çözümlenmesi gereken çeşitli problemler oluşturmaktadır. Kimyasal işlemlerde akışkanın özelliklerine bağı olarak çökeltme, kirlenme gibi problemler meydana gelmekte bu ise belli bir süre sonra ısı transferini olumsuz yönde etkilemektedir (Şahin, vd., 2006).

Su, motor yağı ve etilen glikol (antifriz) gibi akışkanlar ısı değıştiricilerde kullanılan geleneksel ısı transferi akışkanlarıdır. Isı transferini iyileştirmek amacıyla yukarıda bahsedilen yöntemler kullanılmasına rağmen, bu geleneksel akışkanların ısı transferi performanslarının düşük olması, iyileşmenin az olmasına neden olmakta ve ayrıca ısı değıştiricisinin küçük boyutlarda ve az yer kaplayan geometride olmasını sınırlamaktadır. Tüm bu sebepler yeni arayışları doğurmuş ve geleneksel akışkanların içine termofiziksel özellikler bakımından daha üstün olan metal ya da metal olmayan parçacıkların eklenmesi ile etkin özelliklere sahip bir karışım elde edilmesi düşünülmüştür (Şahin, vd., 2006).

Akışkan içerisine milimetre veya mikrometre boyutlarındaki katı parçacıkların katılması ile akışkanın ısıl iletkenliğinin artırılması 100 yıldan fazla bir süredir bilinen bir yöntemdir (Lee, vd., 1999). Ancak kullanılan mikrometre ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) ya da daha büyük boyuttaki parçacıklar akışın gerçekleştiği kanallarda tıkanma ve aşınma (erozyon) gibi istenmeyen durumlara neden olmuştur (Das, vd., 2008). Bu parçacıkların ısı transferi üzerinde istenen sonuçları vermemesi nedeniyle bu konudaki iyileştirme çalışmaları devam etmiş ve nanometre ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) boyutundaki parçacıkların (nanoparçacıklar) temel akışkanlara eklenmesi gündeme gelmiştir. Rudyak (2013) tarafından yapılan çalışmada mikro boyutundaki parçacıkların aksine nanoparçacıklarda çökme meydana gelmediği ve içinde akmış olduğu kanalı aşındırmadığı ifade edilmiştir.

Son yıllarda nanokışkanları farklı açılardan ele alan çalışma sayısı oldukça artmıştır. Çalışmaların büyük çoğunluğu bu akışkanların ısıl iletkenliği ve ısı transferindeki artışı üzerine yoğunlaşmış olsa da nanoakışkan viskozitesi de aynı önemi gerektirmektedir. Viskozite, akışkanların akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmakta olup akışkanları içeren tüm ısıl uygulamalar için dikkate alınması gereken önemli bir özelliktir. Nanoakışkanların viskozitesi önemlidir ve bazen ısıl iletkenlikte daha az iyileştirme gösteren nanoakışkanlar düşük viskozitelerinden dolayı tercih edilebilmektedirler (Timofeeva, vd., 2009). Pompalama gücü akışkan viskozitesiyle ilgili olup laminer akış için basınç düşümü akışkan viskozitesi ile doğrudan orantılıdır. Ayrıca konveksiyonla ısı transfer katsayısı viskoziteden etkilenmektedir. Prasher, vd. (2006a) tarafından tam gelişmiş laminer akış durumunda eğer ısıl iletkenlikteki artış viskozitedeki artıştan 4 kat daha fazla ise nanoakışkanların kullanılmasının yararlı olacağı belirtilmiştir. Bu nedenle nanoakışkanların kullanıldığı mühendislik sistemlerinde ısıl iletkenlik kadar viskozitenin de dikkate alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada, nanoakışkan viskozitesinin akış karakteristiği üzerine etkisinin farklı modeller kullanılarak irdelenmesi; hacimsel konsantrasyon, basınç gradyanı ve Reynolds sayısının akış karakteristiği üzerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Sabit basınç gradyanının etkisi altındaki nanoakışkanın izotermal olmayan kanaldaki akışı iki kısımda olmak üzere sayısal olarak incelenmiştir. Sabit ısı akısı sınır şartı

kullanılan kanal akışı için birinci kısımda literatürde sıklıkla karşılaşılan teorik ve deneysel modeller sıcaklık ve hız profillerine bakılarak karşılaştırılırken, ikinci kısımda Al_2O_3 -su nanoakışkanın hacimsel konsantrasyon, basınç gradyanı ve Reynolds sayısının sıcaklık, hız profili ve kayma gerilmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Doğrusal olmayan sınır değer problemleri Chebyshev Pseudospectral yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür.

1.1 Nanoakışkanlar

Nanoakışkanlar, gelişen teknoloji ile beraber mikro boyutlu parçacıkların yerine geçen nano boyuttaki malzemelerin, termofiziksel özellikleri düşük olan temel akışkan içerisine eklenmesiyle oluşturulan ve mühendislik uygulamalarında geniş yer tutan süspansiyonlardır. Nanoakışkanlar taşıyıcı akışkan olarak tanımlayabileceğimiz temel akışkan ve nanoparçacıklar içeren iki fazdan oluşmaktadır. Isı transferi içerisine mikro boyuttaki parçacıkların eklenmesi ile ısı transferinin artırılması fikri ilk olarak Maxwell (1891) tarafından ortaya konulmuş olsa da nanoakışkan kavramı ilk olarak Choi ve Eastman (1995) tarafından yapılan çalışmada ifade edilmiştir.

Nanoparçacıklar, metaller (Cu, Ni, Al, vb.), metal oksitler (Al_2O_3 , TiO_2 , CuO, SiO_2 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $BaTiO_3$, vd.) ve diğer bileşiklerden (AlN, SiC, $CaCO_3$, grafen, karbon nanotüpler vd.) oluşurken temel akışkan olarak su, etilen glikol, propilen glikol, motor yağı, vb. kullanılmaktadır. Nanoakışkanlar katı-sıvı fazdan oluşan süspansiyonlar olsa da nanometre ölçeğinde beklenmedik olgular meydana geldiğinden sıklıkla kullanılan klasik süspansiyonlar gibi düşünülmemelidir. Çok küçük boyutlardaki parçacıklar (1–100 nm) akışkan içinde çok iyi karıştırıldığında, nanoakışkan katı-sıvı karışımdan çok, tek fazlı akışkan gibi davranmaktadır (Daungthongsuk ve Wongwies, 2007).

1.1.1 Nanoakışkanların Potansiyel Uygulamaları

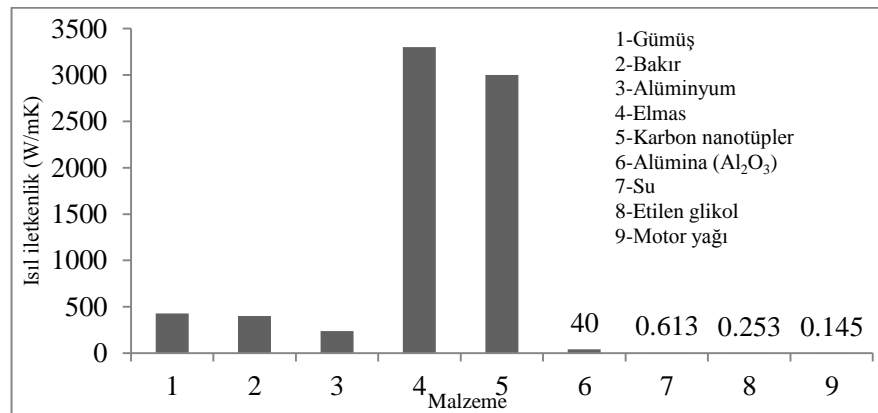
Nanoakışkanlar yüksek termal özellikleri ve potansiyel faydaları düşünüldüğünde mühendislik (taşıma, mikro elektronikler, üretim, vb.) ve sağlık alanlarında pek çok uygulama alanı bulmuştur. Otomotiv sektöründe daha hafif ve küçük boyutlu

motorlar ve radyatörler, enerji-verimli araçlar üretilmesine imkân sağlamaktadır. Aynı zamanda mikro elektromekanik sistemlerde (MEMS) kullanılan nanoakışkanlar tıkanma olmaksızın mikro kanalların soğutulmasını sağlarken ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri (HVAC) ve soğutma sistemlerinde kullanılmasıyla daha verimli ve maliyeti düşük sistemlerin oluşmasına imkân sağlamaktadır. Biyomedikal uygulamalar içerisinde kullanılan manyetik nanoparçacıklar, ilaç ya da radyasyonu taşıyan araç görevini üstlenerek kanser tedavisi uygulamalarında kullanılmaktadır (Murshed, vd., 2008).

1.1.2 Nanoparçacıklar ve Mikroparçacıklara Göre Üstünlükleri

Nanoakışkan üretiminde Al, Cu, Zn, Ag, Au, Ni, elmas, grafen, karbon nanotüpler (SWCNT (single wall nanotube) ve MWCNT (multi wall nanotube)), TNT (titanatenanotüpler), SiC, SiO₂, Fe₂O₃, Fe₃O₄, BaZrO₃, Al₂O₃, TiO₂, CuO, SiO₂, Fe₂O₃, Fe₃O₄, BaTiO₃ ve diğer bileşiklerden AlN, SiC, CaCO₃ nanoparçacıkları kullanılmaktadır.

Oda sıcaklığında metalik parçacıkların ısı iletkenlikleri temel akışkanın ısı iletkenliğinden oldukça yüksektir. Örneğin oda sıcaklığında bakırın ısı iletkenliği suyunkinden 700, motor yağinkinden ise 300 kat daha fazladır. Bu durum metalik ya da metalik oksitleri içeren nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin geleneksel akışkanlardan çok daha yüksek olduğunu göstermektedir (Murshed, vd., 2008). Şekil 1.1’de bazı nanoparçacıkların ve geleneksel akışkanların ısı iletkenlikleri karşılaştırılmıştır.

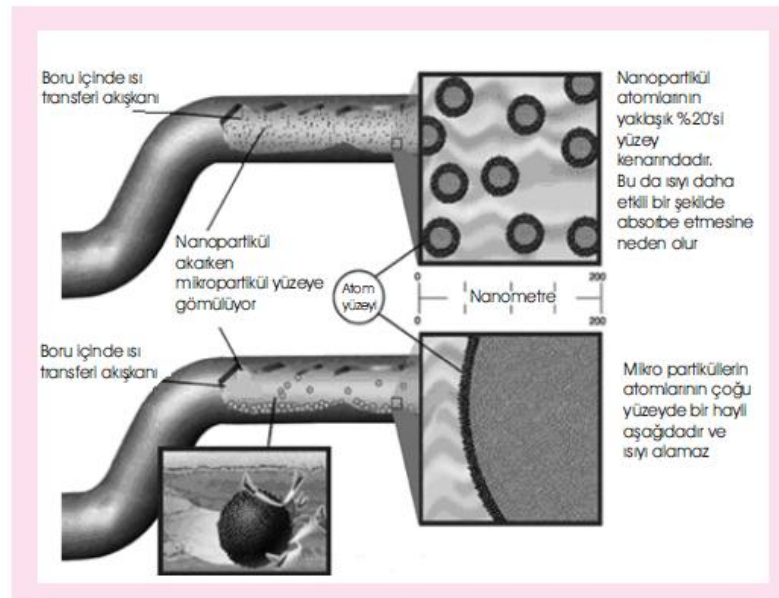


Şekil 1.1 Bazı malzemelerin 300 K de ısı iletkenlik değerleri

Isı transfer yüzey alanının artırılmasıyla ısı transferini arttırmak mümkündür. Aynı hacimsel konsantrasyonda mikroparçacıklarla karşılaştırıldığında nanoparçacıkların yüzey alanı daha fazladır ve bu durum ısı transferini önemli derecede arttırmaktadır. Ayrıca akışkan içerisindeki nanoparçacıkların büyük çoğunluğu cidara yakın durur ve bu durum cidarla nanoparçacık arasındaki ısı transferini artırır (Murshed, vd., 2008).

Akışkanın kararlılığı mühendislik uygulamalarında önemlidir. Mikroparçacıklar kısa süre içerisinde çökerken, nanoparçacıklar oldukça kararlıdır. Yerçekiminin nanoparçacık üzerine etkisi küçük boyutlarından dolayı ihmal edilebilir (Murshed, vd., 2008). Bu durum nanoparçacıkların mikroparçacıklara göre daha kararlı olmasını ve çökmenin azalmasını sağlamaktadır. Şekil 1.2’de ısı transfer akışkanı içerisindeki nanoparçacıklar ve mikroparçacıklar karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak temel akışkan içerisine mikro ya da daha büyük boyuttaki parçacıklar yerine nanoparçacıklar eklenmesi akışın kararlılığını ve ısı transferini arttırdığı için daha avantajlı olduğu belirtilmektedir.



Şekil 1.2 Isı transfer akışkanı içerisindeki nanoparçacıkların mikroparçacıklarla karşılaştırılması (Şahin, vd., 2006).

1.2 Temel Akışkanlar

Nanoakışkan üretiminde kullanılan temel akışkanları ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan geleneksel akışkanlar ve bu akışkanların karışımları olarak ayırmak mümkündür. Su, etilen glikol, propilen glikol ve bu akışkanların karışımları ve motor yağı geleneksel akışkanlar olarak kullanılmaktadır.

1.3 Isı Transferinin Artmasına Neden Olan Termofiziksel Olaylar

Efektif ortalama teoriye dayanılarak ısı iletkenlik için oluşturulan klasik modellerin düşük konsantrasyonlardaki mili ve mikroparçacıklı süspansiyonlarda uygun sonuçlar verdiği deneysel ve teorik çalışmalarla teyit edilmiştir. Deneysel çalışmalar nanoakışkanların yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğunu ve bunun klasik modellerle hesaplanamadığını göstermiştir. Wang, vd. (1999) ve Koblinski, vd. (2002) tarafından yapılan çalışmalarda klasik modellerle hesaplanamayan, ısı iletkenlik üzerindeki artışa etki eden çeşitli mekanizmaları ele almışlardır.

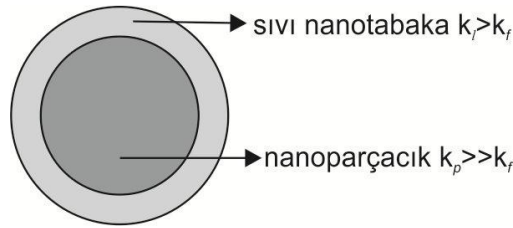
Wang, vd. (1999) nanoakışkanların mikroskobik hareketleri ve yüzey özelliklerinin nanoakışkanların ısı iletkenliklerinde artışa sebep olabileceğini belirtmişlerdir. Mikroskobik hareketler, van der Waals kuvveti ve elektrostatik kuvvetin nanoakışkanlar için önemli olduğu belirtilen çalışmada Brownian hareketinin ısı transferi üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceğini fakat elektrostatik kuvvetlerin ve van der Waals kuvvetinin ısı transferinde etkili olabileceğini belirtmişlerdir.

Koblinski, vd. (2002) nanoakışkanlarda ısı transfer artış mekanizmalarını dört başlık altında toplamışlardır. Bu mekanizmalar nanoparçacıkların Brownian hareketi, parçacık/sıvı ara yüzeyindeki akışkan tabakası, nanoparçacıklardaki ısı aktarım doğası ve nanoparçacık kümelenmesinin etkisi olarak sıralanmıştır.

Brownian hareketi, akışkan içerisine ilave edilmiş parçacıkların sıvı moleküllerin bombardımanı nedeniyle akışkan içerisindeki rastlantısal hareketidir. Nanoakışkanlar düşünüldüğünde bu rastlantısal hareket nanoparçacıkların ısıyı transfer etmesini sağlamakta ve bu da ısı iletkenliği arttırmaktadır. Brownian hareketinin ısı iletkenlik üzerinde önemli etkileri olması nedeniyle ısı difüzyondan daha etkili bir

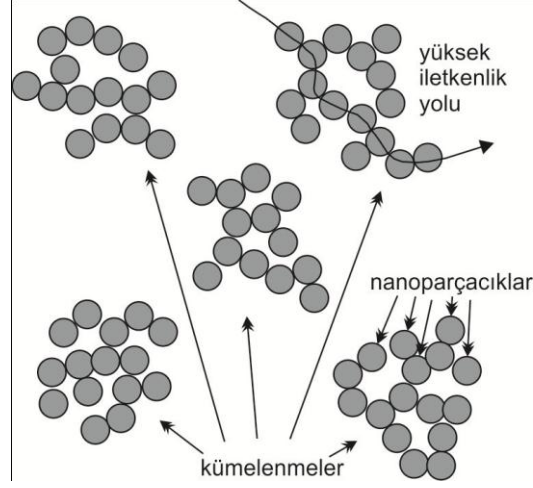
mekanizma olduğu düşünülebilir. Fakat Keblinski, vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada çok küçük parçacık boyutlarında bile ısı difüzyonunun Brownian difüzyonundan çok daha hızlı olduğu belirtilmiştir.

Parçacık etrafındaki sıvı tabaka (sıvı nanotabaka), nanoakışkan ısı özelliklerindeki büyük artışta etkili olan bir diğer önemli mekanizma olarak belirtilmektedir. Sıvı moleküllerinin katı parçacıklar etrafında bir tabaka oluşturması ve ara yüzeydeki atomik yapının düzenini geliştirmesi temeline dayanmaktadır. Bu sıvı tabakasının atomik yapısı sıvı yığınının atomik yapısından çok daha düzenlidir. Daha düzenli atomik yapıdaki katıların ise sıvı moleküllerinden çok daha yüksek bir ısı iletkenliğe sahip olmasından dolayı ara yüzeydeki bu sıvı tabakasının ısı iletkenliğinin sıvı yığınınından daha yüksek olması beklenen bir durumdur. Bu nedenle nanotabaka nano akışkanların ısı iletkenliğinin artmasında etkili olan önemli bir faktör olarak ele alınmaktadır. Bu olay Şekil 1.3'te şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 1.3 Nanoparçacık etrafındaki sıvı tabakanın şematik olarak gösterimi, k_t , k_f ve k_p sırası ile nanotabakanın, temel akışkanın ve nanoparçacığın ısı iletkenliklerini ifade etmektedir (Özerinç, vd., (2010a)).

Nanoakışkanlarla ilgili olarak yapılan çalışmalar arasındaki farklardan en önemlilerinden biri sistemin düşünülenden daha karmaşık olması ve katı/sıvı ara yüzeyinin varlığı olarak düşünülebilir. Nanoparçacıkların yüzey alanının büyük olması nedeniyle nanoparçacıklar ve akışkan arasındaki sınır tabakalar akışkan özelliklerini önemli oranda etkilemekte ve üç-faz sistemini oluşturmaktadır. Nanoakışkanları geleneksel katı ve sıvı içeren iki-faz yaklaşımı yerine üç-fazlı sistemler olarak ele almak (katı, sıvı ve arayüzey) nanoakışkan parametreleri, özellikleri ve ısıtma-soğutma performansı arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılmasına



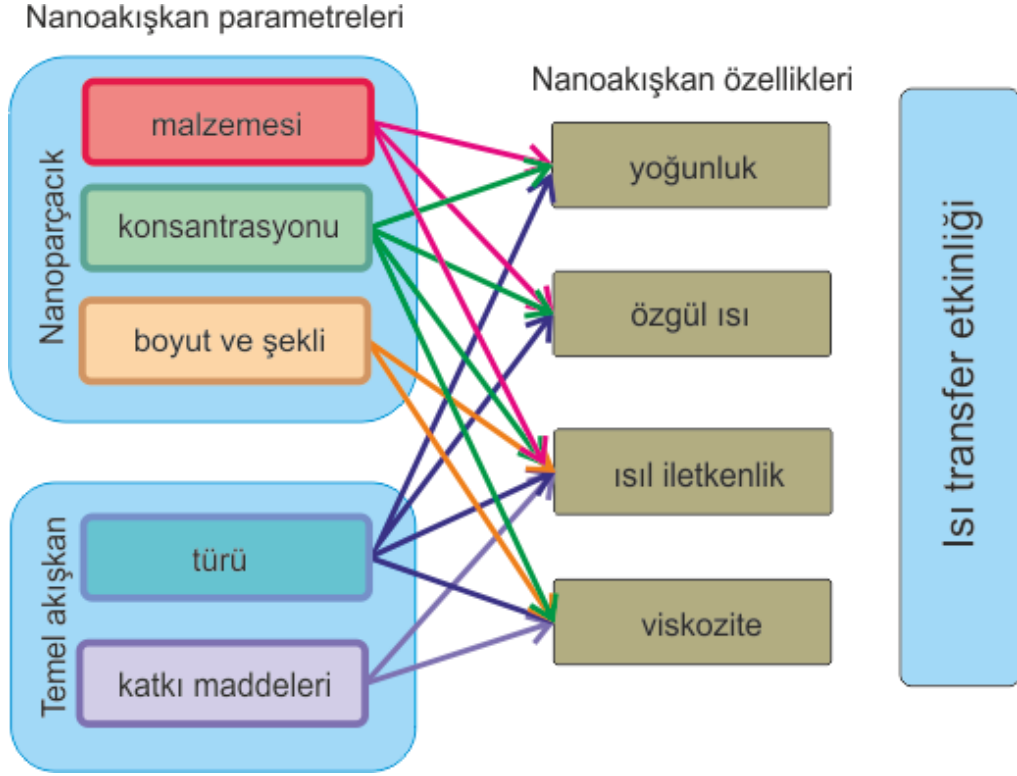
Şekil 1.5 Kümelenme mekanizması (Prasher, vd., 2006).

Tüm bu mekanizmaların yanında parçacık yüzey kimyası ve nanometre boyuttaki parçacıklar arasındaki etkileşimin de ısı iletkenliğinin artışında etkili parametreler olabileceği düşünülmektedir.

1.4 Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Nanoakışkanların ısı ve termal davranışları oldukça karmaşık olduğundan nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini belirlemek için birçok teorik ve deneysel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller sıcaklığa, Brownian hareketine, parçacık boyutu ve şekline, hacimsel konsantrasyona, nanoparçacık ile temel akışkan arasındaki etkileşimlere ve nanoparçacıkların kendi aralarındaki etkileşimlere dayanmaktadır.

Nanoakışkanların kullanılması ile ısı transferinde sağlanan artış en önemli avantajdır ve birçok çalışma ısı iletkenlikteki ve ısı transferindeki artış üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak bunun yanında ısı iletkenlik gibi akış özelliklerini etkileyen viskozite, yoğunluk, özgül ısı gibi nanoakışkan özellikleri de ısı transferini etkilemektedir. Bu mekanizma Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6 Termofiziksel özelliklerin ısı transferi ile ilişkisi (Timofeeva, 2011).

1.5 Spectral Metot

Chebyshev polinomları sayısal analiz konularına kolay adapte edilebilmesi ve bilgisayar programlamaya uygunluğu nedeniyle yaklaşım polinomlarının oluşturulmasında, polinomların istenilen hata seviyesi içinde kalacak şekilde derecelerinin düşürülmesinde ve diferansiyel denklemlerin başlangıç ve sınır değer problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır.

Chebyshev polinomları ilk kez yaklaşık 100 yıl önce Rus matematikçi Chebyshev tarafından kullanılmıştır. Sonrasında Lanczos ve Clenshaw iki farklı yöntemle Chebyshev polinomları yardımıyla yaklaşım polinomları oluşturmuşlardır. Chebyshev polinomları; polinomlar ailesi içinde, ortogonal olmaları, rekürsif ilişkiler elde edilebilmesi ve bilgisayar programlamaya yatkın olmaları sebebiyle yaklaşım polinomu olarak kullanılmaya çok uygundurlar. Adi ve kısmi türevli diferansiyel denklemlerin başlangıç ve sınır değer problemlerinin sayısal çözümleri temel kullanım alanlarıdır.

Fonksiyon yaklaşımlarının en basiti verilen fonksiyonun Taylor serisi ile yaklaşık olarak hesaplanmasıdır. Taylor açılımında; serinin istenen sonuçtan uzaklaşması, hata dağılımının düzensiz olması ve maksimum hatanın aralığın uçlarında toplanması, yakınsama için fazla terim gerektirmesi gibi bazı dezavantajları vardır. Bu nedenlerle Taylor açılımından daha iyi yöntemlere ihtiyaç doğmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Önceki çalışmalar incelendiğinde nanoakışkan kavramının ilk kez Choi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar sonucunda tanımlandığı ve teorik olarak uygunluğunun ortaya konulduğu belirtilmektedir. Nanoparçacıklar, sıvının molekülleri gibi davranacak kadar küçük olduğundan nanoakışkanların çok küçük boyutlardaki kanal akışlarında kullanılabilir ideal bir akışkan olduğu dile getirilmiştir (Choi ve Eastman, 1995). Nanoakışkanlarla ilgili literatürde yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur.

Nanoakışkanların ısı transferi üzerine olan etkilerini daha iyi anlayabilmek için nanoakışkanların ısı iletim katsayısı başta olmak üzere; nanoparçacık şekli, malzemesi, boyutu, hacimsel konsantrasyonu, parçacıkların sıvı içerisindeki hareketlerinin termofiziksel özellikler üzerindeki etkisi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Isı transferindeki artışın sadece termofiziksel özelliklerdeki artıştan kaynaklanmadığı ve bu artışta nanoparçacıkların akışkan içerisinde rastlantısal hareketi olan Brownian hareketi, nanoparçacık çevresinde oluşan sıvı katmanının kalınlığı, nanoparçacık kümelenmeleri, nanoparçacıklar arasındaki ışınımın etkili olduğu deneysel ve teorik çalışmalarda ifade edilmiştir. Yapılmış olan bu çalışmaların büyük bir kısmı farklı başlıklar altında ısı transfer özellikleri üzerine yoğunlaşmıştır. Isı transferinin iyileşmesi Özerinç (2010a), Sundar ve Sharma (2010), Zhou (2004), Xuan ve Li (2000), Şahin, vd. (2006), Noei, vd. (2009); ısı iletkenliği ölçümü Jung, vd. (2011), Lee, vd. (1999), Frusteri, vd. (2005); ısı iletkenliği iyileşmesi Hwang, vd. (2006); Jung ve Yoo (2009); Liu, vd. (2006); Wensel, vd. (2008); Hwang, vd. (2006); süspanسیونların ısı iletkenliği Putnam, vd. (2006); Assael, vd. (2004); Xie, vd. (2002) başlıkları bunlardan sadece birkaç tanesidir. Aynı zamanda literatürde deneysel çalışmalara dayanan ısı transferinin

iyileştirilmesi ve ısı iletkenlik üzerine birçok derleme de mevcuttur (Özerinç, vd., (2010b), Yu, vd., (2007), Yu, vd., (2008)).

Son yıllarda nanoakışkanların ısı transfer etkilerinin yanında viskozite ile ilgili çalışmalarda hız kazanmıştır. Isı transferinin iyileştirilmesi ve ısı iletkenlikle ilgili derlemelere ek olarak viskozite üzerine yapılmış derleme sayısı da oldukça fazladır (Mahbubul, vd., (2012); Mishra, vd., (2014); Murshed, vd., (2008); Kumar, vd., (2012); Hosseini, vd., (2011), vb). Nanoakışkanların viskozitelerinin belirlenmesinde kullanılan klasik modeller, teorik ve deneysel korelasyonlar Kumar, vd. (2012), Elçioğlu, vd. (2014) tarafından yapılmış olan derlemelerde ayrıntılı olarak verilmiştir. Rudyak (2013) tarafından yapılmış olan ayrı bir derleme çalışmasında nanoakışkan viskozitesi ile ilgili yapılan deneysel ve teorik çalışmalar ele alınmış, nanoakışkan viskozitesi üzerine etki eden parametreler irdelenmiştir.

Mahbubul, vd. (2012) tarafından hazırlanan derleme makalede nanoakışkanların hazırlanma yöntemleri, sıcaklık, parçacık boyutu ve şekli, hacimsel konsantrasyon gibi viskoziteyi etkileyen parametreler ayrı başlıklar altında ele alınarak nanoakışkan viskozitesi ile ilgili teorik modellere de yer verilmiştir. Deneysel çalışmalara göre nanoakışkan viskozitesinin, nanoparçacık konsantrasyonunun artması ile artarken; sıcaklığın artması ile azaldığı ve parçacık boyutunun viskoziteyi önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca elde edilen korelasyonların nanoakışkan viskozitesinin belirlenmesinde yetersiz olduğu belirtilmiştir.

Viskozite ile ilgili yapılan teorik ve deneysel çalışmalar ve nanoakışkan viskozitesinin belirlenmesinde kullanılan modeller ayrı başlıklar altında aşağıda özetlenmiştir.

2.1 Deneysel Çalışmalar

Ele alınan deneysel çalışmalarda nanoakışkan viskozitesinin nanoakışkan parçacık konsantrasyonu (ϕ), sıcaklık (T), parçacık çapı (d_p), nanoparçacık şekli (silindirik, dikdörtgensel, küresel, vb.), nanoparçacık kümelenmesi (aggregation), pH değeri, akışkan türü (su, etilen glikol, motor yağı, vb.), nanoparçacık malzemesi (ZnO_2 , Al_2O_3 , CuO, TiO_2 , vb.), kayma oranının etkisi (Newtonyen akış ve Newtonyen

olmayan akış) gibi parametrelerle ilişkisi incelenmektedir. Ayrıca deneysel çalışmalar nanoakışkan viskozitesi için oluşturulmuş modellerle karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırılan modeller Kısım 2.3' te ele alınmıştır.

İncelenen deneysel çalışmalar Çizelge 2.1 'de sıcaklık, parçacık çapı, hacimsel konsantrasyon, parçacık malzemesi ve temel akışkan dikkate alınarak özetlenmiştir.

Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından yapılan çalışmada TiO₂-su nanoakışkanın ısı iletkenlik ve dinamik viskozitesi, farklı nanoparçacık hacimsel konsantrasyonları ($0.2 \leq \phi \leq 2$) ve 15–35°C arasında değişen sıcaklıklar için deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmaya göre nanoakışkanın viskozite ve ısı iletkenlik değerinin, nanoparçacık hacimsel konsantrasyonun artması ile arttığı belirtilirken, ısı iletkenliğinin aksine, nanoakışkan viskozitesinin sıcaklığın artmasıyla azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca deneysel viskozite verileri Einstein (1906), Brinkman (1952), Batchelor (1977) modellerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmış ve bu modellerin deneysel verilere göre daha düşük sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Wang, vd. (1999) modelinden elde edilen viskozite değerlerinin ise diğer modellere kıyasla deneysel verilere oldukça yakın sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Deneysel veriler sonucu elde edilen viskozitedeki artış değerleri He, vd. (2007) tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırılmış olup sonuçların uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca deneysel verilerden yararlanılarak TiO₂-su nanoakışkan viskozitesini hesaplamak için kullanılacak yeni bir eşitlik önerilmiştir.

Heyhat, vd. (2013) tarafından, içerisinden Al₂O₃-su nanoakışkan geçen yatay bir tüpte laminer akış koşullarında ısı transfer katsayısı ve sürtünme faktörü deneysel olarak incelenmiştir. Al₂O₃ nanoparçacıkların boyutu 40 nm olup termofiziksel özellikler 20–60°C aralığındaki sıcaklık ve %0.1–2 aralığındaki nanoparçacık hacimsel konsantrasyonları için incelenmiştir. Isı transfer katsayısının, hacimsel konsantrasyonun ve Reynolds sayısının artması ile arttığı belirtilirken, tam gelişmiş akış bölgesinde %2 nanoparçacık hacimsel konsantrasyonunda ısı transferindeki artışın %32 olduğu ifade edilmiştir. Basınç kaybının, hacimsel konsantrasyonun artmasıyla arttığı belirtilmiş olup, Re=360 için %2 hacimsel konsantrasyonda temel akışkana göre 5.7 kat arttığı örnek olarak verilmiştir. Sıcaklığın viskozite üzerine

etkisinin de incelendiği çalışmada, dinamik viskozite oranının (nanoakışkan viskozitesi/temel akışkanın viskozitesi, $\mu_r = \mu_{nf}/\mu_{bf}$) neredeyse sıcaklıktan bağımsız olduğu ifade edilmiştir. Deneysel veriler kullanılarak Al₂O₃-su nanoakışkan viskozitesi için deneysel bir eşitlik önerilmiştir.

Williams, vd. (2008) tarafından Al₂O₃-su ve ZrO₂-su nanoakışkanların taşınım ısı transfer davranışı ve nanoakışkan viskozitesi deneysel olarak incelenmiştir. Al₂O₃ için parçacık boyutu yaklaşık 46 nm ve ZrO₂ için 60 nm olduğu belirtilmiştir. Dairesel boruda, Reynolds 9000<Re<63000 aralığında, sıcaklık 21–76°C, ve Al₂O₃-su nanoakışkanın %0.9–3.6, ZrO₂-su nanoakışkanın % 0.2– 0.9 arasında değişen hacimsel konsantrasyonu için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler kullanılarak viskozite için deneysel eşitlikler elde edilmiştir.

Düşük sıcaklıklardaki nanoakışkanların termofiziksel ve reolojik özellikleri Kulkarni, vd. (2007) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. SiO₂, Al₂O₃ ve CuO nanoparçacıkları ve temel akışkan olarak etilen glikol-su karışımı kullanılmıştır. Parçacık çapı (20, 50 ve 100 nm), parçacıkların hacimsel konsantrasyonu (%6–10) ve sıcaklık parametrelerinin (-35–50 °C) nanoakışkan ısı transfer katsayısı ve viskozitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Türbülanslı akış rejimi için nanoakışkanların ısı transfer katsayısının parçacık hacimsel konsantrasyonunun ve çapının artmasıyla arttığı belirtilmiştir. Nanoakışkanın dinamik viskozitesinin nanoparçacık konsantrasyonu ile arttığı ve bunun negatif sıcaklıklarda daha etkili olduğu belirtilmiştir. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklık ve parçacık çapının artışıyla ters orantılı olarak azaldığı belirtilmiştir.

Aladağ, vd. (2012) tarafından sıcaklığın ve kayma oranının viskozite üzerindeki etkisi deneysel olarak Al₂O₃-su ve CNT-su nanoakışkanları için 2–10 °C arasındaki sıcaklıklar ve farklı konsantrasyonlarda incelenmiştir. İncelenen sıcaklık aralığında kayma gerilmesine bağlı olarak nanoakışkanların Newtonyen ya da Newtonyen olmayan akışkan özellikleri gösterip göstermediği incelenmiştir. Yüksek kayma oranlarında CNT-su nanoakışkanın Newtonyen özellik gösterirken Al₂O₃-su nanoakışkanın Newtonyen olmayan akış özelliği gösterdiği belirtilmiştir.

Çizelge 2.1 Nanoakışkan viskozitesi ile ilgili incelenen deneysel çalışmalar

Referans	Nanoparçacık	Temel akışkan	Sıcaklık(°C)	Parçacık çapı (nm)	ϕ
Timofeeva, vd. (2007)	Al ₂ O ₃	EG, H ₂ O	23°C	$d_p = 11,20,40$	% 0.5– 10
Kulkarni, vd. (2007)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ ve CuO	EG, H ₂ O	-35 – 50 °C	$d_p = 20$ (SiO ₂) $d_p = 50$ (Al ₂ O ₃) $d_p = 100$ (CuO)	%6–10
Tavman, vd. (2008)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	H ₂ O	20 – 50 °C	$d_p = 12$ (SiO ₂) $d_p = 30$ (Al ₂ O ₃)	%0.45– 4 %0.5– 1.5
Williams, vd. (2008)	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	H ₂ O	21 – 76 °C	$d_p = 46$	% 0.9– 3.6 % 0.2– 0.9
Timofeeva, vd. (2009)	Al ₂ O ₃ (platelet, pale, silindir, tuğla)	EG, H ₂ O	15 – 85 °C	Platelet $d_p = 9$, pale $d_p = 60$ <i>uzunluk</i> = 10, silindirik $d_p = 10$ <i>uzunluk</i> = 80 , tuğla tüm kenarlar 40 nm	% 1– 8.4
Chandrasekar, vd. (2010)	Al ₂ O ₃	H ₂ O	Oda sıcaklığında	$d_p = 43$	%0.33– 5

Pastoriza-Gallego, vd.(2011)	CuO	H ₂ O	10 – 50 °C	$d_p = 33 \pm 13$ $d_p = 11 \pm 3$	%0.16– 1.7
Aladağ, vd., (2012)	Al ₂ O ₃ , MWCNT	H ₂ O	2,5,7,10°C	$d_p = 30$ (Al ₂ O ₃) $d_p \cong 9000$ $L \cong 200000$ (MWCNT)	%1(ağırlıkça konsantrasyon) %1(ağırlıkça konsantrasyon)
Utomo, vd., (2012)	TiO ₂ , Al ₂ O ₃	H ₂ O	20°C	$d_p = 20,30$ (TiO ₂) $d_p = 50,60$ (Al ₂ O ₃)	%1–12 (~)
Heyhat , vd., (2013)	Al ₂ O ₃	H ₂ O	20 – 60 °C	$d_p = 40$	%0.1–2
Halelfadl, vd., (2013)	CNT	H ₂ O	0 – 40 °C	$d_p = 9.2$ $L = 1500$	%0.0055–0.55
Jeong, vd., (2013)	ZnO	H ₂ O	25 °C	$d_p = 150 – 370$ dikdörtgensel $d_p = 87 – 150$ silindirik	%0.05–5

Not: EG, MWCNT (Multiwall Carbon Nanotubes), CNT, L, d_p sırasıyla etilen glikol, çok duvarlı karbon nanotüpler, karbon nanotüp, nanotüp uzunluğu ve parçacık çapını ifade etmektedir.

Halelfadl, vd. (2013) tarafından parçacık hacimsel konsantrasyon (%0.0055–0.55) ve sıcaklık parametrelerinin (0–40 °C) CNT-su nanoakışkanın viskozitesi üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yüksek hacimsel konsantrasyonlarda nanoakışkanın Newtonyen olduğu ve yüksek kayma gerilmelerinde nanoakışkanın bağıl viskozitesinin sıcaklıkla değişmediği belirtilmiştir. Ayrıca CNT-su nanoakışkanı için elde edilen viskozite verileri Einstein (1906), Brinkman (1952), Batchelor (1977), Krieger-Dougherty (1959) ve Maron ve Pierce (1956) modelleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların nanoparçacık kümelenme etkisini dikkate alan Maron ve Pierce modeliyle uyumlu olduğu ancak çalışmada söz edilen diğer modellerin ise hacimsel konsantrasyonun %0.027 değerini geçtiği durumlarda deneysel sonuçlar ile uyumlu olmadığı belirtilmiştir.

Utomo, vd. (2012) tarafından TiO₂-su ve Al₂O₃-su nanoakışkanların ısı iletkenlik, viskozite ve ısı transfer katsayıları teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Ölçümler 20°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş, parçacık boyutları sırası ile titanya için 20, 30 nm ve alümina için 50, 60 nm olarak verilmiştir. Ölçülen ısı iletkenlik değerleri Maxwell (1891) modelinden elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında Al₂O₃-su nanoakışkanı için uyumlu sonuçlar elde edilirken TiO₂-su nanoakışkanı için modelin düşük sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Literatürde Maxwell (1891) modelinin nanoakışkan ısı iletkenliği için deneysel verilerden daha yüksek sonuçlar verdiğini ifade eden çalışmalarla beraber (Wen, vd., 2004) daha düşük sonuçlar verdiğini ifade eden çalışmalarda mevcuttur (Timofeeva, vd., 2007). Ayrıca bu çalışmada incelenen nanoakışkanların ısı iletkenliğinde temel akışkana kıyasla anormal bir iyileşmenin gerçekleşmediği belirtilmiştir. Bu çalışmaya göre alümina ve titanya nanoakışkanların viskozitesinin nanoparçacıkların kümelenmesinden dolayı Einstein (1906), Batchelor (1977) modelleri kullanılarak hesaplanan viskozite değerlerinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Jeong, vd. (2013) tarafından yapılan deneysel çalışmada, parçacık şeklinin ZnO-su nanoakışkanın viskozite ve ısı iletkenliği üzerindeki etkisi dikdörtgensel ve küresel parçacıkların kullanıldığı %0.05–5 arasında değişen hacimsel konsantrasyonlarda incelenmiştir. Hacimsel konsantrasyonun artmasıyla nanoakışkan viskozitesinin %69'a kadar arttığı, viskozitedeki artışın dikdörtgen şeklindeki nano parçacıklarda

küresel olanlara oranla %7.7 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Viskozite için elde edilen veriler Brinkman (1952), Batchelor (1977), Timofeeva, vd. (2009) ve Chen, vd. (2007) modelleri ile karşılaştırılmıştır. Nanoparçacık çapı ve şeklini dikkate almadığı belirtilen Brinkman (1952) ve Batchelor (1977) modelleri kullanılarak elde edilen viskozite değerlerinin küresel ve dikdörtgenel parçacıklar için, bu çalışmada elde edilen verilerden sırasıyla %14 ve %16 oranında daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Timofeeva, vd. (2009) modelinden elde edilen viskozite değerlerinin ise en çok sapma gösteren model (deneysel viskozite değerlerinden daha büyük) olduğu, kümelenme etkisini dikkate aldığı belirtilen Chen, vd. (2007) modelinin dikdörtgenel parçacıklar için %2.2, küresel parçacıklar için ise %1.7 oranında ortalama bir sapma gösterdiği ifade edilmiştir.

Parçacık şeklinin, nanoparçacık hacimsel konsantrasyonun ve sıcaklığın Al₂O₃-etilen glikol&su (50:50) nanoakışkanın ısı iletkenliği ve viskozitesi üzerine etkisi Timofeeva, vd. (2009) tarafından deneysel olarak incelenmiştir. Nanoakışkan viskozitesinin sıcaklık arttıkça azaldığı, hacimsel konsantrasyonun artmasıyla arttığı belirtilirken aynı zamanda nanoakışkan viskozitesinin parçacık şekli ve parçacıkların yüzey özelliklerine bağlı olduğu ifade edilmiştir. Nanoparçacıkların uzun-ince (elongated particles) şekle sahip olması ve nanoparçacık kümelenmesinin aynı hacimsel konsantrasyonda Brownian hareketini sınırladığı ifade edilerek bu durumun viskoziteyi arttırdığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada, daha düşük viskoziteler için küresel ya da en-boy oranı daha küçük olan küresel nanoparçacıkların kullanılması önerilmektedir. Nanoparçacıklarda meydana gelen yüzey yükünün (surface charge) nanoparçacık ve temel akışkan arasındaki etkileşimi ve kümelenmeyi arttırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca pH parametresinin nanoakışkan viskozitesi üzerine etkisi de ele alınmış olup pH değerinin ayarlanması ile alümina bazlı nanoakışkan viskozitesinin, ısı iletkenlikte büyük değişim olmadan ayarlanabileceği ifade edilmiştir.

Pastoriza-Gallego, vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada Al₂O₃-etilen glikol nanoakışkanın viskozitesi ve ısı iletkenliği deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada 43 nm ve 8 nm boyutundaki parçacıklar için 283.15–323.25 K aralığındaki sıcaklıklarda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Parçacık çapının azalmasıyla viskozitenin arttığı belirtilirken, ısı iletkenlik ve viskozitenin, hacimsel konsantrasyonla arttığı

ancak sıcaklığın artması ile viskozitenin azaldığı, ısı iletkenliğinin ise arttığı ifade edilmiştir. Elde edilen verilerin Krieger ve Dougherty (1959) modeli ile uyumlu sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Chandrasekar, vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada Al_2O_3 -su nanoakışkanının viskozite ve ısı iletkenlik değerleri, 43 nm parçacık çapı ve %0.33–5 arasında değişen hacimsel konsantrasyonlar için deneysel olarak oda sıcaklığında incelenmiştir. Hacimsel konsantrasyonun artmasıyla ısı iletkenliğinin doğrusal olarak arttığı, viskozitenin ise %2 den büyük hacimsel konsantrasyonlarda parabolik olarak arttığı belirtilmiştir. Bu durumun yüksek hacimsel konsantrasyonlarda parçacıkların birbirini etkilemesi nedeniyle akışta meydana gelen düzensizlikten kaynaklandığı ifade edilmiştir. Aynı zamanda çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak viskozite ve ısı iletkenlik modelleri elde edilmiştir.

Tavman, vd. (2008) tarafından yapılan deneysel çalışmada SiO_2 -su ve Al_2O_3 -su nanoakışkanların farklı parçacık hacimsel konsantrasyon ve sıcaklıklar için ısı iletkenlik ve viskozite değerleri incelenmiştir. Deneyler SiO_2 ($d_p = 12$ nm) nanoparçacığının %0.45–4, Al_2O_3 ($d_p = 30$ nm parçacık çapında) nanoparçacığının %0.5–1.5 hacimsel konsantrasyonları ve 20–50 °C arasında değişen sıcaklıklar için yapılmıştır. Viskozite için elde edilen veriler Einstein (1906) modeli ile karşılaştırılmış ve uyumsuz sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Nanoakışkan viskozitesinin her iki nanoakışkan için hacimsel konsantrasyonun artması ile arttığı belirtilen sıcaklık aralığında sıcaklık artışıyla azaldığı ifade edilmiştir.

Yukarıda incelenen deneysel çalışmalarda nanoparçacık hacimsel konsantrasyonunun artması ile viskozitenin arttığı (Duangthongsuk ve Wongwises (2009), Heyhat, vd. (2013), Kulkarni, vd. (2007), Jeong, vd. (2013), Timofeeva, vd. (2009), Pastoriza-Gallego, vd. (2011), Tavman, vd. (2008)); parçacık çapının artması ile viskozitenin azaldığı (Kulkarni, vd. (2007), Pastoriza-Gallego, vd. (2011)); sıcaklığın artması ile viskozitenin azaldığı (Duangthongsuk ve Wongwises (2009), Kulkarni, vd. (2007), Timofeeva, vd. (2009), Pastoriza-Gallego, vd. (2011), Tavman, vd. (2008)) bağıl viskozitenin ise sıcaklıktan neredeyse bağımsız olduğu (Heyhat, vd. (2013), Halelfadl, vd. (2013)); dikdörtgenel parçacık şekline sahip olan nanoparçacıkların

diğer parçacıklara göre daha yüksek viskoziteye sahip olduğu (Jeong, vd. (2013), Timofeeva, vd. (2009)) ifade edilmiştir. Deneysel çalışmalarda nanoakışkan viskozitesinin teorik çalışmalara göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

2.2 Teorik Çalışmalar

Heidary ve Kermani (2010), sinüzoidal bir kanaldaki akış alanını ve taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Momentum ve enerji eşitlikleri SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure-Linked) ayrıklaştırma tekniğine dayanan Sonlu Hacimler Metodu kullanılarak çözülmüştür. Simülasyon için CuO-su nanoakışkanın kullanıldığı çalışmada temel akışkan ile parçacıklar arasındaki sürtünme etkileri ihmal edilmiş olup ısı olarak dengede oldukları kabul edilmiştir. Nanoparçacık ve temel akışkanın ortam sıcaklığındaki fiziksel özellikleri kullanılarak nanoakışkanın termofiziksel özellikleri hesaplanmıştır. Nanoakışkan viskozitesi ve ısı iletkenliği Brinkman (1952) ve Maxwell (1891) modelleri kullanılarak hesaplanmıştır. Akışın farklı Reynolds sayıları ($5 \leq Re \leq 1500$), nanoparçacık hacimsel konsantrasyonları ($0 \leq \phi \leq 20$) ve dalga genliği ($0 \leq \alpha \leq 0.3$) için ortalama Nusselt sayısı ve yüzey sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada temel akışkana nanoparçacık eklenmesinin ve sinüzoidal kanalın, cidar ile akışkan arasındaki ısı transferini arttırdığı, Reynolds sayısının ve dalga genliğinin artması ile ısı transferinin arttığı ($\phi = 10$, $Re = 1000$ için ısı transferinde %25 artış ve $Re = 250$, $\alpha = 0.3$ için ısı transferinde %50 artış olduğu belirtilmiştir) ifade edilmiştir. Ayrıca Reynolds sayısının artması ile yüzey sürtünme katsayısının arttığı, sinüzoidal kanalda yüzey sürtünme katsayısının temel akışkana nanoparçacık eklenmesi ile azaldığı ve hacimsel konsantrasyon ile değişmediği belirtilmiştir.

Temel akışkan olarak suyun kullanıldığı kare şeklindeki bir mikro kanallı ısı değiştiricisinde farklı nanoparçacıklar (alümina (Al_2O_3), silika (SiO_2), gümüş (Ag) ve titanya (TiO_2)) kullanılmasının, hacimsel konsantrasyonların (%2, 5 ve 10) ve Reynolds sayılarının nanoakışkanın ısı transferi ve akış karakteristiği üzerine etkisi Mohammed, vd. (2011) tarafından Sonlu Hacimler Metodu kullanılarak incelenmiştir. Isı değiştiricisinin performansı sıcaklık profili, ısı transfer oranı, ısı transfer katsayısı, basınç düşümü, cidar kayma gerilmesi, pompa gücü, ısı

değiştiricisi etkinliği gibi parametrelere göre değerlendirilmiştir. Çalışmada nanoakışkanların ısı değerlendiricisinin ısıl özelliklerini ve performansının arttırdığı belirtilirken, basınç kaybını temel akışkana göre önemli oranda arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca Reynolds sayısının artması ile pompalama gücünün arttığı ve ısı değerlendirici etkinliğinin azaldığı belirtilmiştir. Nanoakışkanların ısı transfer performanslarının da karşılaştırıldığı çalışmada alümina-su nanoakışkanın en yüksek ısı transfer katsayısına sahip olduğu, gümüş-su nanoakışkanın ise diğer nanoakışkanlara göre en düşük basınç kaybına sahip olduğu ifade edilmiştir.

Corcione (2011) literatürde mevcut olan deneysel verilere dayanarak ısıl iletkenlik ve viskozite için yarı ampirik eşitlikler oluşturmuştur. Bu eşitlikler literatürde yer alan farklı nanoakışkanlara ait deneysel değerler kullanılarak elde edilmiştir. Temel akışkanlar olarak su, etilen glikol (EG), propilen glikol (PG) ve etanol (Eth), nanoparçacık olarak 25–200 nm çapları arasında değerşen Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 ve Cu verilmiştir. Parçacıkların hacimsel konsantrasyonu %0.01–7.1 arasında değerşmekte olup sıcaklık aralığı 293–333 K'de alınmıştır. Bağıl viskozitenin nanoparçacık hacimsel konsantrasyonu ile doğru, nanoparçacık çapı ile ters orantılı olduğu, sıcaklıktan ise neredeyse bağımsız olduğu belirtilmiştir.

Davarnejad ve Ardehali (2014) tarafından TiO_2 -su nanoakışkanın kullanıldığı yatay bir boruda Nusselt sayısı ve basınç düşümü sayısal olarak incelenmiştir. TiO_2 nanoparçacığın farklı hacimsel konsantrasyonları ($0.002 \leq \phi \leq 0.02$) için tek fazlı, türbülanslı akış durumunda ($8000 < Re < 51000$) Sonlu Hacimler Metodu kullanılarak SIMPLE algoritması ile zlmştir. Reynolds sayısı ve hacimsel konsantrasyonunun basınç kaybı ve taşınımla ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada, Reynolds sayısı ve hacimsel konsantrasyonun artmasıyla taşınımla ısı transfer katsayısı ve basınç kaybının arttığı belirtilmiştir.

Vajravelu, vd. (2013) tarafından viskoz sönümlemenin varlığında sıcaklığa bağlı nanoakışkan viskozitesinin (nano akışkan viskozitenin sıcaklıkla ters orantılı olarak değerştiği kabul edilmiştir) akış ve ısı transferi üzerindeki etkisi Keller-box metodu kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Ag-su ve Cu-su nanoakışkanlarının

hacimsel konsantrasyonun artmasıyla hız profilinin azaldığı ancak ısı transferi ve dolayısı ile ısı sınır tabaka kalınlığının arttığı ifade edilmiştir.

Pourmahmoud, vd. (2014) CuO-su nanoakışkan içeren iki boyutlu her iki yüzeyi hareketlendirilmiş kavitede, doğal ve zorlanmış taşınımı (mixed-convection) içeren laminer, sıkıştırılmaz akışı Sonlu Farklar Metodu kullanarak incelemişlerdir. Sıcaklık, nanoparçacıkların Brownian hareketi, kümelenme yarıçapı gibi farklı etkileri dikkate alıp almamasına göre farklılık gösteren sekiz viskozite modeli (Brinkman, Nguyen, Nielsen, Koo-Kleinstreuer, Chen, Kriger-Dougherty, Azmi, modelleri) ısı transferindeki iyileşme ve ortalama Nusselt sayısındaki artış dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Farklı hacimsel konsantrasyonlar ($\phi=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$) ve Richardson sayısı ($Ri = 0.1, 1, 10$) için hesaplamalar yapılmıştır. Diğer parametreler sabit tutulduğunda Ri sayısının artmasıyla ısı transferinin arttığı ifade edilmiştir. Brownian hareketi ve sıcaklığın etkisi dikkate alındığında ısı transferinde daha büyük artışların meydana geldiği ayrıca Nguyen, Koo-Kleinstreuer modellerinde diğer modellere göre Nusselt sayısında daha büyük değerler elde edildiği belirtilmiştir. Nanoparçacık çapı ve nanoakışkan sıcaklığını dikkate alan Nguyen modelinin CuO-su nanoakışkanı için en iyi sonuçları verdiği belirtilmiştir.

Rudyak, vd. (2014) tarafından yapılan sayısal çalışmada parçacık çapı ve kullanılan nanoparçacık tipinin nanoakışkan viskozitesi üzerine etkisi incelenmiştir. Parçacık çapının azaldıkça viskozitenin arttığı ifade edilmiştir. Rudyak, vd. (2014) aksine He, vd. (2007) ve Nguyen, vd. (2007) çalışmalarında nanoparçacık çapının artmasıyla viskozitenin azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca nanoakışkan viskozitesinin kullanılan parçacık tipine de bağlı olduğu belirtilmiştir.

2.3 Viskozite Modelleri

Akışkanlara nanoparçacıklar eklenmesiyle meydana gelen viskozitedeki artış, basınç düşüşünün ve dolayısıyla pompalama gücünün artmasına neden olur. Bu artış birçok deneysel çalışmada ele alınmakla beraber viskozite değerleri teorik ve deneysel modellerle ortaya konulmuştur. Nanoakışkanlar, içerisinde katı ve sıvı fazda malzemelerin bulunduğu, iki fazlı malzemeler olarak ele alınabilir (Yu ve Xie, 2012). Nanoakışkan viskozitesi için oluşturulmuş modeller geleneksel karışımlar için oluşturulmuş modeller ve nanoakışkanlar için oluşturulmuş teorik ve deneysel eşitlikler olarak ayrılmaktadır. Geleneksel süspansiyonlar için oluşturulmuş modelleri klasik modeller olarak adlandırmak mümkündür. Ancak bu modellerin uygulanabilirliğinin sınırlı olduğunu belirtmekte fayda vardır (Elçioğlu, 2013).

Bu çalışmada model kavramı klasik modeller için kullanılırken, korelasyon kavramı nanoakışkanlar için oluşturulmuş teorik ve deneysel çalışmalarla elde edilen viskozite eşitliklerini ifade etmek için kullanılmıştır. Bağlı viskozite kavramı nanoakışkan viskozitesinin (μ_{nf}) temel akışkan viskozitesine oranı (μ_{bf}) olarak ifade edilmiş olup $\mu_r = \mu_{nf}/\mu_{bf}$ şeklinde gösterilmiştir.

Geleneksel süspansiyonlar için oluşturulmuş ve nanoakışkan viskozitesi için de kullanılan klasik Modeller ve bu modellerden türetilmiş nanoakışkan viskozite modelleri ile teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen korelasyonlar kronolojik sırayla Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3 te gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Klasik modeller

Model Adı	Model	Notlar
Einstein (1906)	$\mu_r = (1 + 2.5\phi)$ (2.1)	Düşük hacimsel konsantrasyonlar ($0 < \phi \leq 0.001$) ve küresel parçacıklar için elde edilmiştir. Parçacıklar arasında etkileşimin olmadığı varsayılmıştır.
Brinkman (1952)	$\mu_r = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}}$ (2.2)	Einstein modelinden geliştirilmiştir. $\phi \leq 0.04$ hacimsel konsantrasyonlar için elde edilmiştir. Einstein modeline göre araştırmacılar tarafından daha çok kabul görmüştür.
Krieger ve Dougherty (1959)	$\mu_r = (1 - \frac{\phi}{\phi_m})^{-\eta\phi_m}$ (2.3)	Yarı deneysel bir modeldir. Kümelerin maksimum dolgulama oranı ϕ_m parametresi durağan (quiescent) koşullarda 0.495 ile 0.54 arasında değer alırken, yüksek kayma oranlarında yaklaşık 0.605 olarak alınmıştır. η parametresinin değeri ise, küresel parçacıkların tekil dağılımlı (mono disperse) süspansiyonları için 2.5'tir.
Nielsen (1970)	$\mu_r = (1 + 1.5\phi)e^{\phi/(1-\phi_m)}$ (2.4)	Parçacıklar arasındaki etkileşim dikkate alınmış hacimsel konsantrasyonun 0.02 den büyük olduğu durumlar için matematiksel eşitlik elde edilmiştir.

Çizelge 2.3 Klasik modellere dayanan veya deneysel çalışmalarla elde edilen teorik ve deneysel korelasyonlar

Model Adı	Model	Notlar
Eilers, vd. (1942)	$\mu_r = 1 + 2.5\phi + (1.5625 + (2.5/\phi_{\max}))\phi^2 + \dots$ (2.5)	Küresel parçacıklar için $0.536 \leq \phi_{\max} \leq 0.7405$ geçerli maksimum parçacık hacimsel konsantrasyonuna dayanmaktadır.
De Bruijn(1942)	$\mu_r = (1 + 2.5\phi + 4.698\phi^2)$ (2.6)	Küresel şekilli nanoparçacıklar için geçerlidir.
Vand (1948)	$\mu_r = (1 + 2.5\phi + 7.349\phi^2 + \dots)$ (2.8) $\mu_r = e^{2.5\phi} = (1 + 2.5\phi + 3.125\phi^2 + \dots)$ (2.9)	Küresel şekilli nanoparçacıklar için elde edilmiştir.
Saito (1950)	$\mu_r = (1 + 2.5\phi + 2.5\phi^2 + \dots)$ (2.10)	Küresel parçacıklar için hacimsel konsantrasyona bağlı olarak elde edilmiştir.
Mooney (1951)	$\mu_r = 1 + 2.5\phi + (3.125 + (2.5/\phi_{\max}))\phi^2 + \dots$ (2.11)	$0.536 \leq \phi_{\max} \leq 0.7405$ konsantrasyonunda küresel parçacıklar için geçerlidir.
Simha (1952)	$\mu_r = 1 + 2.5\phi + (125/(64\phi_{\max}))\phi^2 + \dots$ (2.12)	$0.536 \leq \phi_{\max} \leq 0.7405$ konsantrasyonunda küresel parçacıklar için geçerlidir.
Maron ve Pierce (1956)	$\mu_r = (1 - \frac{\phi}{\phi_m})^{-2}$ (2.13)	Kümelerin maksimum dolgulama oranını (ϕ_m) dikkate alarak oluşturulmuştur. Silindirik parçacıklarda, en-boy

		oranı dikkate alınarak fiber süspansiyonlar içinde kullanılabilen bir korelasyondur.
Eshelby (1957)	$\mu_r = 1 + \frac{15}{2} \frac{1 - \sigma}{4 - 5\sigma} \phi \quad (2.14)$	Parçacık Poisson oranı ($\sigma = 1/3$) dikkate alınarak elips şeklindeki parçacıklar için model oluşturulmuştur.
Frankel ve Acivos (1967)	$\mu_r = \frac{9}{8} \left[\frac{(\phi/\phi_{\max})^{\frac{1}{3}}}{1 - (\phi/\phi_{\max})^{\frac{1}{3}}} \right] \quad (2.15)$	$0.536 \leq \phi_{\max} \leq 0.7405$ konsantrasyonlarda küresel parçacıklar için matematiksel bir ifade geliştirilmiştir.
Kruger (1972)	$\mu_r = 1 + (1.82/\phi_{\max})\phi + (2.5662/\phi_{\max}^2)\phi_{\max}^2 \quad (2.16)$	$0.536 \leq \phi_{\max} \leq 0.7405$ konsantrasyonlarda küresel parçacıklar için geçerlidir.
Graham (1981)	$\mu_r = 1 + 2.5\phi + 4.5 \left[\frac{4}{\frac{h}{d_p} \left(2 + \frac{h}{d_p} \right) \left(1 + \frac{h}{d_p} \right)^2} \right] \quad (2.17)$	Parçacık çapı (d_p) ve parçacıklar arası boşluk (h) dikkate alınarak küresel parçacıklar için model tanımlanmıştır.
Pak ve Cho (1998)	$\mu_r = (1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2) \quad (2.18)$	TiO ₂ -su nanoakışkan için parçacık hacimsel konsantrasyonu dikkate alınarak oluşturulmuş deneysel bir eşitliktir.
Wang, vd. (1999)	$\mu_r = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \quad (2.19)$	Al ₂ O ₃ -su nanoakışkanı için oluşturulmuştur.

Tseng ve Lin (2003)	$\mu_r = 13.47e^{35.98\phi}$ (2.20)	TiO ₂ -su nanoakışkan için parçacık konsantrasyonu baz alınarak kayma oranı $\gamma = 100 \text{ s}^{-1}$ değeri için oluşturulmuştur.
Putra, vd. (2003)	$\mu_r = 2.9x10^{-7}T^2 - 2x10^{-4}T + 3.4x10^{-2} \quad \phi = \%1$ (2.21) $\mu_r = 3.4x10^{-7}T^2 - 2.3x10^{-4}T + 3.9x10^{-2} \quad \phi = \%4$ (2.22)	Sıcaklığın nanoakışkan viskozitesi üzerine etkisinin incelendiği deneysel çalışmada %1 ve %4 hacimsel konsantrasyonlarındaki Al ₂ O ₃ -su nanoakışkanı deneysel eşitlikler elde edilmiştir.
Tang, vd. (2004)	$\mu_{nf} = 2.761x10^{-6} \exp\left(\frac{1713}{T}\right)$ (2.23)	36 ve 47 nm parçacık çaplarındaki Al ₂ O ₃ -su nanoakışkanı kullanılarak incelemelerin yapıldığı deneysel çalışmada sıcaklığın etkisi dikkate alınarak deneysel eşitlik oluşturulmuştur.
Maïga, vd. (2004)	$\mu_r = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \quad \text{Al}_2\text{O}_3\text{-su}$ (2.24) $\mu_r = (1 - 0.19\phi + 306\phi^2) \quad \text{Al}_2\text{O}_3\text{-etilen glikol}$ (2.25)	Al ₂ O ₃ -su ve Al ₂ O ₃ -EG nanoakışkan viskoziteleri deneysel olarak incelenmiş ve konsantrasyona bağlı eşitlikler elde edilmiştir. Denklem 2.4, denklem 2.19 Wang, vd. (1999) tarafından elde edilen korelasyonla aynı olup literatürde iki çalışma olarak ayrı ayrı sunulmaktadır.

Kulkarni, (2006)	vd.	$\ln(\mu_{nf}) = -(2.8751 + 53.548\phi - 107.12\phi^2) + \frac{(1078.3 + 15857\phi - 20587\phi^2)}{T} \quad (2.26)$	CuO-su nanoakışkanın 5°C–50°C arasında değişen sıcaklıklar dikkate alınarak matematiksel eşitlik elde edilmiştir. Bu eşitlik sıcaklığın artmasıyla viskozitenin üstel olarak azaldığını göstermektedir. Sıcaklık Kelvin olarak alınmıştır.
Namburu, (2007)	vd.	$\text{Log}(\mu_{nf}) = Ae^{-BT} \quad (2.27)$ $A = (165.56 - 29.643\phi + 1.8375\phi^2)$ $B = (0.0186 - 0.001\phi + 4 \times 10^{-6}\phi^2)$ <p>Korelasyon katsayısı $R^2 > 0.99$</p>	CuO-su nanoakışkanın $\phi = 0 - 6.12$ arasında değişen hacimsel konsantrasyonlarda elde edilmiş deneysel eşitliklerdir. Sıcaklığın ve nanoparçacık hacimsel konsantrasyonunun nanoakışkan viskozitesi üzerine etkisini dikkate almaktadır. μ_{nf} senti poise (cP), T Kelvin (K), A ve B konsantrasyona bağlı katsayılarıdır.
Chen, (2007)	vd.	$\mu_r = (1 + 10.6\phi + 10.6\phi^2) \quad (2.28)$ <p>Korelasyon katsayısı $R^2 > 0.9989$dır.</p>	Bağıl viskozitenin sadece konsantrasyonun bir fonksiyonu olduğu ve sıcaklıktan bağımsız olduğu ifade edilmiştir.
Nguyen, (2007)	vd.	$\mu_r = 0.904e^{0.1482\phi} \quad 47 \text{ nm Al}_2\text{O}_3 - \text{su} \quad (2.29)$ $\mu_r = 1 + 0.025\phi + 0.015\phi^2 \quad 36 \text{ nm Al}_2\text{O}_3 - \text{su} \quad (2.30)$ $\mu_r = 1.475 - 0.391\phi + 0.051\phi^2 + 0.09\phi^3 \quad \text{CuO-su} \quad (2.31)$	Al_2O_3 -su ve CuO-su nanoakışkanları için ampirik eşitlikler ortaya konulmuştur. Düşük konsantrasyonlar dışında Brinkman ve Batchelor modellerinin viskoziteyi tahmin etmede yetersiz olduğu ve deneysel verilerden daha düşük sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Williams, vd. (2008)	$\frac{\mu_{nf}(\phi, T)}{\mu_{bf}(T)} = \mu_r = \exp\left(\frac{4.91\phi}{0.2092 - \phi}\right) \text{ Al}_2\text{O}_3 - \text{su} \quad (2.32)$ $\frac{\mu_{nf}(\phi, T)}{\mu_{bf}(T)} = \mu_r = \exp\left(\frac{11.19\phi}{0.1960 - \phi}\right) \text{ ZrO}_2 - \text{su} \quad (2.33)$	Al ₂ O ₃ parçacık boyutu yaklaşık 46 nm ve ZrO ₂ için 60 nm olduğu belirtilmiştir. 21°C–76°C sıcaklıkları arasındaki Al ₂ O ₃ -su için % 0.9–3.6, ZrO ₂ -su için % 0.2–0.9 arasında değişen hacimsel konsantrasyonlarda elde edilen veriler kullanılarak ampirik eşitlik elde edilmiştir.
Duangthongsuk ve Wongwises (2009)	$\mu_r = (a + b\phi + c\phi^2) \quad (2.34)$	%0.2≤φ≤2, 15°C–35°C arasında değişen hacimsel konsantrasyonlar ve sıcaklıklarda TiO ₂ -su nanoakışkanı kullanılarak yapılan deneysel çalışmada, deneysel bir eşitlik elde edilmiştir. a, b, c deneysel sabitler olup Çizelge 2.4'te bu değerler verilmiştir.
Timofeeva, vd. (2009a)	$\mu_r = 1 + A_1\phi + A_2\phi^2 \quad (2.35)$	Al ₂ O ₃ -su & EG için yapılan deneysel çalışmada parçacık şeklinin viskozite üzerine etkisi dikkate alınmıştır. 15°C–85°C, %1–8.4 arasında değişen sıcaklıklar ve hacimsel konsantrasyonlar için veriler elde edilmiştir. A ₁ , A ₂ deneysel sabitler olup 25 °C sıcaklıkta elde edilen değerler Çizelge 2.5'te verilmiştir. Platelet $d_p = 9 \text{ nm}$, pale $d_p = 60 \text{ nm}$ uzunluk = 10 nm, silindirik $d_p = 10 \text{ nm}$ uzunluk = 80 nm, tuğla tüm kenarlar 40 nm olarak verilmiştir.

Chandrasekar, vd. (2010)	$\mu_r = 1 + b \left(1 - \frac{\phi}{1 - \phi} \right)^n \quad (2.36)$	<p>Al₂O₃-su ($d_p = 43 \text{ nm}$) nanoakışkanın oda sıcaklığında, %0.33–5 arasındaki hacimsel konsantrasyonlarda elde edilen deneysel veriler kullanılarak elde edilmiştir. b ve n sabitler olup $b=1631$ $n=2.8$ olarak alınmıştır. Denklem 2.36’da b katsayısının parçacıklar arasındaki elektriksel etkileşime, sıvı fazın özelliklerine ve yapısına, fazlar arasındaki etkileşime, akışkan içerisine eklenen ilave maddelere ayrıca parçacık yüzey alanı ve geometrisine bağlı olduğu belirtilmiştir.</p>
Corcione (2011)	$\mu_r = \left(\frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \right)$ $d_f = 0.1 \left(\frac{6M}{N\pi\rho_{f0}} \right)^{1/3}$ <p style="text-align: right;">(2.37)</p>	<p>Literatürde mevcut olan deneysel verilere dayanarak viskozite için yarı deneysel eşitlik oluşturmuştur. Dinamik viskozite verileri su, EG, PG, Eth temel akışkanları içerisine ilave edilmiş parçacık çapları 25–200 nm arasında değişen alümina (Al₂O₃), titanya (TiO₂), silika (SiO₂) ve bakır (Cu) nanoparçacıklarını içeren nanoakışkanlardan oluşmaktadır. Parçacıkların hacimsel konsantrasyonu % 0.01–7.1 arasında değişmekte olup sıcaklık aralığı 293–333 K ‘dir.</p>

Azmi, (2012)	vd.	$\mu_r = \left(1 + \frac{\phi}{100}\right)^{11.3} \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{-0.038} \left(1 + \frac{d_p}{170}\right)^{-0.061} \quad (2.38)$	36 ve 47 nm çaplarındaki Al ₂ O ₃ nanoparçacığı ve 29 nm çaplarındaki CuO nano parçacığı için literatürdeki 233 deneysel data kullanılarak eğri uydurulmuş ve ampirik bir eşitlik önerilmiştir.
Heyhat, (2013)	vd.	$\mu_r = \exp\left(\frac{5.989\phi}{0.278 - \phi}\right) \quad (2.39)$	Al ₂ O ₃ -su nanoakışkanın (40 nm parçacık boyutu) 20–60°C aralığındaki sıcaklık ve %0.1–2 aralığındaki konsantrasyonları için elde edilen deneysel verilerle deneysel eşitlik oluşturulmuştur.

Not: T= Sıcaklık, EG= Etilen glikol, PG= Propilen glikol, Eth= Etanol ϕ =Hacimsel konsantrasyon, d_f = temel akışkan molekülünün eşdeğer çapı, d_p = Parçacık eşdeğer çapı, ϕ_m (*maximum packing fraction*) = Kümelerin maksimum dolgulama oranı, M =Temel akışkanın moleküler ağırlığı, N = Avogadro sayısı, ρ_{f0} = Temel akışkanın T₀=293 K de hesaplanmış kütle yoğunluğunu ifade etmektedir.

Çizelge 2.4 Duangthongsuk ve Wongwises (2009) tarafından elde edilen deneysel korelasyondaki sabit değerler

Sıcaklık(°C)	a	b	c	R ²
15	1.0226	0.0477	-0.0112	0.9885
25	1.013	0.092	-0.015	0.9767
35	1.018	0.112	-0.0177	0.9937

Çizelge 2.5 Timofeeva, vd. (2009) tarafından elde edilen korelasyonundeneyysel sabit değerleri (25°C de)

	Platelet	Pale	Silindirik	Tuğla
A ₁	37.1	14.6	13.5	1.9
A ₂	612.6	123.3	904.4	471.4

Nanoakışkan ısıl iletkenliği, ısı transferi ve viskozite ile ilgili olarak yapılan sayısız deneysel çalışmanın yanında birçok araştırmacı termofiziksel özellikler ve ısı transferindeki artışı tanımlamak ve hesaplayabilmek için fiziksel mekanizmalar ve matematiksel modeller önermişlerdir. Tezin önceki çalışmalar kısmında nanoakışkan viskozitesi üzerine yapılan yakın zamandaki çalışmalar ve klasik modeller sunulmaya çalışılmıştır. İncelenen çalışmalar sıcaklık, parçacık çapı, parçacık şekli, hacimsel konsantrasyon ve nanoparçacık malzemesinin viskoziteyi etkileyen önemli parametreler olduğunu göstermektedir. Sayısal çalışmalar incelendiğinde viskozite hesabı için birçok model kullanılmıştır. Bu çalışmanın amaçlarından biri de viskozite hesabı için kullanılan modellerin farklı durumlarda hız ve sıcaklık profillerine olan etkilerini görmenin yanında modellerin mevcut bir akış probleminde birbirleri ile olan uyumunu incelemektir.

3. TEORİ VE YÖNTEM

3.1 Termofiziksel özelliklerin belirlenmesi

Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri, özellikle yoğunluk ve ısı kapasitesi, nanoparçacık ve temel akışkanın ortam sıcaklığındaki özellikleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

3.1.1 Isıl iletkenlik

Nanoakışkanların ısı transferine etkisini açıklamak için nanoakışkanların en önemli termofiziksel özelliklerinden biri olan ısı iletim katsayıları hesabı, katı parçacık içeren süspansiyonlar için oluşturulmuş olan Maxwell (1891) modelinden sonra birçok model geliştirilerek yapılmıştır. Isı iletim katsayısı akışkanın sıcaklığı, nanoparçacıkların şekli, boyutu, hacimsel oranına ve sıvı içindeki hareketleri sonucu oluşan fiziksel etkilere göre çeşitli modellerle ifade edilmiştir. Deneysel çalışmalara dayanan ısı transferinin iyileştirilmesi ve ısı iletkenlik üzerine birçok derlemede bu modeller detaylı bir şekilde ele alınmıştır (Özerinç, vd., (2010b), Yu, vd., (2007), Yu, vd., (2008)).

Bu tez kapsamında ısı iletkenlik hesabı için kullanılan Maxwell modeli aşağıda açıklanmıştır.

3.1.1.1 Maxwell Modeli

Maxwell modeli, düzgün dağılı boyutlardaki silindirik parçacıkları içeren, homojen katı-sıvı süspansiyonların düşük hacimsel konsantrasyonlarında ısı iletkenliğinin hesaplanması için geliştirilmiştir. Bu model her ne kadar mikrometre ve milimetre boyutundaki küresel parçacıklar için geliştirilmiş olsa da nanoakışkanlar için kullanımı da kabul görmektedir. Modelin literatürde yaygın olarak tercih edilmesi, mikrometre-milimetre boyutundaki küresel parçacıklar ve nanoparçacıklar için kullanılması nedeniyle bu çalışmada nanoakışkan ısı iletkenliği hesabında kullanılmıştır.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (3.1)$$

Burada k_{nf} , k_s , k_f sırasıyla nanoakışkan, nanoparçacık ve temel akışkanın ısı iletkenliğini ifade etmektedir. ϕ karışımdaki nanoparçacıkların hacimsel konsantrasyonunu ifade etmektedir.

3.1.2 Yoğunluk ve Isıl Kapasite

Nanoakışkan yoğunluğu ve ısı kapasitesi, sıvı ve nanoparçacığın hacimsel oranlarını dikkate alarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Heidary ve Kermani, 2010).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (3.2)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_s \quad (3.3)$$

Burada (ρc_p) özgül ısı kapasitesini ifade etmektedir.

3.1.3 Viskozite

Bu çalışmanın en önemli amaçlarından biri literatürde sıklıkla karşılaşılan teorik ve deneysel modellerin sıcaklık ve hız profillerine bakılarak karşılaştırılması ve kanal akış problemi için modellerin birbirlerine olan uyumunun değerlendirilmesidir. Bu amaçla viskoziteyi konsantrasyona bağlı olarak hesaplayan altı farklı model kullanılmıştır. Bu modeller Einstein, Brinkman, Batchelor, Wang, Heyhat ve Chen modelleri olup aşağıda bu modellere yer verilmiştir.

Çizelge 3.1 Sayısal analizde kullanılan viskozite modelleri

Einstein Modeli	$\mu_r = (1 + 2.5\phi)$
Brinkman Modeli	$\mu_r = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}}$
Batchelor Modeli	$\mu_r = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2)$
Wang Modeli	$\mu_r = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2)$
Chen Modeli	$\mu_r = (1 + 10.6\phi + 10.6\phi^2)$
Heyhat Modeli	$\mu_r = \exp\left(\frac{5.989\phi}{0.278 - \phi}\right)$

Einstein (1906) tarafından önerilen viskozite eşitliği öncü model olarak adlandırılabilir ve türetilen birçok viskozite modelinin temeli bu modele dayanmaktadır. Düşük hacimsel konsantrasyonlar ($0 < \phi \leq 0.001$) ve küresel parçacıklar için elde edilmiştir. Parçacıklar arasında etkileşimin olmadığı varsayılmıştır. Yüksek konsantrasyonlar için büyük sapmalar göstermesi ve parçacıklar arasındaki etkileşimi dikkate almamasından dolayı modelin kullanılmasında sınırlamalar vardır. Bu model,

$$\mu_r = (1 + 2.5\phi) \quad (3.4)$$

olarak ifade edilmiştir.

Brinkman (1952) tarafından Einstein modeli geliştirilmiştir. Küresel parçacıklar içeren süspansiyonlar ve $\phi \leq 0.04$ hacimsel konsantrasyonlar için elde edilmiştir. Einstein modeline göre araştırmacılar tarafından daha çok kabul görmektedir.

$$\mu_r = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (3.5)$$

Batchelor (1977) modelinde katı küresel parçacıklar için Brownian hareketi göz önünde bulundurulmuştur. Bu model,

$$\mu_r = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \quad (3.6)$$

olarak ifade edilmiştir. Bu denklemde eğer ϕ nin ikinci mertebeleri ihmal edilirse Einstein modelinde kullanılan denklem elde edilecektir.

Wang, vd. (1999) tarafından Al_2O_3 -su nanoakışkan viskozitesini belirlemek için,

$$\mu_r = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \quad (3.7)$$

denklemini oluşturulmuştur.

Chen, vd. (2007) tarafından bağıl viskozitenin sadece konsantrasyonun bir fonksiyonu olduğu ve sıcaklıktan bağımsız olduğu ifade edilmiştir. Bu model,

$$\mu_r = (1 + 10.6\phi + 10.6\phi^2) \quad (3.8)$$

denkleminle ifade edilmiştir.

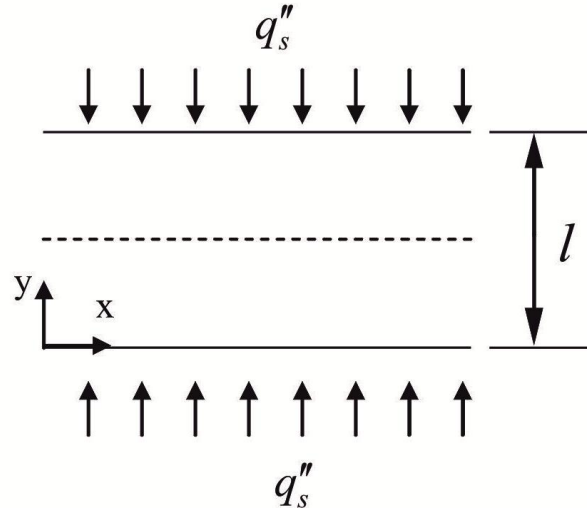
Heyhat, vd. (2013) tarafından Al_2O_3 -su nanoakışkanının ($d_p = 40 \text{ nm}$) $20-60^\circ\text{C}$ aralığındaki sıcaklık ve %0.1–2 aralığında değişen konsantrasyonlarda elde edilen deneysel verilerle ampirik denklem oluşturulmuştur.

$$\mu_r = \exp\left(\frac{5.989\phi}{0.278 - \phi}\right) \quad (3.9)$$

3.2 Sayısal Modelin Tanımlanması

Bu tezde sabit basınç gradyanının etkisi altındaki nanoakışkanın izotermal olmayan kanaldaki akışı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde literatürde sıklıkla karşılaşılan teorik ve deneysel modeller sıcaklık ve hız profillerine bakılarak karşılaştırılmış ve birbirlerine olan uyumları incelenmiştir. İkinci bölümde ise kanal içindeki Al_2O_3 -su nanoakışkanının hacimsel konsantrasyon, basınç

gradyanı ve Reynolds sayısının sıcaklık ve hız profili üzerindeki etkisi incelenmiştir. Temel akışkan ve nanoparçacıkların ısıl olarak dengede olduğu ve aralarında kayma olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca nanoparçacıkların aynı şekil ve boyutta oldukları varsayılmaktadır. Kanal akışının çözümünde akışın laminar, iki boyutlu, izotermal olmayan, sıkıştırılmaz ve sürekli olduğu kabul edilmiştir. Kanal alt ve üst cidarlarına sabit ısı akısı sınır şartı uygulanmış olup Al_2O_3 -su nanoakışkanın tek fazlı ve homojen olduğu varsayılmıştır. Kanal akışı, kanal merkezine uygulanan sabit basınç gradyanı için çözümlenmiştir. Denklemlerin ayrıklaştırılması Chebyshev polinom açılımları kullanılarak yapılmış ve doğrusal olmayan sınır değer problemleri Chebyshev Spectral yöntemiyle sayısal olarak çözülmüştür. Akış geometrisi Şekil 3.1 de şematik olarak gösterilmiştir.



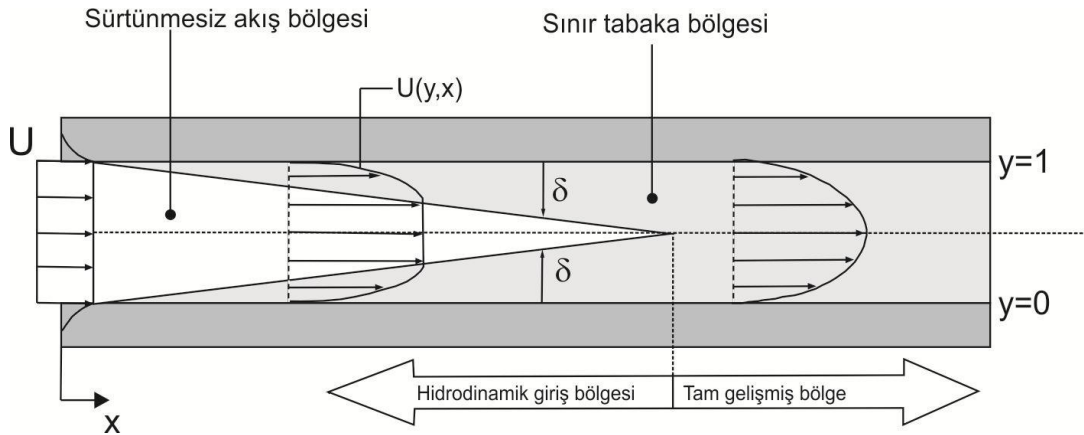
Şekil 3.1 Akış geometrisinin şematik gösterimi

3.2.1 Tam Gelişmiş Akış Koşulları

3.2.1.1 Hareketsiz ve Paralel Yüzeyler Arasında Akışın Hidrodinamik Olarak Gelişimi

Kanal içerisine düzgün dağılılı hızla giren akışkan göz önüne alındığında çeperde kaymama koşulundan dolayı kanal yüzeyi ile temasta olan tabakadaki akışkan parçacıkları tamamen durur ve bu tabaka bitişik akışkan parçacıklarını yavaşlatır. Bu hız düşmesini telafi etmek için, kanal içerisindeki kütleli debiyi sabit tutmak amacıyla orta kısımdaki akışkan hızı artmalıdır. Bunun sonucunda kanal boyunca bir hız gradyanı oluşur.

Akışkan viskozitesinin neden olduğu viskoz kayma kuvvetlerinin etkisinin hissedildiği akış bölgesine hız sınır tabakası denir. Giriş bölgesindeki akışa hidrodinamik olarak gelişen akış denir ve bu bölge hız profiline geliştiği yerdir. Giriş bölgesinin uzağında olup hız profiline tam olarak geliştiği ve değişmeden kaldığı bölgeye ise hidrodinamik olarak tam gelişmiş bölge denir (Çengel, vd., 2008). Laminer akışta tam gelişmiş bölgede akış paraboliktir. Akış tam gelişmiş olduğunda, zaman ortalamalı hız profili değişmeden kalır ve bu durumda $\partial u(y, x)/\partial x=0$ ve $u=u(y)$ olur. Bir kanalda hız sınır tabakasının gelişimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

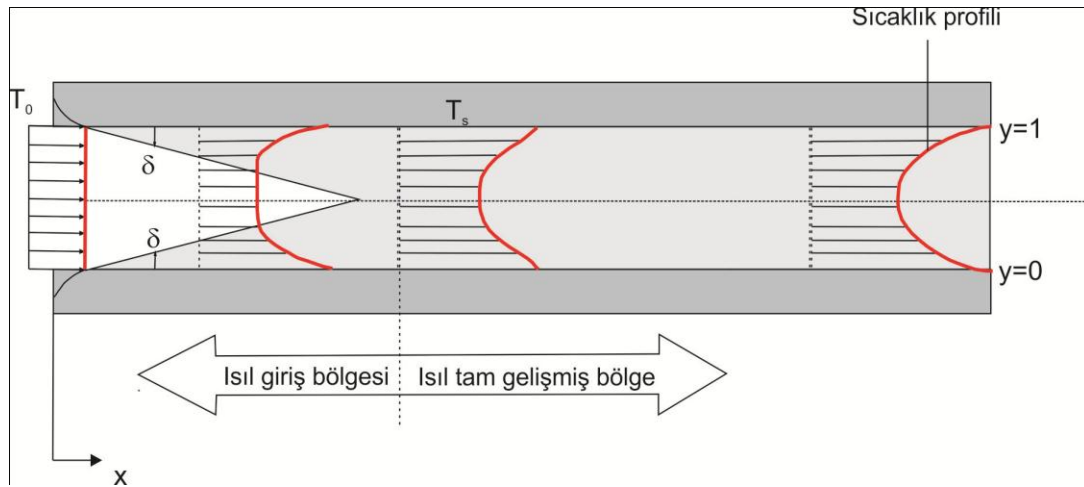


Şekil 3.2 Kanalda hız sınır tabakasının gelişimi

3.2.1.2 Hareketsiz ve Paralel Yüzeyler Arasında Akışın Isıl Olarak Gelişimi

Akışkan ile kanal yüzeyi arasında taşınım ile ısı transferinin olması nedeniyle akışkanın sıcaklığı x mesafesinin değişmesiyle değişecektir. Isıl sınır tabakanın gelişimi hidrodinamik olarak tam gelişmiş akış bölgesindeki $(\partial u/\partial x)=0$ durumundan farklıdır. Buna karşın ısı geçişi varsa ne herhangi bir radyal uzaklıktaki $(\partial T/\partial x)$ ne de ortalama sıcaklık (dT_m/dx) sıfır değildir. Buna göre sıcaklık profili $T(y)$, x boyunca sürekli değişecek ve tam gelişmiş akış şartına ulaşamayacağı görülecektir. Bu görünür çelişki boyutsuz bir sıcaklık tanımlanarak giderilebilir (Incropera, vd., 2006).

Enerji korunumunda olduğu gibi burada da boyutsuz bir sıcaklık farkını kullanmak çözümlenmeyi kolaylaştıracaktır. $(T_s-T)/(T_s-T_m)$ biçimindeki boyutsuz sıcaklık farkı tanımlanarak, bu oranın x 'den bağımsız olduğu koşullar aranabilir. Başka bir deyişle sıcaklık profili $T(y)$, x ile değişmeyi sürdürmekle birlikte, profilin bağlı şekli artık değişmez ve akışın ısıl olarak tam gelişmiş olduğu söylenebilir. Böyle bir durum denklem (3.10) gibi ifade edilebilir. Isıtılmış bir boruda ısıl sınır tabakanın gelişimi Şekil 3.3 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Kanal içerisinde ısıl tabakanın gelişimi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s(x) - T(y, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{fd,t} = 0 \quad (3.10)$$

Burada T_s kanal yüzey sıcaklığı, T yerel akışkan sıcaklığı ve T_m ise kanal kesiti boyunca akışkanın ortalama sıcaklığıdır.

Denklem (3.10) ile belirtilen duruma, kanal ister sabit yüzey ısı akısı (q_s'') ister sabit yüzey sıcaklığı (T_s) altında olsun ulaşılabılır. Bu yüzey koşulları çok sayıda mühendislik uygulamasında görülür. Sabit yüzey sıcaklığı ve sabit yüzey ısı akısı koşullarının aynı anda gerçekleşmesi olanaksızdır. Eğer q_s'' sabit ise, T_s x ile değişecektir; buna karşın, T_s sabit ise, q_s'' x ile değişecektir (Incropera, vd., 2006).

Isıl olarak gelişmiş akışın birkaç önemli özelliği denklem (3.10) den çıkarılabilir. Sıcaklık oranı x 'ten bağımsız olduğundan bu oranın y 'ye göre türevi de x 'ten bağımsız olmalıdır. Cidarda bu türevi hesaplayarak (T_s ve T_m , y ye göre türev alınırken sabit olmaktadır) denklem (3.11) elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right]_{y=y_0} = \frac{-\partial T / \partial y \big|_{y=y_0}}{T_s - T_m} \neq f(x) \quad (3.11)$$

Fourier yasasından $\partial T / \partial y$ yerine konur ve Şekil 3.3 göz önünde bulundurulursa denklem (3.12) yazılabilir.

$$q_s'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=0} \quad (3.12)$$

q_s'' Newton'un soğuma yasasından,

$$\frac{h}{k} \neq f(x)$$

elde edilir. Böylece sabit özellikteki bir akışkanın ısı olarak tam gelişmiş akışında yerel taşınım katsayısı x 'ten bağımsız bir sabit olacaktır.

Kanala girişte h, x ile değiştiğinden denklem (3.10) girişte sağlanmaz. Boru girişinde ısı sınır tabaka kalınlığı sıfır olduğundan $x=0$ da taşınım katsayısı çok büyüktür. Ancak ısı sınır tabaka gelişirken h , tam gelişmiş koşullardaki değerine ulaşana kadar hızla azalır.

Sabit yüzey ısı akısı ile ilgili ek basitleştirmeler yapılabilir. Tam gelişmiş bölgede h ve ısı akısı sabit olduğundan,

$$\left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{fd,t} \quad q_s'' = \text{sabit}$$

elde edilir.

3.3 Süreklilik, Momentum ve Enerji Denklemleri

Nanoakışkan akışı için hız profili süreklilik ve momentum denklemlerinin çözülmesiyle elde edilirken, sıcaklık profili ise enerji eşitliğinin çözülmesi ile elde edilmektedir. Kanal akışının çözümünde akışın laminar, iki boyutlu, izotermal olmayan, sıkıştırılamaz ve sürekli olduğu kabul edilmiştir. Kanal alt ve üst cidarlarına sabit ısı akısı sınır şartı uygulanmış olup Al_2O_3 -su nanoakışkanın tek fazlı ve homojen olduğu varsayılmıştır. Kanal akışı, kanal merkezine uygulanan sabit basınç gradyanı için çözümlenmiştir.

Nanoakışkanlar için süreklilik, momentum ve enerji dengesi sırasıyla denklem (3.13), (3.14), (3.15) ile ifade edilebilir.

Süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0 \quad (3.13)$$

Momentum denklemi,

$$-\frac{1}{\bar{\rho}_{nf}} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} + \frac{\bar{\mu}_{nf}}{\bar{\rho}_{nf}} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} \right) = \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} \quad (3.14)$$

Enerji denklemi,

$$(\bar{\rho} c_p)_{nf} \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} \right) = \bar{k}_{nf} \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} \right) \quad (3.15)$$

Yukarıdaki denklemlerde $\bar{\rho}_{nf}$ nanoakışkan yoğunluğunu, \bar{k}_{nf} nanoakışkan ısı iletkenliğini, $\bar{c}_{p_{nf}}$ nanoakışkanın sabit basınçtaki özgül ısısını, $\bar{\mu}_{nf}$ nanoakışkanın dinamik viskozitesini, \bar{p} basıncı, \bar{T} bölgesel sıcaklığı ifade etmektedir. \bar{u} ve \bar{v} sırasıyla \bar{x} ve \bar{y} yönündeki hız bileşenleridir.

3.3.1 Denklemlerin Boyutsuzlaştırılması

Yapılan sayısal analizlerin sadece sınırlı bir geometriye ve sıcaklık veya ısı akısı gibi belirli bir sınır koşulu değerine bağlı kalmaması, ayrıca elde edilen sonuçların daha genel bir anlam ifade etmesi adına denklemlerin ve buna bağlı olarak sınır koşullarının boyutsuzlaştırılması önemli bir yöntemdir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki parametreler yardımıyla boyutsuzlaştırılmıştır.

x yönündeki hız bileşeni için boyutsuz parametre;

$$u = \frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \quad (3.16)$$

y yönündeki hız bileşeni için boyutsuz parametre;

$$v = \frac{\bar{v}}{\bar{u}_0} \quad (3.17)$$

x ve y yönündeki mesafeler için boyutsuz parametre;

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{l}}, \quad y = \frac{\bar{y}}{\bar{l}} \quad (3.18)$$

Sıcaklık için boyutsuz parametre;

$$T = \theta = \frac{\bar{T} - \bar{T}_s}{\bar{T}_0 - \bar{T}_s} \quad (3.19)$$

Basınç için boyutsuz parametre;

$$p = \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}_{nf} \bar{u}_0^2} \quad (3.20)$$

Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri boyutsuzlaştırılarak sırasıyla denklem (3.21), denklem (3.22) ve denklem (3.23) elde edilmiştir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.21)$$

$$-\frac{dp}{dx} + \frac{1}{Re} \frac{\rho_f \mu_{nf}}{\rho_{nf} \mu_f} \frac{d^2 u}{dy^2} = 0 \quad (3.22)$$

$$RePr_u \frac{d\theta}{dx} = \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{(\rho c_p)_f}{(\rho c_p)_{nf}} \frac{d^2 \theta}{dy^2} \quad (3.23)$$

Re ve Pr sırasıyla Reynolds ve Prandl sayısı olup $Re = \bar{\rho}_f \bar{U}_0 \bar{l} / \bar{\mu}_f$ ve $Pr = C_{p,f} \bar{\mu}_f / k_f$ olarak tanımlanır. Isıl iletkenlik k_{nf} için Maxwell modeli, nanoakışkanın dinamik

viskozitesi μ_{nf} için ise Einstein, Batchelor, Brinkman, Wang, Heyhat ve Chen modelleri kullanılmıştır. Kısım 3.1’ de nanoakışkanın termofiziksel özellikleri için kullanılan denklemler belirtilmiştir. Bu denklemlerde Al_2O_3 ve suyun termofiziksel özellikleri kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Bunun için Manca, vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada kullanılan değerler Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Bu bölümde akışı etkileyecek birçok parametre incelenmiştir. Bu çalışmada aksel yöndeki sıcaklık gradyanı $d\theta/dx$ ve Prandtl sayısı sırasıyla 1.0 ve 7.02 alınarak sabit kabul edilmiştir.

Çizelge 3.2 293 K deki malzemelerin özellikleri (Manca, vd., 2012).

Malzeme	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	μ (Pas)	k (W/mK)
Alümina (Al_2O_3)	3880	773	//	36
Su (H_2O)	998	4182	998×10^{-6}	0.597

Sıcaklık ve hız profillerinin hesaplanması için farklı değişkenlerle süreklilik ve momentum denklemleri enerji denklemi ile eş zamanlı olarak çözülmüştür.

3.3.2 Sınır Koşulları

Kanal alt ve üst cidarlarına sabit ısı akısı uygulanmış olup kanal duvarı $x=0$ noktasında ve $t=0$ zamanında sabit ısı akısına (q_s'') maruz kalmaktadır. Kaymama koşulu ve sabit ısı akısı nedeniyle boyutsuz sınır koşulları:

$$y = 0 \text{ iken } u = 0; \theta = 0$$

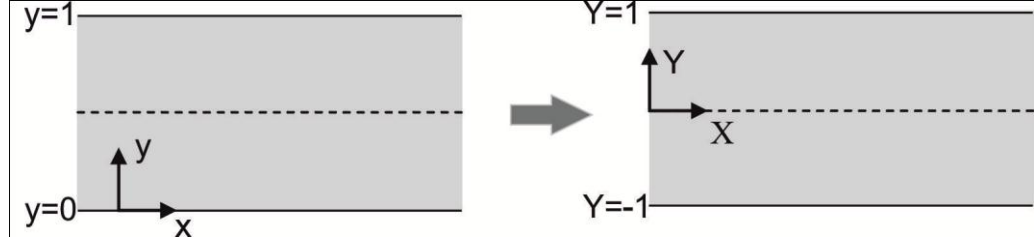
$$y = 1 \text{ iken } u = 0; \theta = 0$$

olarak belirlenmiştir.

3.3.3 Momentum ve Enerji Denklemlerinin Sayısal Olarak Çözümü

Diferansiyel denklemler sınır koşulları boyunca sayısal olarak çözülerek sıcaklık ve hız profilleri elde edilebilir. Doğrusal olmayan sınır değer problemi Chebyshev Pseudospectral yöntemi kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Bu yöntem $-1 \leq Y \leq 1$

aralığında kullanıldığından birinci adım olarak $0 \leq y \leq 1$ aralığı $-1 \leq Y \leq 1$ aralığına transfer edilmiştir.



Şekil 3.4 Çalışma alanının Pseudospectral alana aktarılması

$$y = AY + B \text{ ve}$$

$$y = 0 \quad Y = -1, \quad y = 1 \quad Y = 1 \text{ dir.}$$

Eğer $y = AY + B$ çözülrse $A = 0.5$ ve $B = 0.5$ olarak bulunur. Böylece denklem $y = \frac{1}{2}Y + \frac{1}{2}$ olur.

$$\frac{du}{dy} = \frac{du}{dY} \frac{dY}{dy} = 2 \frac{du}{dY} \quad (3.24)$$

Transfer katsayısı $tr = 2$ olarak tanımlanırsa denklem (3.24),

$$\frac{du}{dy} = tr \frac{du}{dY} \text{ olur.}$$

Bu durumda momentum ve enerji denklemleri:

$$-\frac{dp}{dx} + tr^2 \frac{1}{Re} \frac{\rho_f \mu_{nf}}{\rho_{nf} \mu_f} \frac{d^2u}{dY^2} = 0,$$

$$RePru \frac{d\theta}{dx} = tr^2 \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{(\rho c_p)_f}{(\rho c_p)_{nf}} \frac{d^2\theta}{dY^2}$$

olarak elde edilmiş olur. İkinci adım ise hız u ve sıcaklık θ ifadelerinin Chebyshev polinom serilerine göre açılımı olacaktır.

$$u(Y) = \sum_0^N a_n T_n(Y) \quad (3.25)$$

$$\theta(Y) = \sum_0^N b_n T_n(Y) \quad (3.26)$$

Burada a_n ve b_n genişletme katsayısıdır. $T_n(Y)$ birinci tür Chebyshev polinomu olup,

$T_n \cos \theta = \cos n\theta$ ve $T_n Y = \cos(n \arccos Y)$ olarak tanımlanmıştır.

Böylece birinci türevler,

$$\frac{du}{dY} = \sum_{n=0}^N \frac{1}{c_n} \sum_{\substack{p=n+1 \\ p+n \text{ tek}}}^N p a_p T_n(Y) \quad (3.27)$$

$$\frac{d\theta}{dY} = \sum_{n=0}^N \frac{2}{c_n} \sum_{\substack{p=n+1 \\ p+n \text{ tek}}}^N p b_p T_n(Y) \quad (3.28)$$

olarak elde edilir.

İkinci türevler ise,

$$\frac{d^2 u}{dY^2} = \sum_{n=0}^N \frac{1}{c_n} \sum_{\substack{p=n+2 \\ p+n \text{ çift}}}^N p(p^2 - n^2) a_p T_n(Y) \quad (3.29)$$

$$\frac{d^2\theta}{dY^2} = \sum_{n=0}^N \frac{1}{c_n} \sum_{\substack{p=n+2 \\ p+n \text{ çift}}}^N p(p^2 - n^2) b_p T_n(Y) \quad (3.30)$$

olarak elde edilir. Burada $c_0 = 2$ ve $n \geq 1$ için $c_n = 1$ dir.

Dönüştürülmüş momentum ve enerji denklemleri,

$$-\frac{dp}{dx} + tr^2 \frac{1}{Re} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{d^2u}{dY^2} = 0 \quad (3.31)$$

$$RePr_u \frac{d\theta}{dx} = tr^2 \left(\frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \right) \frac{(\rho c_p)_f}{(\rho c_p)_{nf}} \frac{d^2\theta}{dY^2} \quad (3.32)$$

Chebyshev polinomlarına açılırsa,

$$-\frac{dp}{dx} = tr^2 \frac{1}{Re} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \sum_{n=0}^N \frac{1}{c_n} \sum_{\substack{p=n+2 \\ p+n \text{ çift}}}^N p(p^2 - n^2) a_p T_n(Y) \quad (3.33)$$

$$RePr_u \frac{d\theta}{dx} = tr^2 \left(\frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \right) \frac{(\rho c_p)_f}{(\rho c_p)_{nf}} *$$

$$\sum_{n=0}^N \frac{1}{c_n} \sum_{\substack{p=n+2 \\ p+n \text{ çift}}}^N p(p^2 - n^2) b_p T_n(Y) \quad (3.34)$$

denklemleri elde edilir.

Sınır şartları da Chebyshev polinomlarına açılırsa;

$$Y = -1 \Rightarrow u = 0 \text{ ve } Y = 1 \Rightarrow u = 0, \quad u(Y) = \sum_0^N a_n T_n(Y) \quad (3.21a)$$

$$Y = -1 \Rightarrow \theta = 0 \text{ ve } Y = 1 \Rightarrow \theta = 0, \quad \theta(Y) = \sum_0^N b_n T_n(Y) \quad (3.21b)$$

elde edilir.

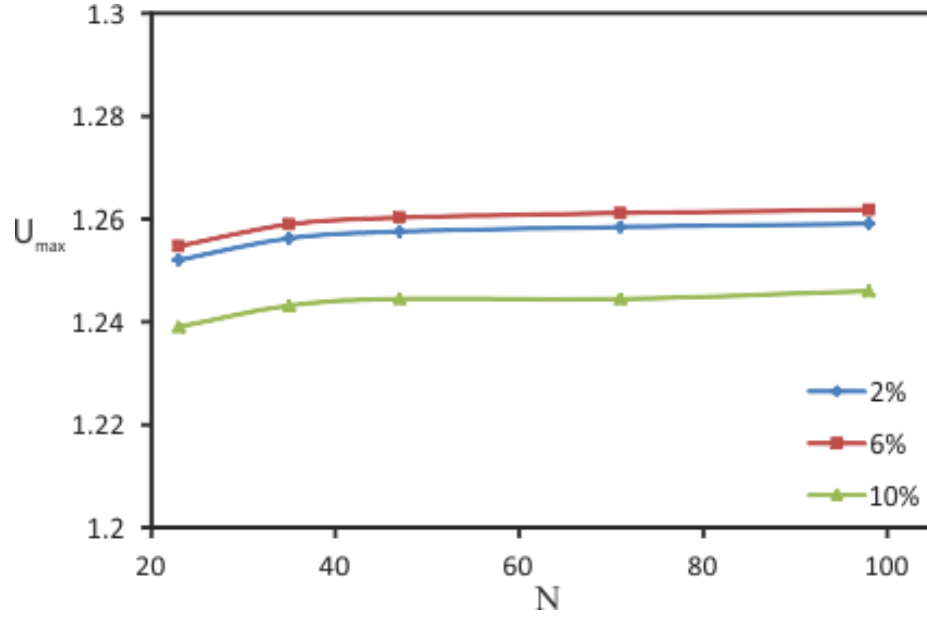
Son adım $N+1$ tanesi a_n den ve $N+1$ tanesi b_n den olmak üzere $2N+2$ bilinmeyeni çözmek için kolokasyon noktalarının doğru bir şekilde seçilmesidir.

Bunun için;

$$Y_j = \cos \frac{\pi j}{N-2}, j=0, 1, 2, \dots, N-2$$

seçilir. Chebyshev Pseudospectral yöntemi momentum ve enerji denklemlerinin çözülebilmesi için kolokasyon noktalarının yeterli olmasını gerektirir. $2N-2$ sayıdaki eşitliğe dört sınır şartının eklenmesi ile toplamda $2N+2$ tane denklem elde edilir. Böylece bilinmeyen sayısı ile denklem sayısı eşitlenmiş olur. Momentum ve enerji denklemleri birbirlerine Visual Fortran IMSL alt programından DNEQNF doğrusal olmayan diferansiyel denklem çözücü alt programı kullanılarak birbirine bağımlı olarak sayısal çözülmüşlerdir. Programlara ait akış diyagramları Ek-1 ve Ek-2 de verilmiştir.

Program algoritmasının oluşturulmasında yakınsamanın sağlandığı çözüm nokta sayısının belirlenmesi için farklı konsantrasyonlarda yakınsama testi yapılmıştır. Bunun için çözüm nokta sayıları sırası ile 23, 35, 47, 71, 97 alınmış olup her bir konsantrasyonda 47 çözüm nokta sayısı ile yakınsama sağlanmıştır. Farklı çözüm nokta sayılarına göre kanal merkezinde maksimum hız değerlerinin hemen hemen sabit kaldığı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Farklı konsantrasyonlara göre hız değerlerinin yakınsaması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, sabit basınç gradyanının etkisi altındaki Al_2O_3 -su nanoakışkanın izotermal olmayan kanaldaki akışı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada ayrıca literatürde sıklıkla karşılaşılan teorik ve deneysel modeller sıcaklık ve hız profillerine bakılarak karşılaştırılıp birbirlerine olan uyumları incelenirken, aynı zamanda hacimsel konsantrasyon, basınç gradyanı ve Reynolds sayısının sıcaklık ve hız profili üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Nanoakışkanların viskozitelerinin incelenmiş olduğu deneysel çalışmaların sonuçları ile klasik modellerden elde edilen sonuçlar arasında genel anlamda bir uyumsuzluk görülmektedir. Sıcaklık, parçacık çapı, parçacık şekli gibi nanoakışkanın viskozitesi üzerinde etkisi olan parametrelerin klasik modellerde hesaba katılmaması, bu durumun nedenlerinden biri olarak gösterilebilir. Nanoakışkan viskozitesi ve bağlı viskozite hesabında kullanılacak korelasyonların, viskoziteyi mümkün olan en az hatayla, yani uygulamadaki değere mümkün olduğunca yakın olarak vermesi, nanoakışkanların potansiyel uygulamaları açısından önemlidir. Çünkü viskozite artışı, basınç düşümü ve

gerekli pompa gücünde artış gibi istenmeyen sonuçlara neden olabilmektedir. Dolayısıyla, nanoakışkan viskozitesinin mümkün olduğunca kontrol altına alınması istenmektedir. Bu da, uygulamanın yapılacağı belirli koşullarda nanoakışkan viskozitesinin alacağı değerleri doğru belirlemekle mümkün olacaktır.

Nanoakışkanların viskozite hesabında kullanılan klasik modellerin ve deneysel korelasyonların çoğunluğu, bağıl viskoziteyi sadece nanoparçacık konsantrasyonunun (ϕ) bir fonksiyonu olarak tanımlar. Bu açıdan, bu genel kabul ile bağlantılı olarak, bağıl viskoziteyi nanoparçacık konsantrasyonu temelinde karşılaştırmak yararlı olacaktır. Nanoparçacık konsantrasyonu temelinde yapılan karşılaştırmada, literatürde sıklıkla kullanılan farklı viskozite modelleri kullanılarak (Einstein, Batchelor, Brinkman, Wang, Heyhat, Chen modelleri), $\phi = 0.0 - 0.1$ aralığındaki konsantrasyonlarda 0.01 artış oranları ile hesaplanan bağıl viskozite değerleri Çizelge 4.1'de, modellere ait viskozite grafikleri Şekil 4.1a'da verilmiştir. Düşük konsantrasyonların etkisini modeller üzerinde görebilmek için $\phi = 0.001 - 0.01$ aralığında 0.001 artış oranları ile elde edilen viskozite değerleri Çizelge 4.2'de verilerek modellere ait grafikler Şekil 4.1b'de verilmiştir.

Şekil 4.1b'de görüldüğü üzere konsantrasyonun düşük değerlerinde ($\phi = 0.001 - 0.01$) hesaplanan bağıl viskozite değerleri bu çalışmada kullanılan modeller için birbirine yakın sonuçlar verirken, Şekil 4.1a'da görüldüğü üzere daha yüksek konsantrasyonlarda ($\phi = 0.0 - 0.1$) modellerle hesaplanan viskozite değerleri birbirlerinden sapmalar göstermektedir. Özellikle Heyhat modeli ile hesaplanan viskozite değerleri $\phi = 0.1$ değerinde Einstein, Batchelor, Brinkman, Wang, Chen modelleri ile hesaplanan bağıl viskozite değerlerinden oldukça sapma göstermektedir. Heyhat modeli $\phi = \% 0.1 - 2$ aralığındaki konsantrasyonlar için elde edilmiş deneysel bir korelasyondur (Heyhat, vd., 2013). Düşük konsantrasyonun 0.02 değerine kadar modellerle yüksek konsantrasyonlara göre daha uyumlu olduğu görülürken yinede Wang ve Chen modellerine göre klasik modellerdeki bağıl viskozite değerlerinden daha yüksek değerler ortaya çıkmaktadır.

Nanoakışkan viskozitesi üzerine yapılan çalışmaların çoğunda hacimsel konsantrasyonun artmasıyla nanoakışkan viskozitesinin arttığı üzerine ortak bir sonuç mevcuttur (Duangthongsuk ve Wongwises (2009), Heyhat, vd., (2013), Kulkarni, vd., (2007), Jeong, vd., (2013), Timofeeva, vd., (2009), Pastoriza-Gallego, vd., (2011), Tavman, vd., (2008)). Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 incelendiğinde $\phi < 0.01$ değerleri için ele alınan modellerde bağıl viskozite değerinin (μ_r) 1'e yakın olduğu, $\phi > 0.01$ değerleri için ise bağıl viskozite değerinin 1'den uzaklaştığı görülmektedir. Örneğin $\phi = 0.09$ dan 0.1 konsantrasyona geçişte bağıl viskozitedeki artış oranı Heyhat, Chen, Wang ,Brinkman, Einstein, Batchelor modelleri için sırasıyla %39.2, %5.8, %10.4, %2.7, %2.0, %2.8 dir. Düşük konsantrasyonlarda bağıl viskozitenin 1' e yakın olması nanoakışkan uygulamalarında, temel akışkanın viskozitesine kıyasla viskozitede büyük artışlar yaşanmadan ısı transferini arttırabileceğimizi göstermektedir. Bunun için düşük konsantrasyonlarda ısı transfer performansını incelemek yararlı olacaktır.

Sayısal çalışmalarda nanoakışkan viskozitesi hesabı için kullanılan modellerin, sonuçların karşılaştırılmasında önemli olduğunu belirtmekte fayda vardır. Düşük konsantrasyonlarda, modeller arasında uyum olması, herhangi bir modelin kullanılmasının sonuçları karşılaştırmada sıkıntılar yaratmayacağını göstermesine rağmen, yüksek konsantrasyonlarda, seçilen modellerin farklı olması sayısal çalışmalarda elde edilen sonuçların karşılaştırılması konusunda hatalı sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Viskozitedeki artışla beraber nanoakışkanın kanal içerisinde, $\phi = 0.0 - 0.1$ aralığındaki konsantrasyonlarda 0.01 artış oranları ile hesaplanan maksimum hızındaki değerleri Çizelge 4.3'de verilerek modellere ait viskozite grafikleri Şekil 4.2a 'da verilmiştir. Düşük konsantrasyonların etkisini modeller üzerinde görebilmek için $\phi = 0.001 - 0.01$ aralığında 0.001 artış oranları ile elde edilen maksimum hız değerleri Çizelge 4.4'de verilerek modellere ait grafikler Şekil 4.2b'de verilmiştir.

Viskozite, akışkanın akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmakta ve akışkan hızını etkilemektedir. Şekil 4.2b incelendiğinde düşük konsantrasyonlarda ele alınan tüm modeller için maksimum hız değerlerinin konsantrasyonun artması ile azaldığı ancak bu

azalmanın oldukça küçük olduğu gör÷lmektedir. Yüksek konsantrasyonlar için maksimum hız değerleri değişiminin verilmiş olduğu Şekil 4.2a incelendiğinde konsantrasyonun artmasıyla hız değerlerinin oldukça azaldığı gör÷lmektedir. Sayısal çalışmalarda başlangıç şartı olarak girilen hız değerlerinin, $\phi < 0.01$ konsantrasyonlarda Heyhat, Chen, Wang, Brinkman, Einstein, Batchelor modellerinin kullanılması durumunda sabit alınabileceği sonucuna varılabilir. Ancak, $\phi > 0.01$ değerlerde Einstein, Batchelor ve Brinkman modelleri birbirleri ile uyumlu sonuçlar vermekte iken Heyhat, Chen ve Wang modelleri birbirlerinden sapmalar göstermektedir.

Çizelge 4.1 $0.0 \leq \phi \leq 0.1$ hacimsel konsantrasyonlarında viskozite değerleri

ϕ	Modeller					
	Einstein	Brinkman	Batchelor	Wang	Chen	Heyhat
0.00	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
0.01	1.025000	1.025444	1.025650	1.085300	1.107060	1.250408
0.02	1.050000	1.051804	1.052600	1.195200	1.216240	1.590842
0.03	1.075000	1.079122	1.080850	1.329700	1.327540	2.063649
0.04	1.100000	1.107444	1.110400	1.488800	1.440960	2.736158
0.05	1.125000	1.136818	1.141250	1.672500	1.556500	3.718711
0.06	1.150000	1.167294	1.173400	1.880800	1.674160	5.198388
0.07	1.175000	1.198927	1.206850	2.113700	1.793940	7.504695
0.08	1.200000	1.231772	1.241600	2.371200	1.915840	11.243588
0.09	1.225000	1.265892	1.277650	2.653300	2.039860	17.585496
0.10	1.250000	1.301349	1.315000	2.960000	2.166000	28.922121

Çizelge 4.2 $0.001 \leq \phi \leq 0.01$ hacimsel konsantrasyonlarında viskozite değerleri

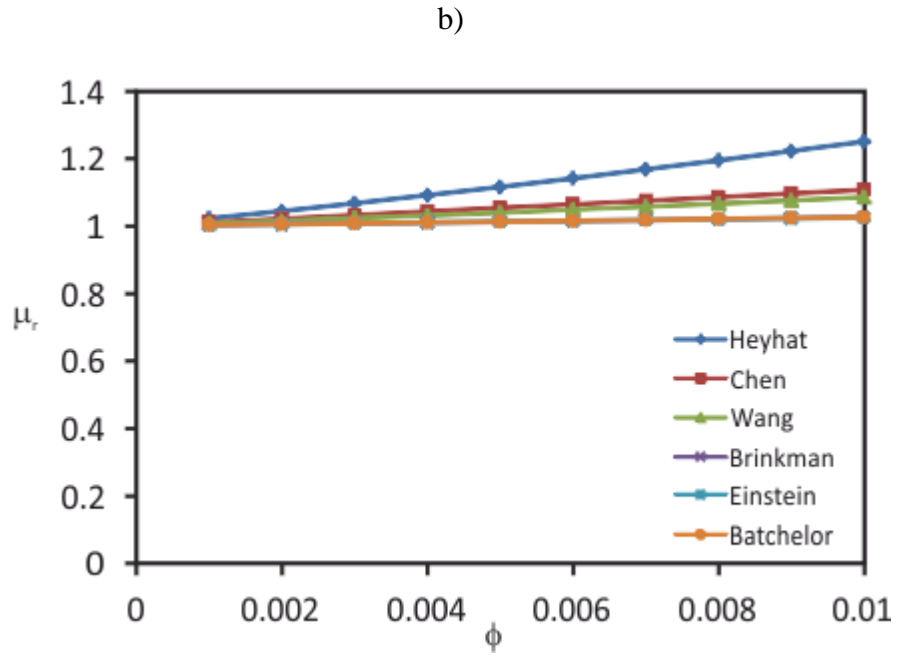
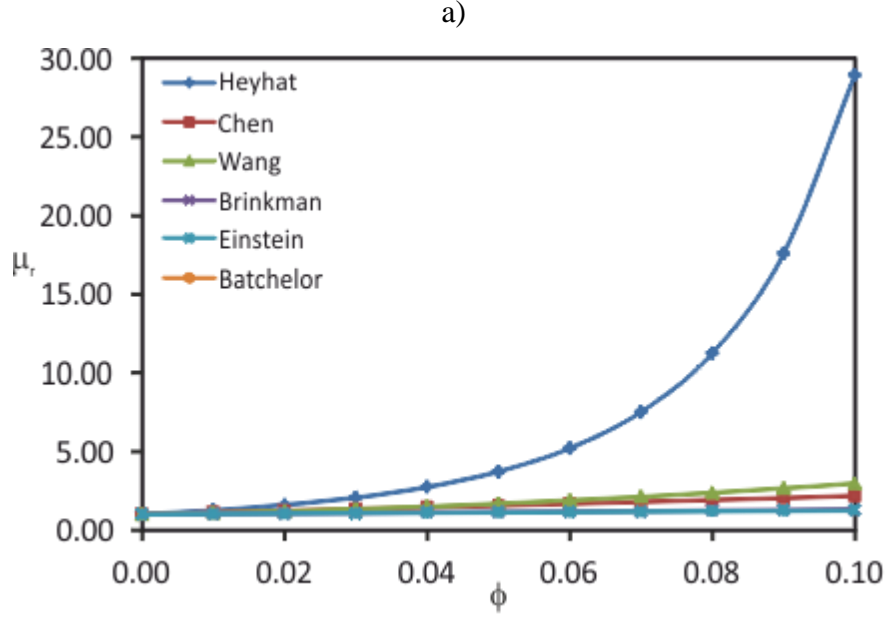
ϕ	Modeller					
	Einstein	Brinkman	Batchelor	Wang	Chen	Heyhat
0.001	1.0025	1.0025044	1.0025065	1.007423	1.0106106	1.02185636
0.002	1.005	1.0050176	1.005026	1.015092	1.0212424	1.04435404
0.003	1.0075	1.0075396	1.0075585	1.023007	1.0318954	1.0675161
0.004	1.01	1.0100704	1.010104	1.031168	1.0425696	1.09136658
0.005	1.0125	1.0126102	1.0126625	1.039575	1.053265	1.11593057
0.006	1.015	1.0151589	1.015234	1.048228	1.0639816	1.14123418
0.007	1.0175	1.0177166	1.0178185	1.057127	1.0747194	1.1673047
0.008	1.02	1.0202834	1.020416	1.066272	1.0854784	1.19417056
0.009	1.0225	1.0228592	1.0230265	1.075663	1.0962586	1.22186144
0.01	1.025	1.0254442	1.02565	1.0853	1.10706	1.25040831

Çizelge 4.3 $0.0 \leq \phi \leq 0.1$ hacimsel konsantrasyonlarında maksimum hız değerleri

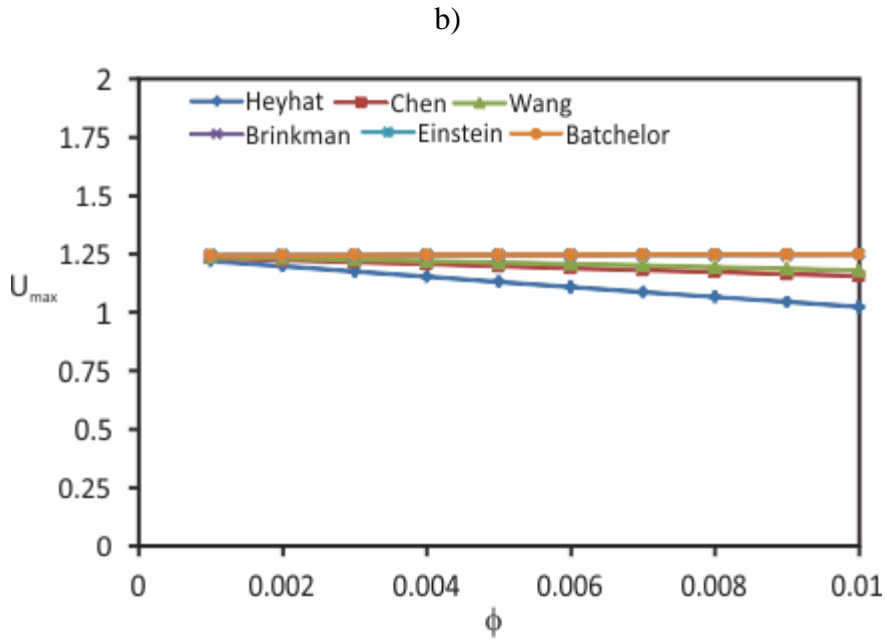
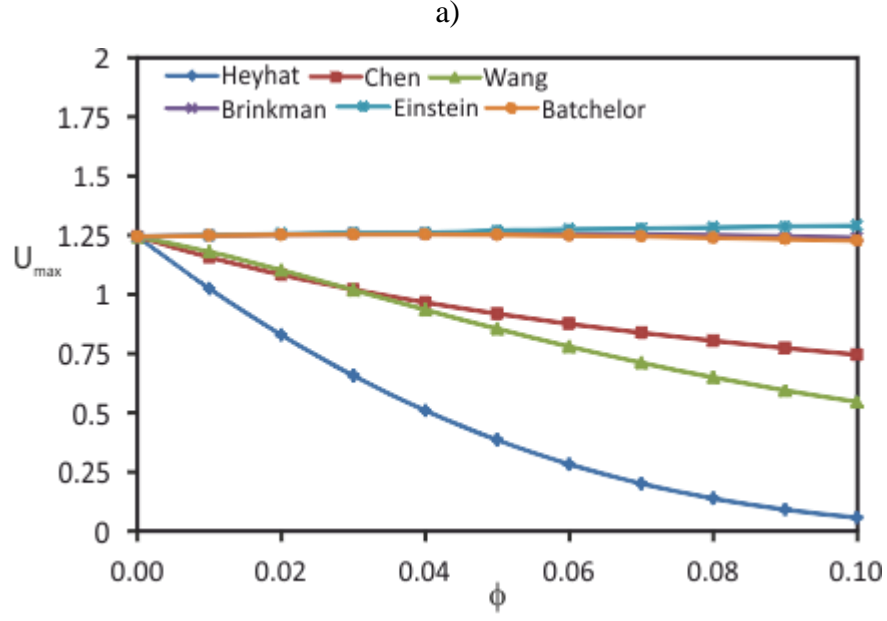
ϕ	Modeller					
	Einstein	Brinkman	Batchelor	Wang	Chen	Heyhat
0.00	1.243019266	1.2430193	1.24301927	1.24301927	1.2430193	1.24301927
0.01	1.248737366	1.2481965	1.24794599	1.17935667	1.1561756	1.02363027
0.02	1.254183175	1.2520321	1.25108525	1.10181754	1.082757	0.8277957
0.03	1.259375691	1.2545648	1.25255944	1.01814609	1.0198027	0.65603638
0.04	1.259375691	1.2558332	1.25249046	0.93415193	0.9651659	0.5082914
0.05	1.269068387	1.2558754	1.25099841	0.85363344	0.9172515	0.38392384
0.06	1.273598669	1.2547294	1.2482005	0.77873164	0.8748498	0.28174857
0.07	1.277936173	1.2524327	1.24421014	0.71040119	0.8370263	0.20008474
0.08	1.282092947	1.2490227	1.23913622	0.64883246	0.803048	0.13683457
0.09	1.286080058	1.2445363	1.23308267	0.59376929	0.7723315	0.08958792
0.10	1.289907683	1.2390103	1.22614799	0.54472452	0.7444066	0.05574918

Çizelge 4.4 $0.001 \leq \phi \leq 0.01$ hacimsel konsantrasyonlarında maksimum hız değerleri

ϕ	Modeller					
	Einstein	Brinkman	Batchelor	Wang	Chen	Heyhat
0.001	1.24360391	1.243598475	1.243596	1.2375268	1.23362343	1.2200471
0.002	1.24418564	1.244163915	1.244153	1.231816	1.22439743	1.1973014
0.003	1.24476449	1.244715627	1.244692	1.225896	1.21533658	1.1747834
0.004	1.24534048	1.24525365	1.245212	1.2197759	1.20643637	1.1524944
0.005	1.24591361	1.245778022	1.245714	1.2134647	1.19769245	1.1304355
0.006	1.24648393	1.246288783	1.246197	1.2069714	1.18910063	1.1086079
0.007	1.24705144	1.246785972	1.246661	1.200305	1.18065687	1.0870125
0.008	1.24761617	1.247269628	1.247108	1.1934745	1.17235727	1.0656505
0.009	1.24817814	1.24773979	1.247536	1.1864888	1.16419807	1.0445228
0.01	1.24873737	1.248196496	1.247946	1.1793567	1.15617564	1.0236303



Şekil 4.1 Modellerin hacimsel konsantrasyona bağlı olarak bağlı viskozitelerinin değişimi a) $0.0 \leq \phi \leq 0.1$, b) $0.001 \leq \phi \leq 0.01$

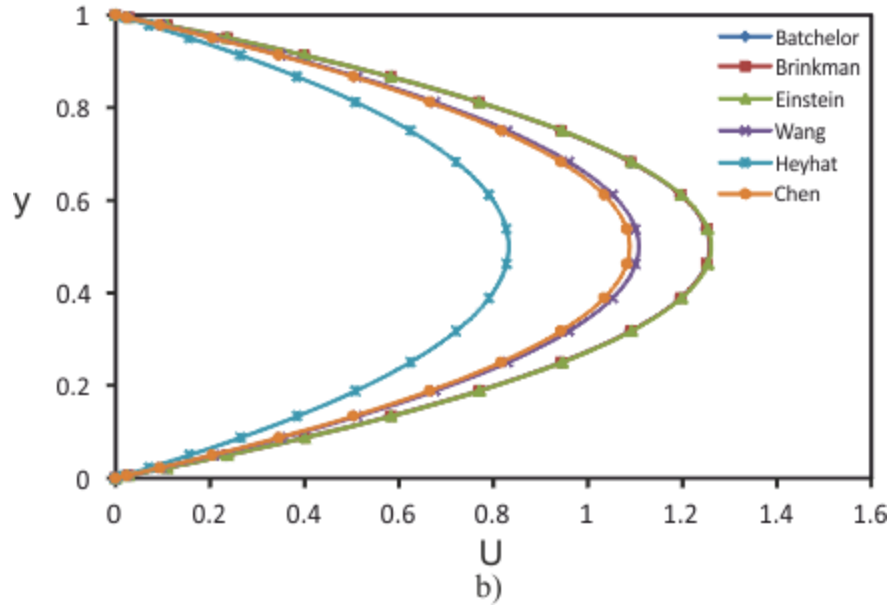
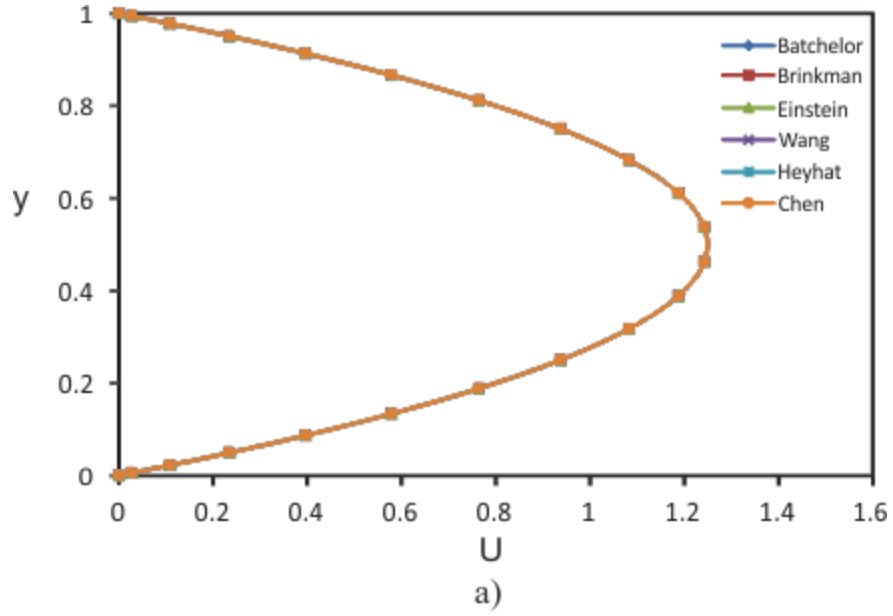


Şekil 4.2 Modellerin hacimsel konsantrasyona bağlı olarak maksimum hız değerlerinin değişimi a) $0.0 \leq \phi \leq 0.1$, b) $0.001 \leq \phi \leq 0.01$

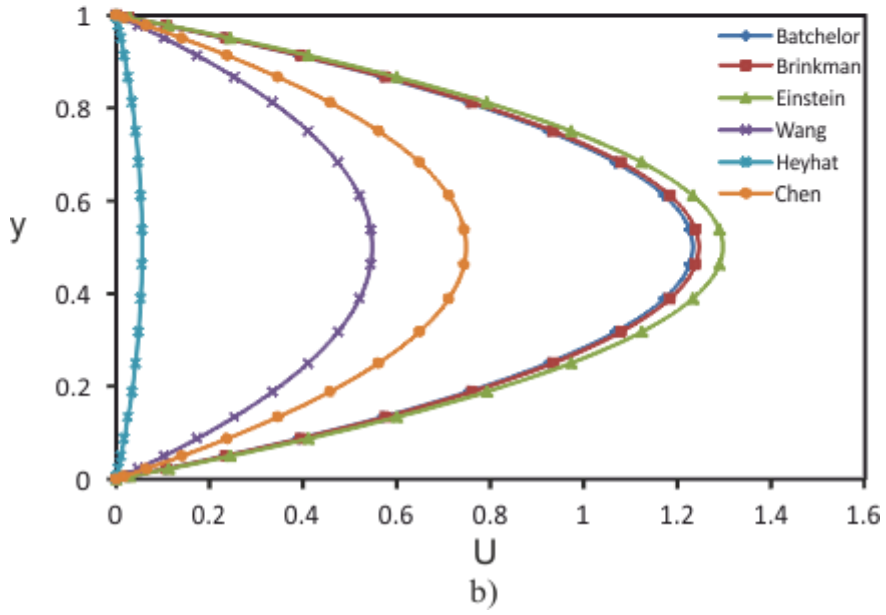
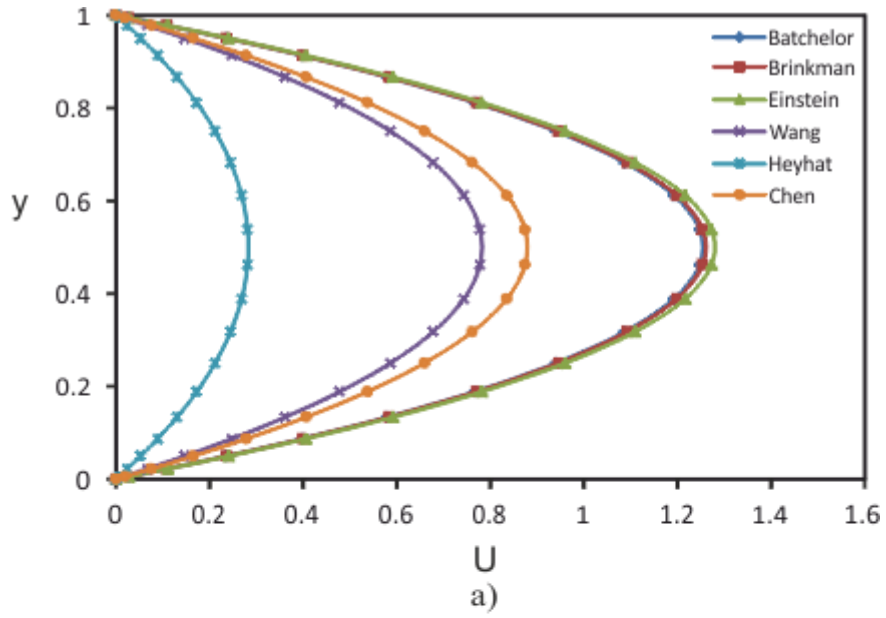
4.1 Modellerin Karşılaştırılması

Literatürde nanokakışkan viskozite hesabı için birçok model önerilmektedir. Bu modeller önceki çalışmalar kısmında geniş bir şekilde ele alınmıştır. Yapılan sayısal çalışmalar incelendiğinde viskozite hesabı için farklı modellerin kullanıldığı görülmektedir. Ele alınan çalışmalarda viskoziteyi etkileyen parametrelerin viskozite modelleri üzerindeki etkisi karşılaştırılmış olsa da mevcut bir akış problemi üzerine çalışma sayısı fazla değildir. Bu çalışmanın en önemli amaçlarından biri literatürde sıklıkla karşılaşılan teorik ve deneysel modellerin sıcaklık ve hız profillerine bakılarak karşılaştırılması ve kanal akışı için modellerin birbirlerine olan uyumunun değerlendirilmesidir. Bu amaçla akışı etkileyecek parametreler akışkanın itici kuvvetinin derecesini gösteren boyutsuz basınç gradyanı ($dp/dx = -G$), hacimsel konsantrasyon ve Reynolds sayıları için modeller karşılaştırılmıştır. Viskozitenin konsantrasyona bağlı olarak ifade edildiği altı farklı model kullanılmıştır. Bunlar Einstein, Brinkman, Batchelor, Wang, Heyhat ve Chen modelleridir.

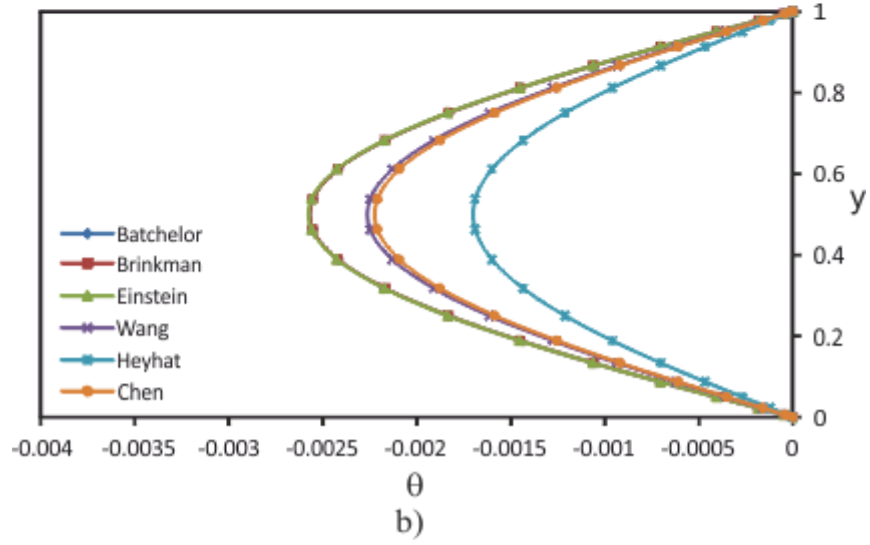
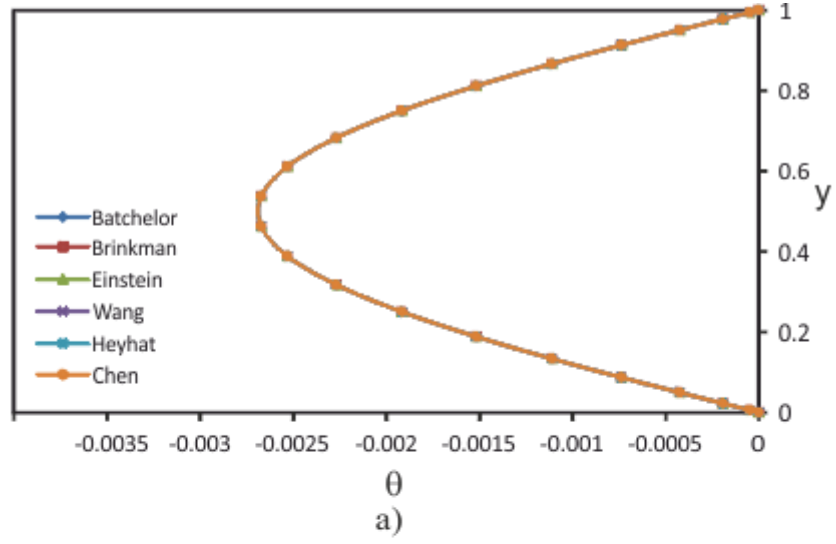
Nanoakışkan viskozitesi hacimsel konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak alınmakta ve hacimsel konsantrasyon (ϕ) arttıkça viskozitesi yüksek bir akışkan elde edilmektedir. Hacimsel konsantrasyonun modellerin hız ve sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi Şekil 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ' da verilmiştir. Konsantrasyonun 0.0, 0.02, 0.06 ve 0.1 değerleri ve $Re = 20$, $G = -0.5$ sabit değerleri için hesaplamalar yapılmıştır. $\phi = 0.0$ için tüm modeller için hız ve sıcaklık profilleri üst üste gelmiştir. Konsantrasyonun bu değeri için bağıl viskozite değeri μ_r tüm modeller için 1.0 değerine eşit olduğundan bu beklenen bir durumdur. Düşük konsantrasyon değerlerinde ($\phi = 0.02$) Einstein, Brinkman ve Batchelor modelleri birbirleriyle, Wang ve Chen modelleri birbirleriyle uyumlu sonuçlar verirken, konsantrasyonun artmasıyla ($\phi = 0.06$ ve 0.1) bu modeller birbirlerinden sapmalar göstermektedirler. Konsantrasyonun artmasıyla beraber hız ve sıcaklık profillerinde en büyük değişim Heyhat modelinde olurken, Batchelor ve Brinkman modellerinin düşük ve yüksek konsantrasyonlarda bile birbirleriyle uyumlu sonuçlar verdiği, Wang ve Chen modellerinin düşük konsantrasyonlarda uyumlu sonuçlar verirken konsantrasyonun artmasıyla birbirlerinden sapmalar gösterdiği görülmektedir.



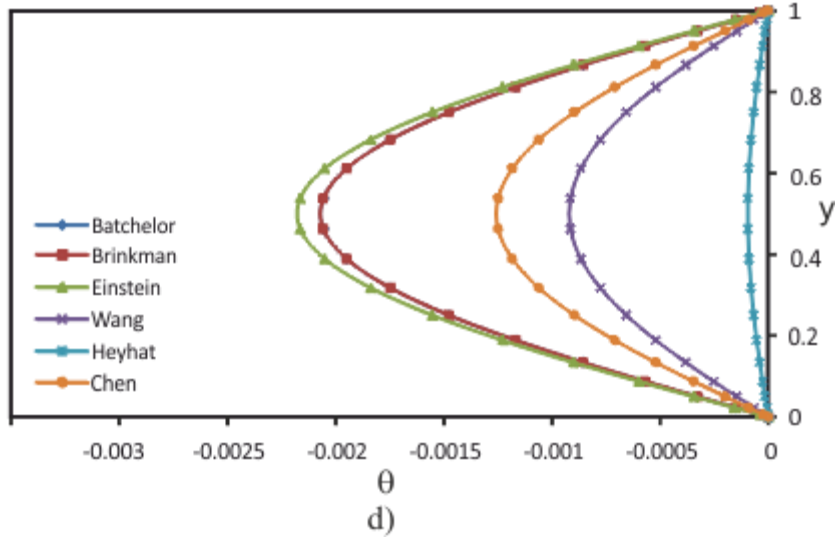
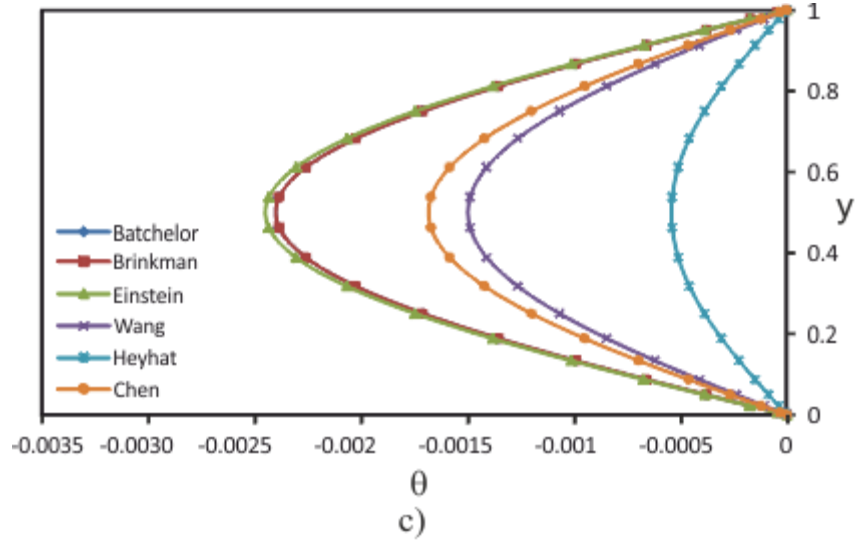
Şekil 4.3 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması,
 $Re = 20, G = -0.5$; a) $\phi = 0.0$, b) $\phi = 0.02$



Şekil 4.4 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması,
 $Re = 20, G = -0.5$; a) $\phi = 0.06$, b) $\phi = 0.1$

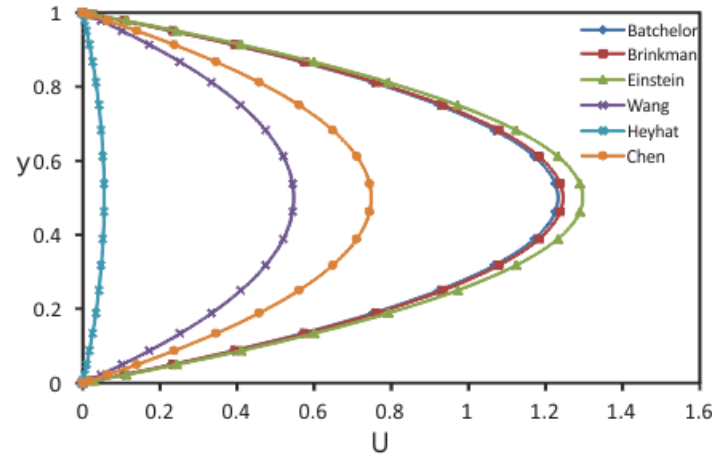


Şekil 4.5 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması,
 $Re = 20, G = -0.5$; a) $\phi = 0.0$, b) $\phi = 0.02$

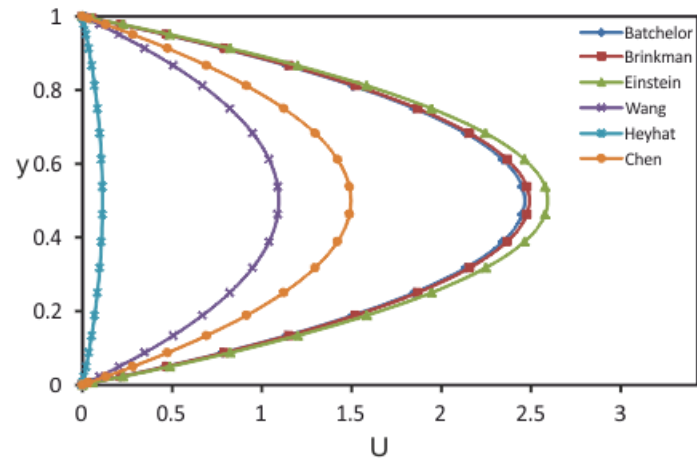


Şekil 4.6 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması,
 $Re = 20, G = -0.5$; a) $\phi = 0.06$, b) $\phi = 0.1$

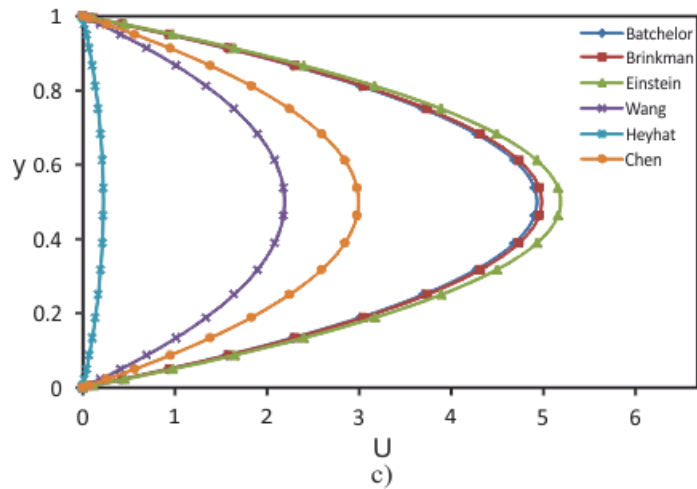
Sıcaklık ve hız dağılımlarını etkileyen önemli parametrelerden biri de basınç gradyanıdır. Basınç gradyanının ($dp/dx = -G$) modellerin hız ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini görmek için hacimsel konsantrasyonun $\phi = 0.02$ ve 0.1 değerlerinde $dp/dx = -0.5, 1.0, 2.0$ değerleri için sonuçlar elde edilmiştir. $\phi = 0.1$ için sonuçlar Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de ve $\phi = 0.02$ için sonuçlar Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’ da gösterilmiştir. Düşük konsantrasyon değeri için ($\phi = 0.02$) basınç gradyanının tüm değerlerinde Einstein, Brinkman ve Batchelor modelleri birbirleriyle, Wang ve Chen modelleri birbirleriyle uyumlu sonuçlar verirken Heyhat modelleri bu modellerden sapmalar göstermektedir. Basınç gradyanının artmasıyla her model için kanal merkezindeki maksimum hızda artış meydana gelmektedir. Klasik modeller birbirlerine yakın sonuçlar verirken diğer modeller birbirlerinde farklı sonuçlar göstermiştir. Özellikle düşük hacimsel konsantrasyonlar için Heyhat modelinde verilen konsantrasyon için hız değerleri diğer modellere göre büyük sapma göstermektedir. Konsantrasyondaki artış modeller arasındaki sapma miktarını da arttırmaktadır.



a)

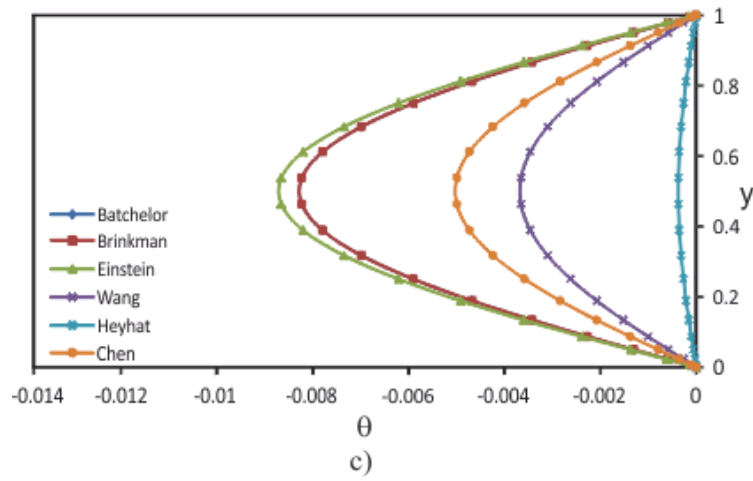
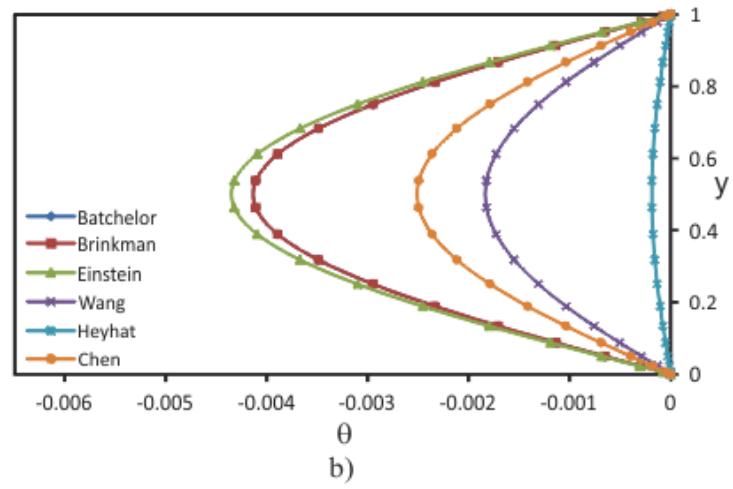
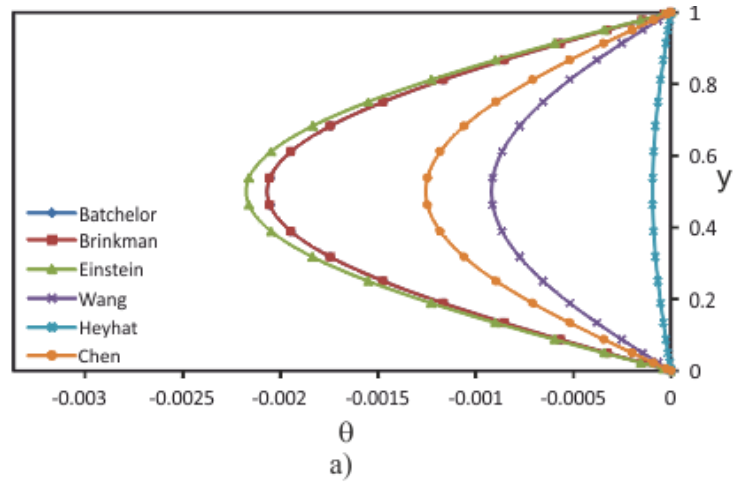


b)

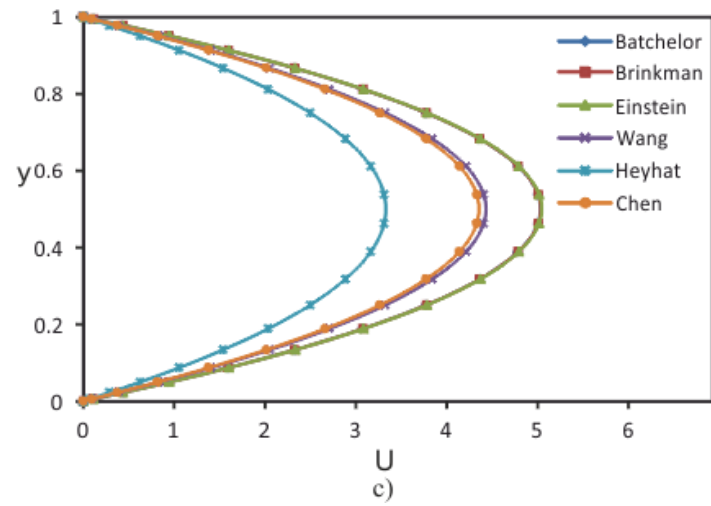
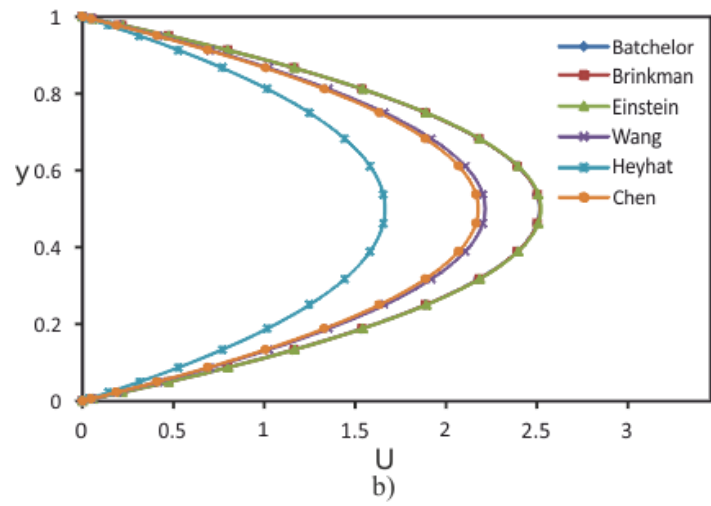
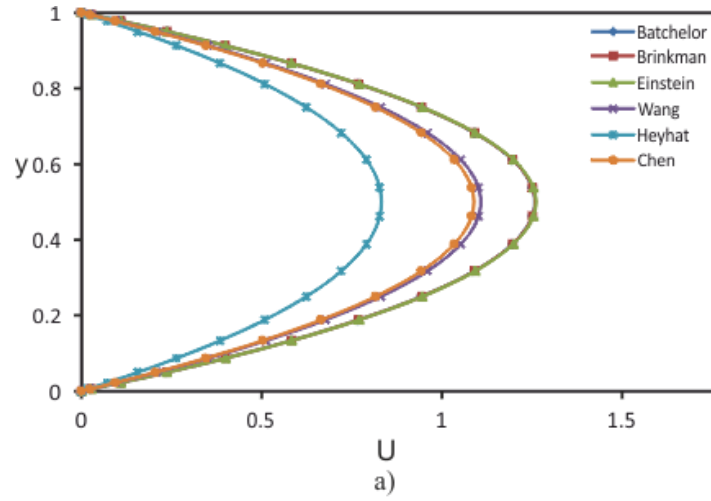


c)

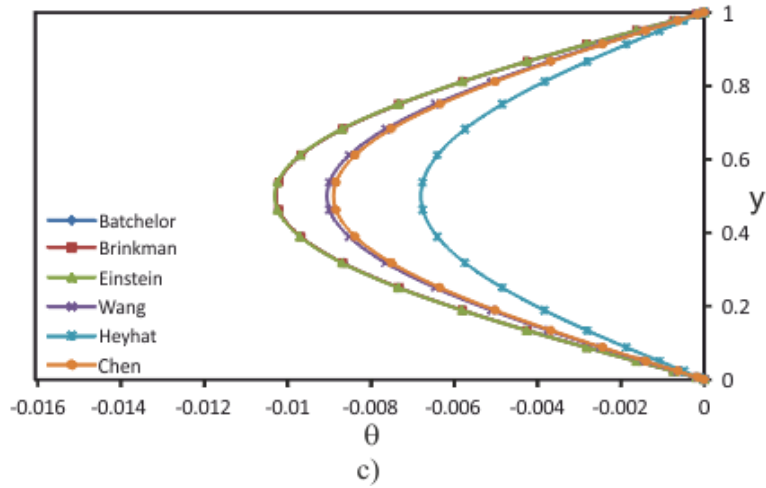
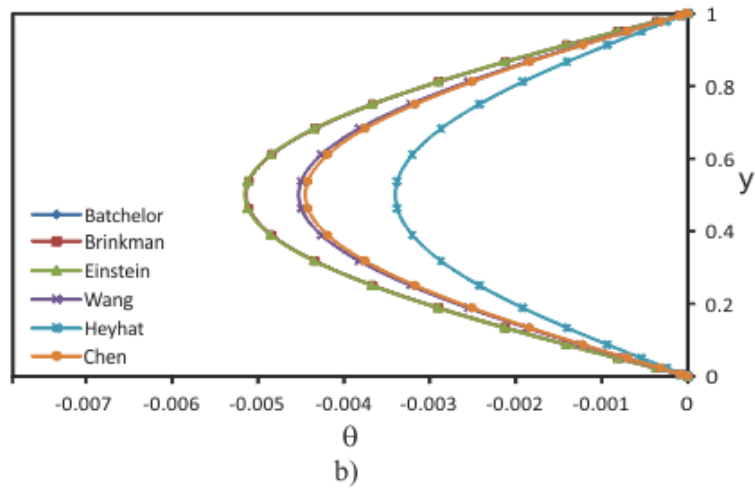
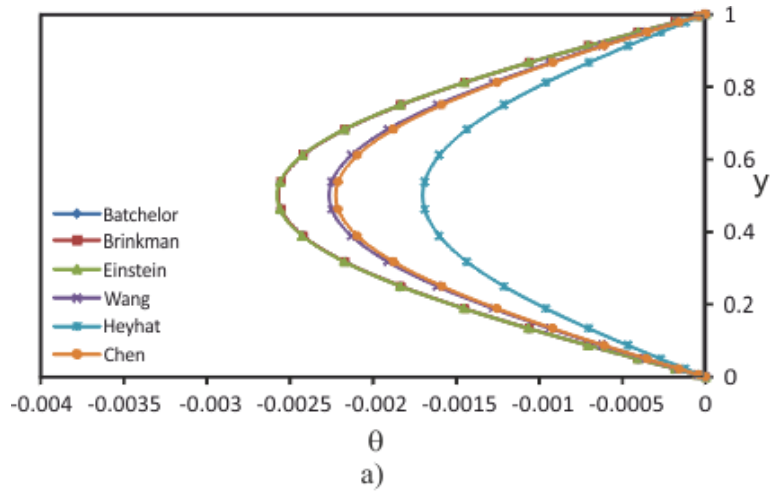
Şekil 4.7 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması,
 $\phi = 0.1, Re = 20$; a) $G = -0.5$, b) $G = -1.0$, c) $G = -2.0$



Şekil 4.8 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması,
 $\phi = 0.1$, $Re = 20$; a) $G = -0.5$, b) $G = -1.0$, c) $G = -2.0$



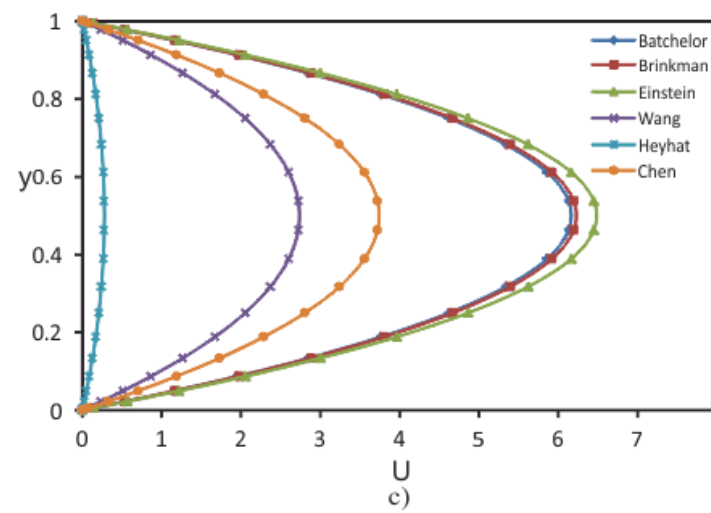
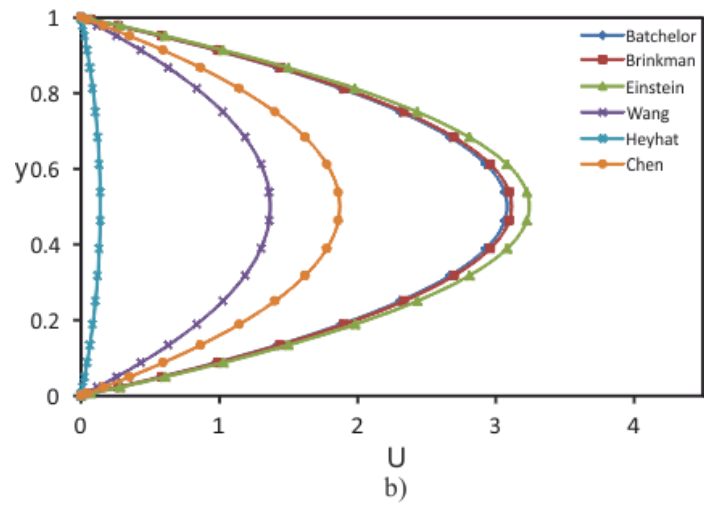
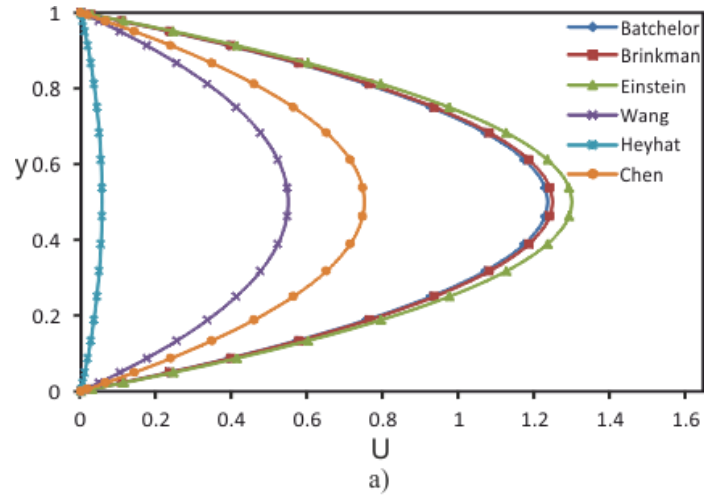
Şekil 4.9 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması,
 $\phi = 0.02, Re = 20$; a) $G = -0.5$, b) $G = -1.0$, c) $G = -2.0$



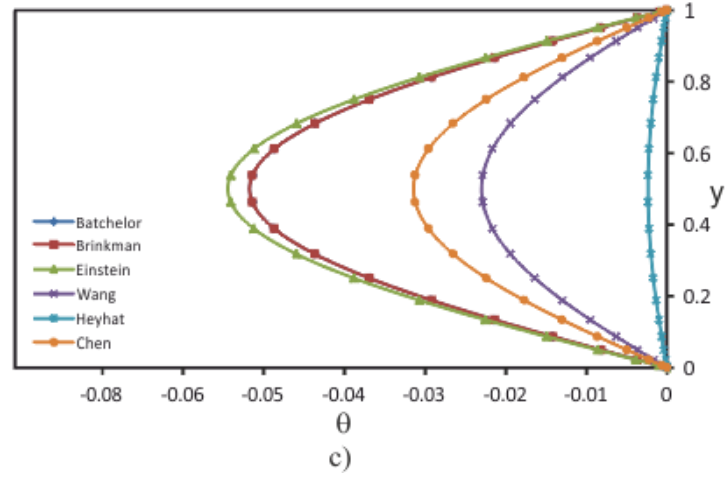
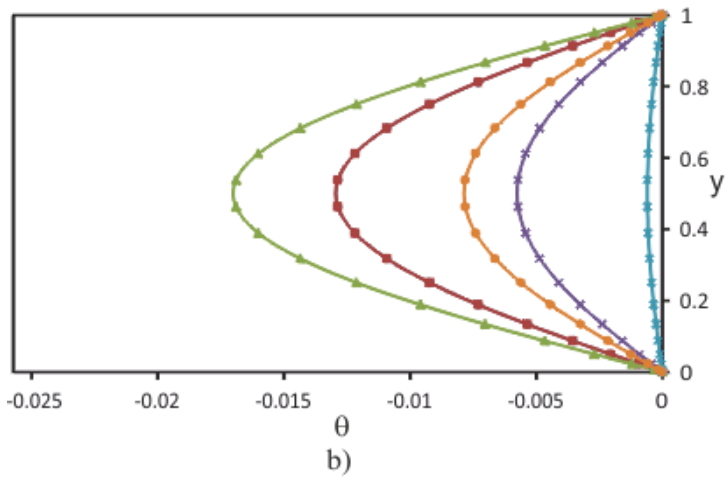
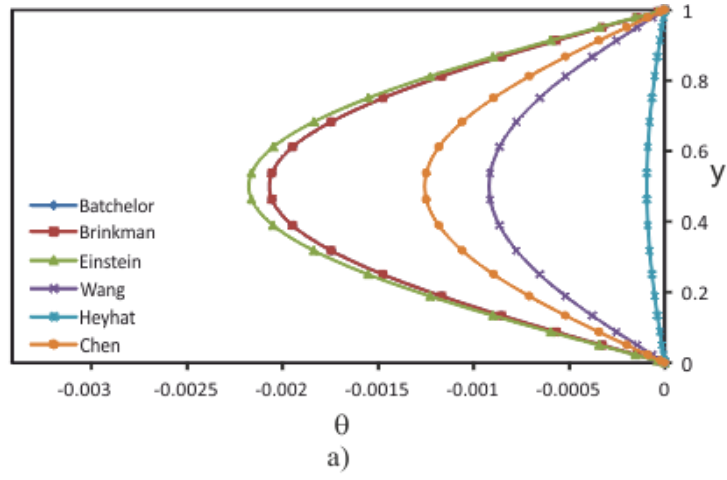
Şekil 4.10 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması,
 $\phi = 0.02, Re = 20$; a) $G = -0.5$, b) $G = -1.0$, c) $G = -2.0$

Reynolds sayısının modellerin hız ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini görmek için $\phi = 0.02$ ve 0.1 konsantrasyonlarda $Re = 20, 50, 100$ değerleri için elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.11, 4.12, 4.13, 4.14' te gösterilmiştir. Düşük konsantrasyon değerinde ($\phi = 0.02$) Reynolds sayısının tüm değerleri için Einstein, Brinkman ve Batchelor modelleri birbirleriyle, Wang ve Chen modelleri birbirleriyle uyumlu sonuçlar verirken Heyhat modeli bu modellerden sapmalar göstermektedir. Yüksek konsantrasyonda ($\phi = 0.1$) Reynolds sayısının farklı değerlerinde Einstein, Brinkman ve Batchelor modelleri birbirleriyle uyumlu sonuçlar verirken Wang, Chen ve Heyhat modelleri büyük sapmalar göstermektedir.

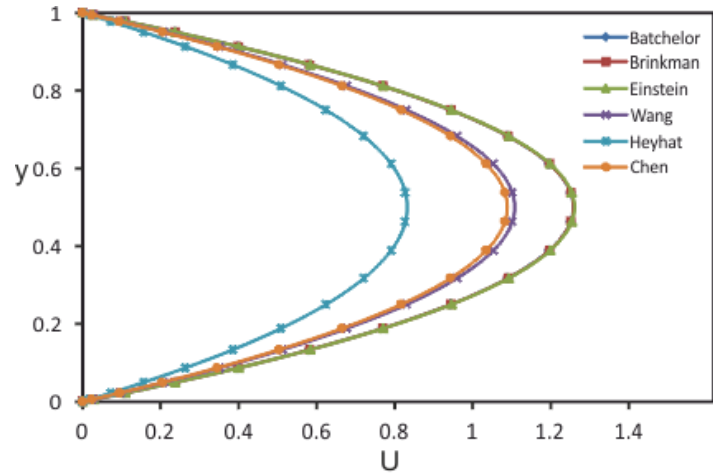
Farklı durumlar için modeller ele alındığında konsantrasyonun artmasıyla modellerin sıcaklık ve hız profillerinin birbirlerinden sapmalar gösterdiği, basınç gradyanının bu sapmalar üzerinde büyük bir etkisinin olmadığı ve Reynolds sayısının ise sıcaklık ve hız profilleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Sayısal çalışmalarda viskozite hesabı için kullanılacak modeller sonuçların değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Einstein, Batchelor ve Brinkman modellerinin Reynolds sayısı, konsantrasyon ve basınç gradyanının farklı durumları için genel anlamda birbiriyle uyumlu sonuçlar verirken Heyhat modelinin diğer modellerden oldukça saptığı görülmüştür. Chen ve Wang modelleri ise konsantrasyonun düşük değerlerinde uyumlu sonuçlar verirken konsantrasyonun ve Reynolds sayısının artmasıyla birbirlerinden sapmalar göstermektedirler.



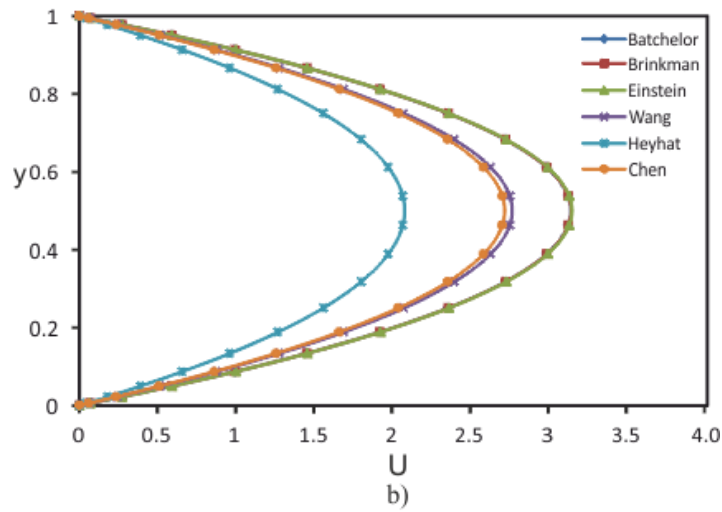
Şekil 4.11 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması,
 $\phi = 0.1, G = -0.5$; a) $Re = 20$, b) $Re = 50$, c) $Re = 100$



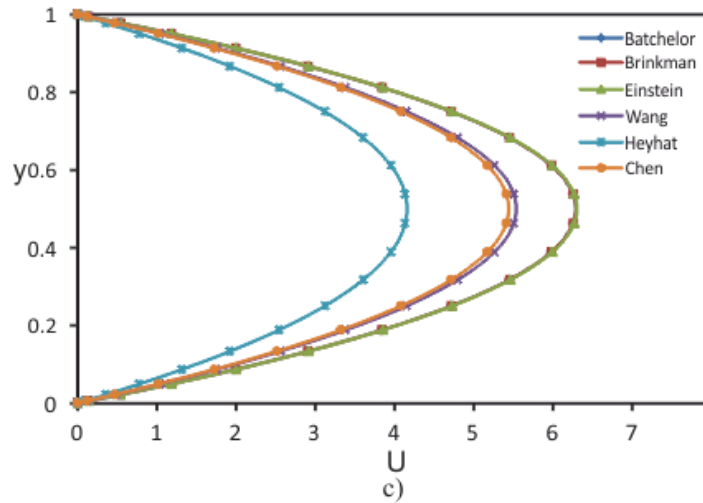
Şekil 4.12 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması,
 $\phi = 0.1, G = -0.5$; a) $Re = 20$, b) $Re = 50$, c) $Re = 100$



a)

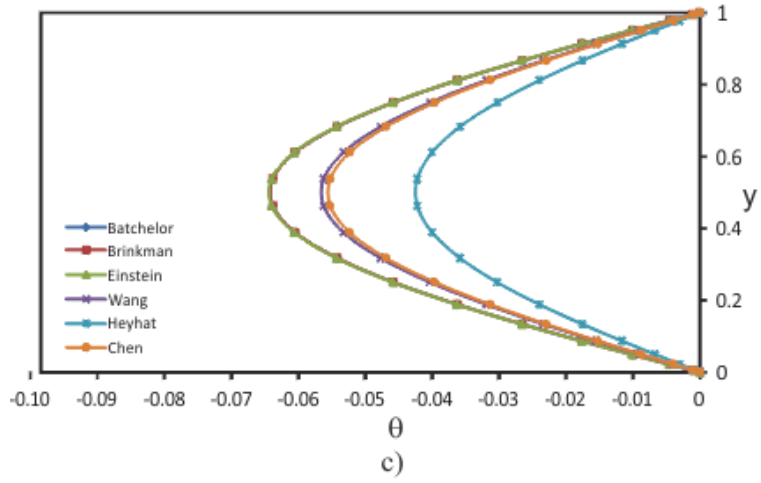
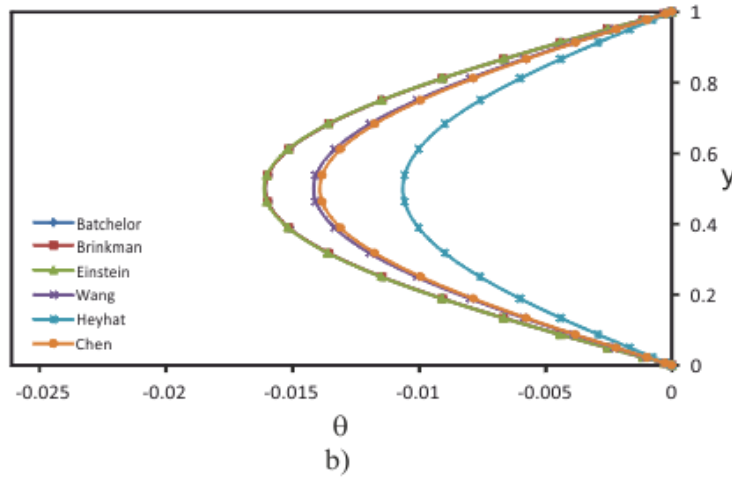
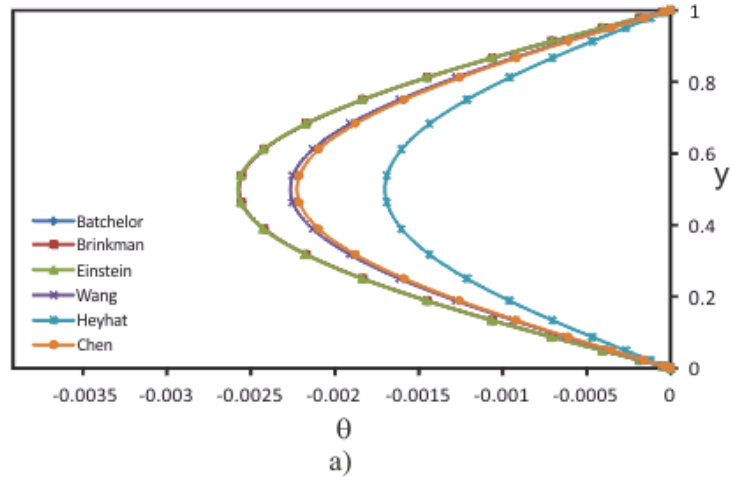


b)



c)

Şekil 4.13 Farklı modeller için hız profillerinin karşılaştırılması,
 $\phi = 0.02$, $G = -0.5$; a) $Re = 20$, b) $Re = 50$, c) $Re = 100$



Şekil 4.14 Farklı modeller için sıcaklık profillerinin karşılaştırılması,
 $\phi = 0.02$, $G = -0.5$; a) $Re = 20$, b) $Re = 50$, c) $Re = 100$

4.2 Al₂O₃-su Nanoakışkanın Brinkman Modeli İçin İncelenmesi

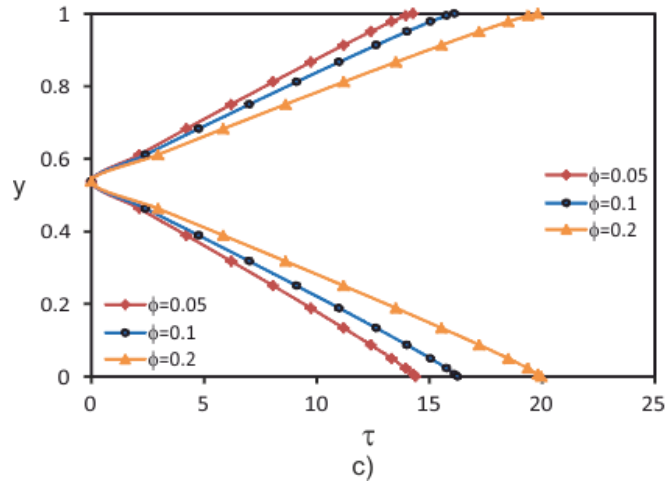
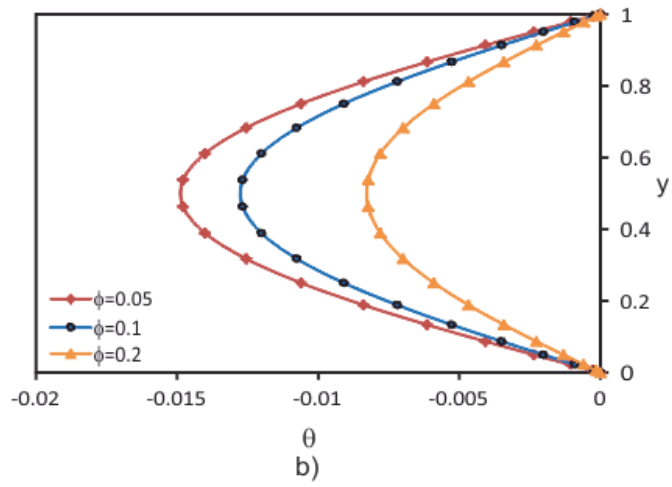
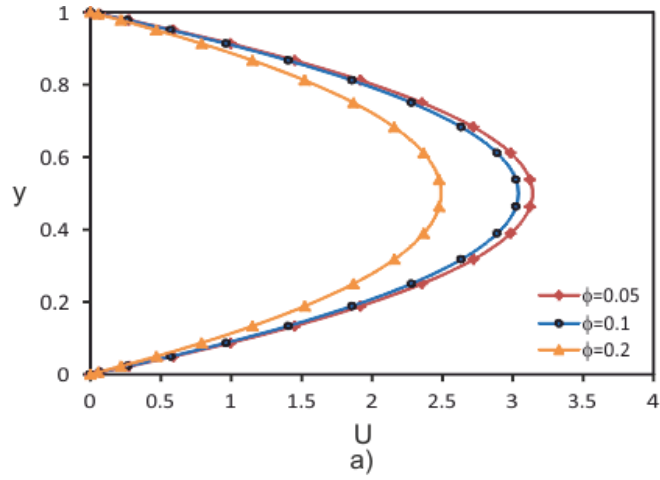
İlk kısma ilave olarak bu bölümde modellerden biri olan Brinkman modeli kanal akışı üzerinde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bunun için hız sıcaklık ve kayma gerilmesi üzerine basınç gradyanı, Reynolds sayısı ve hacimsel konsantrasyonun etkileri verilmiştir. Momentum ve enerji denklemlerinde yer alan ısı iletkenlik ve viskozite değerleri için hacimsel konsantrasyona bağlı olarak sırasıyla Maxwell ve Brinkman modelleri kullanılmıştır. Ayrıca eksenel yöndeki sıcaklık gradyanı ve Prandtl sayısı sırasıyla 1.0 ve 7.02 alınarak sabit kabul edilmiştir.

Maxwell ve Brinkman modelleri için viskozite ve ısı iletkenlik hacimsel konsantrasyonun fonksiyonu olarak verilmiştir. Hacimsel konsantrasyon (ϕ) arttıkça ısı iletkenliği, aynı zamanda viskozitesi yüksek bir akışkan elde edilir. Sıcaklık profilinin hacimsel konsantrasyona bağlı olarak değişimini görmek için Şekil 4.15b' de θ 'nın y 'ye göre değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ϕ arttıkça sıcaklığın mutlak değeri de artmaktadır. Sıcaklıktaki bu artış, viskozitenin artmasıyla hızdaki azalma ve dolayısıyla sabit ısı akısı altındaki kanaldan akışkana transfer olan ısı miktarının artmasından kaynaklandığı söylenebilir. Hacimsel konsantrasyonun artması nanoakışkanın ısı iletkenliğini ve mutlak sıcaklığını arttırmaktadır.

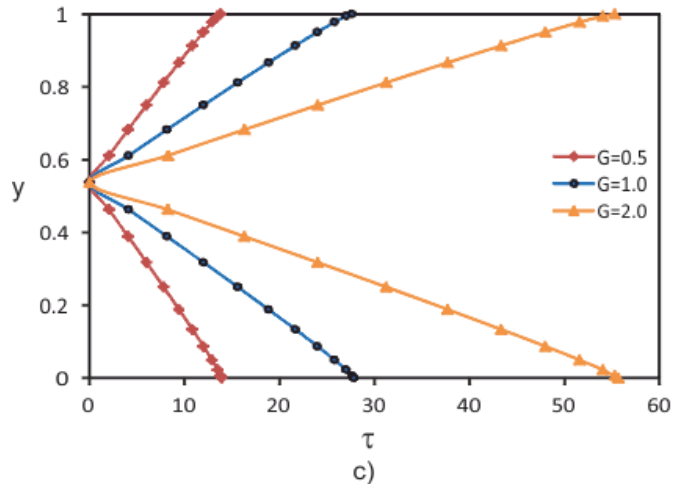
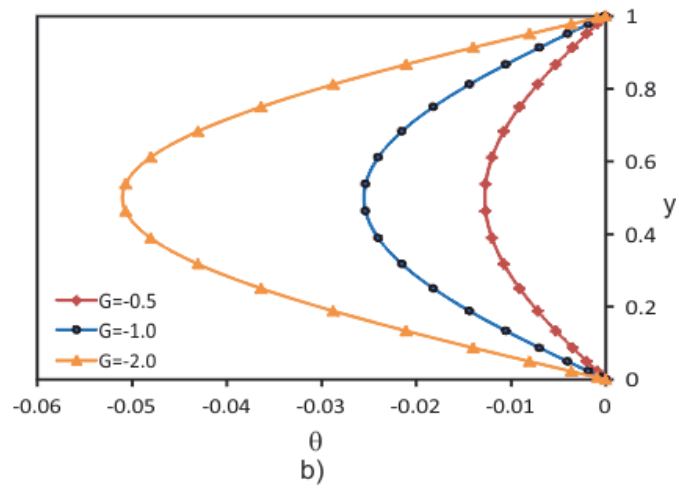
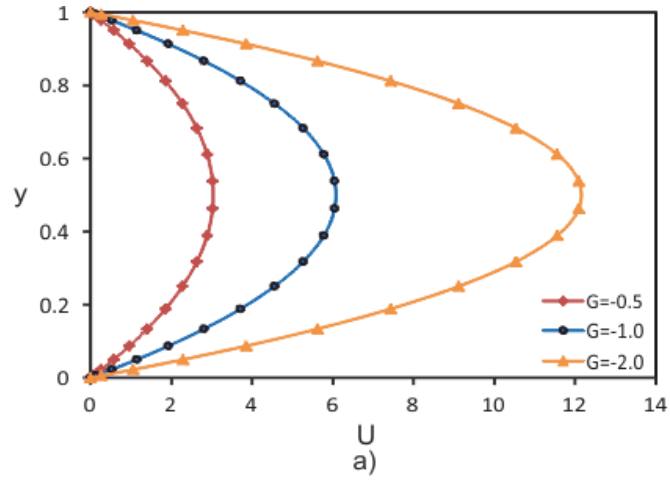
Hacimsel konsantrasyonun hız ve kayma gerilmesi dağılımı üzerindeki etkisi Şekil 4.15a ve Şekil 4.15c' de gösterilmiştir. Hacimsel konsantrasyonun artması viskozitenin artmasına neden olduğu için $dp/dx = -0.5$, $Re = 20$, $Pr = 7.02$ ve $d\theta/dx = 1.0$ sabit değerlerinde hız değerleri azalmaktadır. Viskozitenin artmasından dolayı, hız profilinin aksine kayma gerilmesi artmaktadır.

Sıcaklık, hız ve kayma gerilmesi dağılımlarını etkileyen önemli parametrelerden biri de basınç gradyanıdır. Basınç gradyanının hız, sıcaklık ve kayma gerilmesi dağılımı üzerindeki etkisi $dp/dx = -0.5, -1.0, -2.0$ değerleri için Şekil 4.16a, b ve c' de gösterilmiştir. Basınç gradyanındaki artma hız profiline artmasına ve bu da mutlak sıcaklık değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu artış aynı zamanda kayma gerilmesinin de artmasına neden olmaktadır.

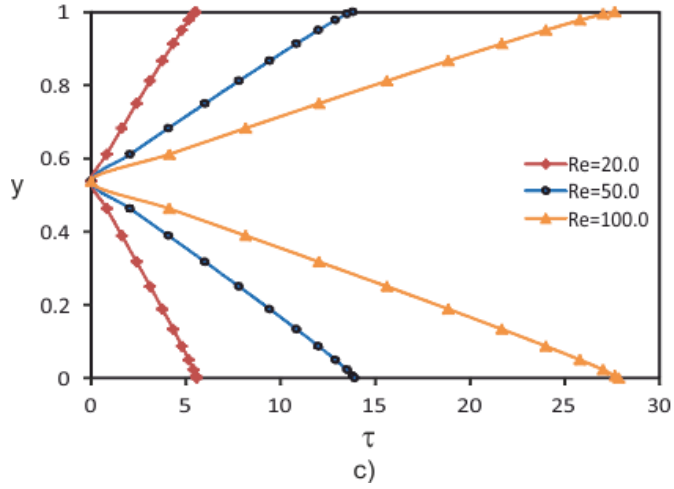
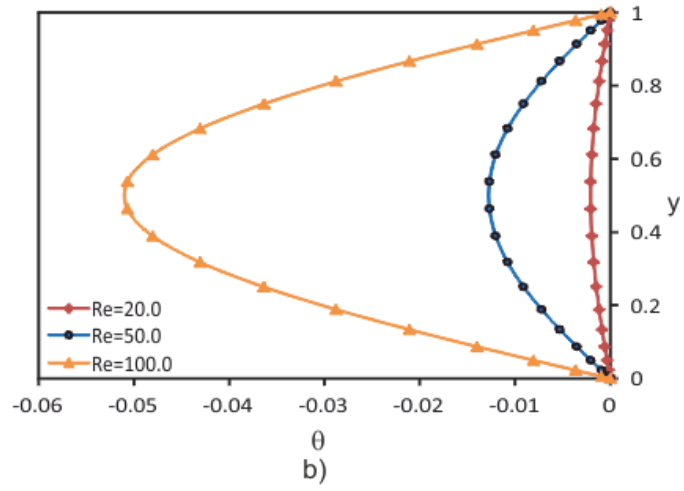
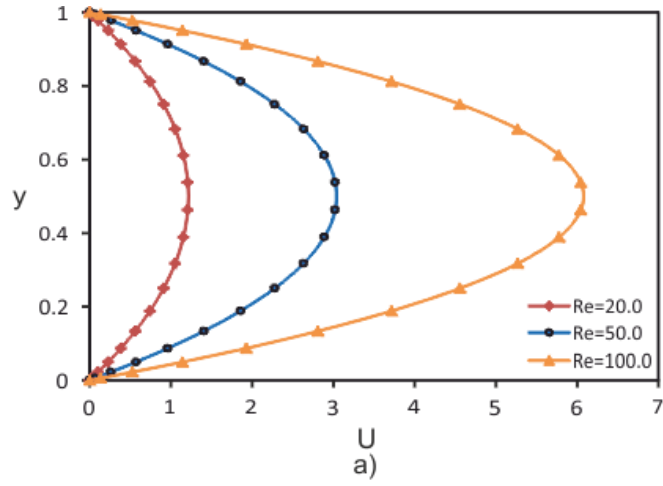
Reynolds sayısı, sıcaklık, hız ve kayma gerilmesi dağılımlarını etkileyen diğer önemli parametredir. Reynolds sayısı basınç gradyanı ile aynı etkiye sahiptir. Sabit parametreler $dp/dx = -0.5$ and $\phi = 0.05$ alınarak hız, sıcaklık ve kayma gerilmesi dağılımı için elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 4.17 a, b ve c' de gösterilmiştir. Reynolds sayısındaki artma, hız profiline artmasına ve bu da mutlak sıcaklık değerinin ve kayma gerilmesinin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.15 Hacimsel konsantrasyonun farklı değerleri için
a) hız b) sıcaklık c) kayma gerilmesi profilleri



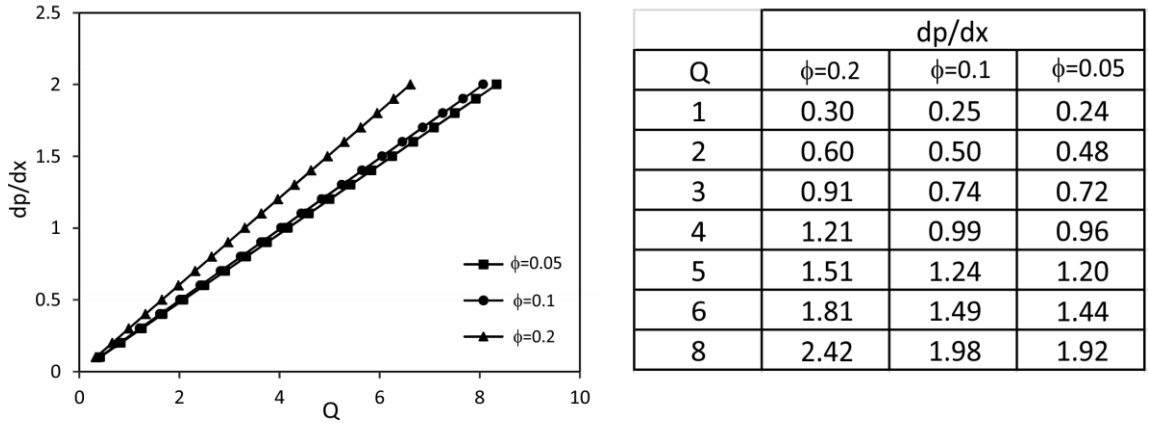
Şekil 4.16 Basınç gradyanının farklı değerleri için
a) hız b) sıcaklık c) kayma gerilmesi profilleri



Şekil 4.17 Reynolds sayısının farklı değerleri için
a) hız b) sıcaklık c) kayma gerilmesi profilleri

Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17 incelendiğinde sıcaklık, hız ve kayma gerilmesi profillerine olan en az etkiyi hacimsel konsantrasyonun yaptığı görülmektedir.

Hacimsel konsantrasyonun farklı değerleri için farklı hacimsel debilerdeki basınç gradyanının değişimi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Hacimsel konsantrasyonun 0.05 ve 0.1 değerleri için basınç gradyanının neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Aynı hacimsel debide hacimsel konsantrasyonun artmasıyla basınç gradyanı artarken bu artış oranı 0.2 hacimsel konsantrasyonda çok daha yüksektir. Örneğin boyutsuz hacimsel debinin 8 olduğu 0.1 hacimsel konsantrasyondan 0.2 konsantrasyona geçişte basınç gradyanında %18.18, 0.05 hacimsel konsantrasyondan 0.1 hacimsel konsantrasyona geçişte %3.03 lük bir artış olmaktadır. Bu durum bize akış uygulamalarda önemli bir etki olan pompalama gücünün hacimsel konsantrasyonun artmasıyla artacağını göstermektedir.



Şekil 4.18 Hacimsel konsantrasyonun farklı değerleri için farklı hacimsel debilerde basınç gradyanının değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sabit basınç gradyanının etkisi altındaki nanoakışkanın izotermal olmayan kanaldaki akışı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın birinci kısmında literatürde sıklıkla karşılaşılan teorik ve deneysel modeller (Einstein, Batchelor, Brinkman, Wang, Chen ve Heyhat modelleri) sıcaklık ve hız profillerine bakılarak karşılaştırılmış ve birbirlerine olan uyumları incelenmiştir. İkinci kısımda ise kanal içindeki Al_2O_3 -su nanoakışkanın hacimsel konsantrasyon, basınç gradyanı ve Reynolds sayısının sıcaklık, hız profili ve kayma gerilmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda modellerin konsantrasyonun artan ve azalan değerlerinde viskozite ve maksimum hız değerlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Denklemlerin ayrıklaştırılması Chebyshev polinom açılımları kullanılarak yapılmış ve doğrusal olmayan sınır değer problemleri Chebyshev Pseudospectral yöntemi ile Fortran programı kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür.

Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Konsantrasyonun düşük değerlerinde ($\phi = 0.001 - 0.01$) hesaplanan bağıl viskozite değerleri bu çalışmada kullanılan modeller için birbirine yakın sonuçlar verirken, daha yüksek konsantrasyonlarda ($\phi = 0.0 - 0.1$) modellerle hesaplanan viskozite değerleri birbirlerinden sapmalar göstermektedir. Özellikle Heyhat modeli ile hesaplanan viskozite değerleri $\phi = 0.1$ değerinde Einstein, Batchelor, Brinkman, Wang, Chen modelleri ile hesaplanan bağıl viskozite değerlerinden oldukça sapma göstermektedir.
2. $\phi < 0.01$ değerleri için ele alınan modellerde bağıl viskozite değerinin (μ_r) 1'e yakın olduğu ve kullanılan modeller için birbirine yakın sonuçlar verdiği görülürken, $\phi > 0.01$ değerleri için ise bağıl viskozite değerinin 1'den uzaklaştığı ve modellerle hesaplanan viskozite değerlerinin birbirlerinden sapmalar gösterdiği görülmektedir. Örneğin $\phi = 0.09$ dan 0.1 konsantrasyona geçişte bağıl viskozitedeki artış oranı Heyhat, Chen, Wang, Brinkman, Einstein, Batchelor modelleri için sırasıyla %39.2, %5.8, %10.4, %2.7, %2.0, %2.8 dir. Özellikle Heyhat modeli ile hesaplanan viskozite

değerleri $\phi = 0.1$ değerinde Einstein, Batchelor, Brinkman, Wang, Chen modelleri ile hesaplanan bağıl viskozite değerlerinden oldukça sapma göstermektedir. Düşük konsantrasyonlarda bağıl viskozitenin 1' e yakın olması nanoakışkan uygulamalarında, temel akışkanın viskozitesine kıyasla, viskozitede büyük artışlar yaşanmadan ısı transferini arttırabileceğimizi göstermektedir. Bunun için düşük konsantrasyonlarda ısı transfer performansını incelemek yararlı olacaktır. Ayrıca düşük konsantrasyonlarda, farklı modeller kullanılarak ısı iletkenlik değerlerinin hesaplanması ve kanal akışı dışında farklı geometrilerde de değerlendirilmesi önerilmektedir.

3. Sayısal çalışmalarda nanoakışkan viskozitesi hesabı için kullanılan modellerin, sonuçların karşılaştırılmasında önemli olduğunu belirtmekte fayda vardır. Konsantrasyondaki artışla beraber viskozite ve hız değerleri değişmekte ve modeller birbirlerinden uzaklaşma eğilimi göstermektedir. Bu nedenle sonuçlar karşılaştırılırken konsantrasyonun hangi değerlerinde ve hangi model kullanılarak viskozitenin hesaplandığını belirlemek yerinde olacaktır.
4. Düşük konsantrasyonlarda ele alınan tüm modeller için maksimum hız değerlerinin konsantrasyonun artması ile azaldığı ancak bu azalmanın oldukça küçük olduğu, yüksek konsantrasyonlarda ise maksimum hız değerlerinin oldukça azaldığı görülmektedir. Sayısal çalışmalarda kullanılan paket programlarda, başlangıç şartı olarak girilen hız değerlerinin, $\phi < 0.01$ konsantrasyonlarda Heyhat, Chen, Wang, Brinkman, Einstein, Batchelor modellerinin kullanılması durumunda sabit alınabileceği sonucuna varılabilir. Ancak, $\phi > 0.01$ değerlerde Einstein, Batchelor ve Brinkman modelleri birbirleri ile uyumlu sonuçlar vermekte iken Heyhat, Chen ve Wang modelleri birbirlerinden sapmalar göstermektedir.
5. Hacimsel konsantrasyon arttıkça nanoakışkan viskozitesi artmaktadır ve viskozitenin artmasıyla akış hızı azalmaktadır. Viskozitede artış aynı zamanda kayma gerilmesinin de artmasına neden olmaktadır.

6. Basınç gradyanındaki artış hız profiline artışa neden olmakta ve bu durum mutlak sıcaklığın azalmasına, kayma gerilmesinin ise artmasına neden olmaktadır. Reynolds sayısının basınç gradyanıyla aynı etkiye neden olduğu görülmektedir.
7. Aynı hacimsel debide, hacimsel konsantrasyondaki artış basınç gradyanında artışa neden olmaktadır.
8. Klasik modeller olan Einstein, Batchelor ve Brinkman modellerinin Reynolds sayısı, konsantrasyon ve basınç gradyanının farklı durumları için genel anlamda birbiriyle uyumlu sonuçlar verirken Heyhat modelinin diğer modellerden oldukça saptığı görülmüştür. Chen ve Wang modelleri ise konsantrasyonun düşük değerlerinde uyumlu sonuçlar verirken konsantrasyonun ve Reynolds sayısının artmasıyla birbirlerinden sapmalar göstermektedirler.
9. Nanoparçacık şekli, malzemesi, sıcaklık ve nanoparçacık kümelenmesinin nanoakışkan viskozitesi ve nanoakışkan bağıl viskozitesi üzerine etkileri çalışmalarda sıklıkla ifade edilmiş ve bu parametrelerin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bağlamda viskoziteyi mümkün olduğunca etkili parametreleri hesaba katarak tanımlamanın, nanoakışkanların viskozite değerlerinin doğru tahmini için gerekli olduğu söylenebilir. Bu çalışmada nanoakışkan viskozitesini hacimsel konsantrasyonun fonksiyonu olarak hesaplayan altı farklı viskozite modeli kullanılmıştır. Viskoziteyi farklı parametreler kullanarak hesaplayan ve kısım 2.3 te verilen modeller kullanılarak değerlendirilmesinin yapılması bu çalışmanın ileri aşamalarını oluşturmaktadır.
10. Burada tartışılan viskozite modelleri genellikle nanoakışkan viskozitesini hesaplamak için kullanılmış ve sonuçlar kanal içindeki bir akış için değerlendirilmiştir. Fakat modellerle hesaplanan viskozite değerlerinin, deneysel sonuçlarla desteklenmesi ve modellerdeki sınırlamaların ortaya konulması önemli olan kriterlerdir.

KAYNAKLAR

- Aladag, B., Halelfadl, S., Doner, N., Marè, T., Duret, S., Estellè, P., Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperature, *Applied Energy*, 876-880, 2012.
- Assael, M., Chen, C.F., Metaxa, I., Wakeham, W., Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, *Int. J. Thermophys.*, 971–985, 2004.
- Azmi, W. H., Sharma, K. V., Mamat, R., Alias, A. B. S., Misnon, I. I., Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids, *Materials Science and Engineering*, 36, 012029, [doi:10.1088/1757-899X/36/1/012029](https://doi.org/10.1088/1757-899X/36/1/012029), 2012.
- Batchelor, G.K., The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles, *J. Fluid Mech.*, 83, 97-117, 1977.
- Bergles, A. E., The imperative to enhance heat transfer, *Mayıs 25- Haziran 5*, 1998.
- Brinkman, H.C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *J. Chemistry Phy*, 20, 571-581, 1952.
- Chandrasekar, M., Suresh, S., Bose, A.C., Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 210-216, 2010.
- Chen, H., Ding, Y., Tan, C., Rheological behavior of nanofluids, *New Journal of Physics*, 9, 367, 1-24, 2007.
- Choi, S.U.S., Eastman, J.A., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME International Mechanical Engineering Congress& Exposition*, San Fransisco, CA. 1995.

- Corcione, M., Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy Conversion and Management*, 52, 789-793, 2011.
- Çengel, Y., A., Cimbala, J.M., *Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları*, İzmir Güven Kitabevi, İzmir, 2008.
- Das, S.K., Choi, S.U.S., Yu, W., Pradeep, T., *Nano fluids science and technology*, 978-0-470-07473-2, 2008.
- Davarnejad, R., Ardehali, R.M., Modeling of TiO₂-water nanofluid effect on heat transfer and pressure drop, *International Journal of Engineering*, 27(2), 195-202, 2014.
- De Bruijn, H., The viscosity of suspensions of spherical particles, *Recueil des travaux chimiques des Pays_Bas*, 6, 863-874, 1942.
- Duangthongsuk, W., Wongwises, S., Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 706–714, 2009.
- Eilers, A.M., Die, H.Von, Viskosität von Emulsionen hochviskoser Stoffe Funktion der Konzentration. *Kolloid –Zeitschrift*, 97, 313-321, 1941.
- Einstein, A., A new determination of molecular dimensions, *Annalen der Physik*, 19(4), 289-306, 1906.
- Elçioğlu, E.B., Experimental and theoretical investigations on alumina–water nanofluid viscosity with statistical analysis, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi*, Ankara, 137, 2013.

- Elçioğlu, E.B., Kakaç, S., Yazıcıoğlu, A.G., Nanoakışkan viskozitesinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 137-151, 2014.
- Eshelby, J.D., The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, *Proceeding of Royal Society of London*, 241, 376-396, 1957.
- Frankel, N.A., Acrivos, A., On the viscosity of concentrate suspension of solid spheres, *Chemical Engineering Science*, 22, 847-853, 1967.
- Graham, A.L., On the viscosity of suspensions of solid spheres, *Applied Scientific Research*, 37, 275-286, 1981.
- Halefadi, S., Estellè, P., Aladag, B., Doner, N., Marè, T., Viscosity of carbon nanotubes water-based nano fluids: Influence of concentration and temperature, *International Journal of Thermal Sciences*, 111-117, 2013.
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., Lu, H., Heat transfer and flow behavior of a aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flow in upward through a vertical pipe, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2272–2281, 2007.
- Heidary, H., Kermani, M.J., Effect of nano-particles on forced convection in sinusoidal-wall channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1520-1527, 2010.
- Heyhat , M.M., Kowsary, F., Rashidi , A.M., Momenpour, M.H., Amrollahi, A., Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed flow regime, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 483–489, 2013.
- Hosseini, S.Sh., Shahrjerdi, A., Vazifeshenas, Y., A review of relations for physical properties of nanofluids, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(10), 417-435, 2011.

- Hwang, Y., Ahn, Y., Shin, H., Lee, C., Kim, G., Park, H., Lee, J., Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids, *Curr. Appl Phys.*, 6(6), 1068–1071, 2006.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri: Dördüncü Basımdan Çeviri, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2006.
- Jeong, J., Li, C., Kwon, Y., Lee, J., Kim, S.H., Yun, R., Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nano fluids, *International Journal of Refrigeration*, 2233-2241, 2013.
- Jung, J., Cho, Y.C., Lee, W.H., Kang, Y.T., Thermal conductivity measurement and characterization of binary nanofluids, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 54, 1728–1733, 2011.
- Jung, J., Yoo, J., Thermal conductivity enhancement of nanofluids in conjunction with electrical double layer (EDL), *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52, 525–528, 2009.
- Kebllinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S., Eastman, J.A., Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 855–863, 2002.
- Krieger, I. M, Dougherty, T. J., A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres, *Trans. of The Society of Rheology*, 3, 137-152, 1959.
- Kruger, I.M., Rheology of monodisperse lattices, *Advances in Colloids&Interface Science*, 3, 111-136, 1972.
- Kulkarni, D.P., Das, D.K., Chukwi, G.A., Temperature dependent rheological property of copper okside nanoparticles suspension (nanofluids), *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6, 1150-1154, 2006.

- Kulkarni, D.P., Namburu, P.K., Das, D.K., Comparison of heat transfer and fluid dynamic performance of nanofluids, 366-369, 2007.
- Kumar, P.C.M., Kumar, J., Suresh, S., International Journal of Engineering Innovation&Reseach, 182-188, 2012.
- Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A., Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, ASME J. Heat Transfer, 121, 280-289, 1999.
- Liu, M., Lin, M., Tsai, C., Wang, C., Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method, Int. J. Heat Mass Transfer, 3028–3033, 2006.
- Mahbulul, I.M., Saidur, R., Amalinai, M.A., Latest developments on the viscosity of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 874-885, 2012.
- Maïga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N., Roy, G., Heat transfer behaviors of nanofluids in a uniformly heated tube, Superlattices and Microstructures, 35, 543 -557, 2004.
- Manca, O., Nardini, S., Ricci, D., A numerical study of nanofluid forced convection in ribbed channels, Appl Therm Eng., 280–292, 2012.
- Maron, S.H., Pierce, P.E., Application of Ree-Eyring generalized flow theory to suspensions of spherical particles, J. Colloid Sci., 11, 80e95, 1956.
- Maxwell, J.C., A treatise on electricity and magnetism, unabridged 3rd ed., Clarendon Press, Oxford, UK, 1891.
- Mishra, P.C., Mukherjee, S., Nayak, A.K., Panda, A., Brief review on viscosity of nanofluids, International Nano Letters, 109-120, 2014.

- Mohammed, H.A., Bhaskaran , G., Shuaib, N.H., Abu-Mulaweh, H.I., Influence of nanofluids on parallel flow square microchannel heat exchanger performance, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 1–9, 2011.
- Mooney, M., The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles, *J. Collides Sci*, 6, 162-170, 1951.
- Murshed, S.M.S., Leong, K.C., Yang, C., Thermophysical and elektrokinetic properties of nanofluids-A critical review, *Applied Thermal Engineering*, 28, 2109-2125, 2008.
- Namburu, P.K., Kulkarni, D.P., Misra,D., Das, D.K., Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 397–402, 2007.
- Nguyen, C.T., Desgranges, F., Roy, G., Galanis, N., Marer, T., Boucher, S., Mintsä, H., Temperature and particle-size dependent viscosity data for water based nanofluids – hysteresis phenomenon, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1492–1506, 2007.
- Nielsen, L.E., Generalized equation for the elastic moduli of composite materials, *J. Appl. Phy*, 41, 4626-4627, 1970.
- Noei, S.H., Heris, S.Z., Kahani, M., Nowee, S.M., Heat transfer enhancement using Al₂O₃/water nanofluid in two–phase closed termosyphon, *International Journal of Heat and Fluid Flow* ,700-705, 2009.
- Özerinç, S., Heat transfer enhancement with nanofluids, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi*, Ankara, Mayıs 2010a
- Özerinç, S., Kakaç, S., Yazıcıoğlu, A.G, Enhance thermal conductivity of nanofluids: A state-of-the-art Review, *Microfluid Nanofluid*, 8, 145-170, 2010b.

- Pak, B.C., Cho, Y.I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer*, 11, 151-170, 1998.
- Pastoriza-Gallego, M.J., Lugo, L., Legido, J.L., Pineiro, M.M., Thermal conductivity and viscosity measurements of ethyleneglycol-based Al_2O_3 nanofluids, *Nanoscale Research Letters*, 2011.
- Pourmahmoud, N., Ghafouri, A., Mirzaee, I., Numerical comparison of viscosity models on mixed convection in double lid-driven cavity utilized CuO-water nanofluids, *Thermal Science*, Online-first Issue 00, 48-48, [doi:10.2298/TSCI130309048P](https://doi.org/10.2298/TSCI130309048P), 2006.
- Prasher, R., Phelan, P. E., Bhattacharya, P., Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (Nanofluid), *Nano Lett.*, 1529-1534, 2006.
- Prasher, R., Song, D., Wang, J.L., Phelan, P., Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications, *Applied Physics Letters*, 133108, 2006a.
- Putnam, S.A., Cahill, D.G., Braun, P.V., Ge, Z., Shimmin, R.G., Thermal conductivity of nanoparticle suspensions, *J. Appl. Phys.*, 084308, 2006.
- Putra, N., Roetzel, W., Das, S.K., Natural convection of nanofluids, *Heat and Mass Transfer*, 39, 775-784, 2003.
- Rudyak, V.Ya., Krasnolutskii, S.L., Dependence of the viscosity of nanofluids on nanoparticle size and material, *Physics Letter*, 1845-1849, 2014.
- Rudyak, V.Ya., Viscosity of nano fluids-Why it is not described by the classical theories, *Adv. Nano part.*, 2, 266–279, 2013.

- Saito, N., Concentration dependence of the viscosity of high polymer solutions, *Int. J. Phys. Society of Japan*, 5, 4-8, 1950.
- Simha, A., Treatment of the viscosity of concentrated suspensions, *J. Appl. Phys*, 23, 1020-1024, 1952.
- Sundar, L.S., Sharma., K.V, Heat transfer enhancements of low volume concentration Al_2O_3 nanofluid and with longitudinal strip inserts in a circular tube, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 53(19–20), 4280–4286, 2010.
- Şahin, B., Çomaklı, K., Çomaklı, Ö., Yılmaz, M., Nanoakışkanlar ile ısı transferinin iyileştirilmesi, *Mühendis ve Makina*, 559, 2006.
- Tang, G.Y., Yang, C., Chai, J.C., H.Q., Gong, Joule heating effect on electro osmotic flow and mass species transport in microcapillary, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 215-227, 2004.
- Tavman, I., Turgut, A., Chirtoc, M., Schuchmann, H.P., Tavman, S., Experimental investigation of viscosity and thermal conductivity of suspensions containing nano sized ceramic particles, *Archives of Materials Science and Engineering*, 99-104, 2008.
- Timofeeva, E.V., Gavrilov, A.N., Mc Closkey, J.M., Tolmachev, Y.V., Sprunt, S., Lopatina, L.M., Selinger, J.V., Thermal conductivity and particle agglomeration in Alumina nanofluids: experimental and theory, *Phys. Rev. E*, 76 (6),061203, 2007.
- Timofeeva, E.V., Nanofluids for heat transfer – Potential and engineering strategies in two phase flow, *Phase Change and Numerical Modeling*, 435-450, 2011.

- Timofeeva, E.V., Routbort, J.L., Singh, D., Particle shape effects on thermophysical properties of Alumina nanofluids, *Journal of Applied Physics*, 106, 014304, 2009.
- Tseng, W. J., Lin, K.C., Rheology and colloidal structure of aqueous TiO₂ nanoparticle suspensions, *Material Science and Engineering*, 355, 186-192, 2003.
- Utomo, A.T., Poth, H., Robbins, P.T., Pacek, A.W., Experimental and theoretical studies of thermal conductivity, viscosity and heat transfer coefficient of titania and alumina nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 7772-7781, 2012.
- Vajravelu, K., Prasad, K.V., Chiu-On, N.G., The effect of variable viscosity on the flow and heat transfer of a viscous Ag- water and Cu-water nano fluids, *Journal of Hydrodynamics*, 1-9, 2013.
- Vand, V., Viscosity of solutions and suspensions theory, *J.Phys. and Colloid Chemistry*, 52, 277-299, 1948 .
- Wang, X., Xu, X., Choi, S.U.S., Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 474–480, 1999.
- Wen, D., Ding, Y., Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conduction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (24), 5181–5188, 2004.
- Wensel, J., Wright, B., Thomas, D., Douglas, W., Mannhalter, B., Cross, W., Hong, H., Kellar, J., Smith, P., Roy, W., Enhanced thermal conductivity by aggregation in heat transfer nanofluids containing metal oxide nanoparticles and carbon nanotubes, *Appl. Phys. Lett.*, 92, 023110, 2008.

- Williams, W., Buongiorno, J., Hu, Lin-Wen, Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of Alumina/water and Zirconia/water nanoparticle colloids (Nanofluids) in horizontal tubes, *J. of Heat Transfer*, b230, 042412-1, 2008.
- Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Thermal conductivity of suspensions containing nano sized SiC particles, *Int. J. Thermophys.*, 571–580, 2002.
- Xuan, Y., Li, Q, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat Fluid Flow*, 58–64, 2000.
- Yu , W., France, D.M., Choi, S.U.S., Routbort, J.L., Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications, ANL/ESD/07–9, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 2007.
- Yu, W., France, D., Routbort, M., Routbort, J. L., Choi, S.U.S., Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements, *Heat Transfer Eng.*, 432-460, 2008.
- Yu, W., Xie, H., A review on nanofluids: Preperation, stability mechanisms and applications, *Journal of Nanomaterials*, 1-17, 2012.
- Zhou, D., Heat transfer enhancement of copper nanofluid with a coustic cavitation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 3109–3117, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Betül TEYMUR

Doğum Tarihi : 06. 03. 1991

E-Posta Adresi: teymurbetul @ gmail.com

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Okul/Üniversite	Bitirme Yılı
Lise	Fen	Özel Akdeniz Palmiye Lisesi	2009
Lisans	Enerji Sistemleri Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2013
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	-

İş Tecrübesi:

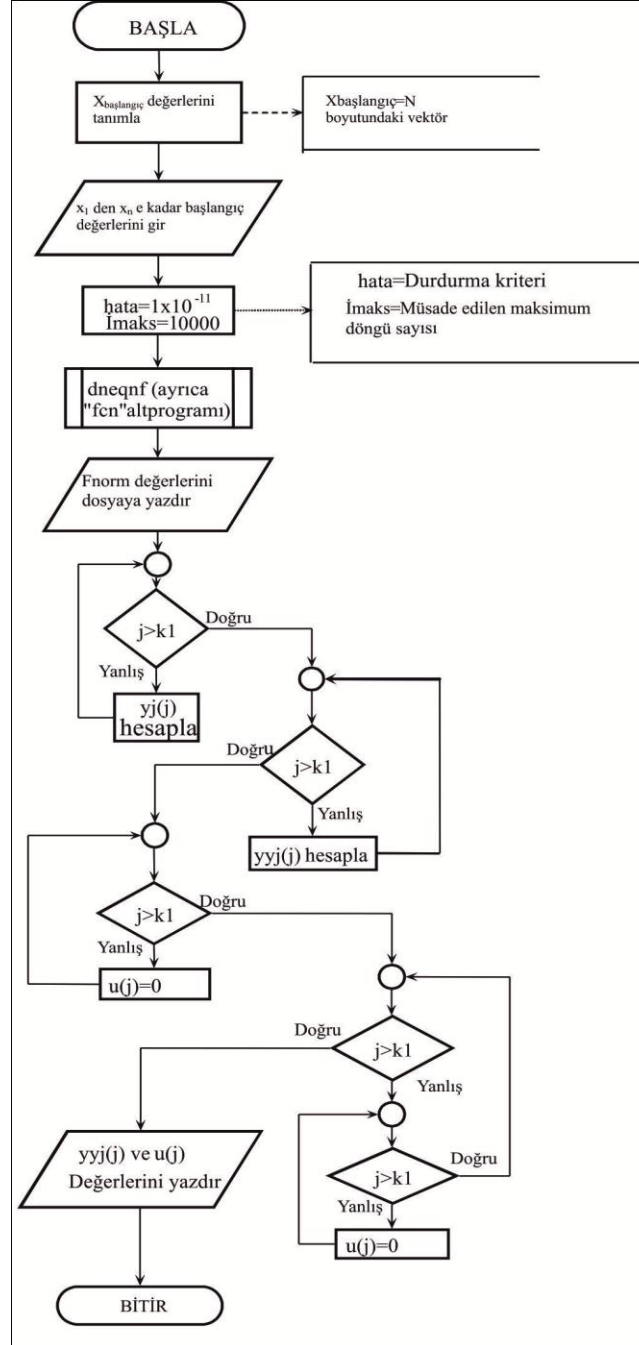
Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Araştırma Görevlisi	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2014

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Teymur , B., Özalp, C., Enerji Verimliliğine Yönelik Visual Basic Tabanlı Bir Paket Program Hazırlanması, 2.Ulusal İklimlendirme Soğutma Eğitimi Sempozyumu ve Sergisi, 714-723 , Balıkesir, Türkiye, Ekim 2014.
2. Özalp, C., Yanıktepe, B., Çağ, S., Teymur, B., Güneş Enerjisi Kullanılarak Elektrik ve Sıcak Su İhtiyacının Karşıllanması ve Ekonomik Analizinin Yapılması: Bir İşletme Örneği, UGHEK'14 , Eskişehir, Türkiye, Mayıs 2014.
3. Teymur, B., Özalp, C., Hürdoğan, E., Tokgöz, N., Üniversite Yerleşke Alanı Fotovoltaik-Rüzgâr Hibrid Güç Sistemi Uygulama Örneği ve Ekonomik Analizi(poster sunumu), UGHEK'14, Eskişehir, Türkiye, Mayıs 2014.
4. Özalp, C., Yerlikaya, U., Tokgöz, N., Teymur, B., Yalıtımsız Standart bir Bina ile Yalıtımlı-Enerji Etkin bir Binanın Karşılaştırılması, UGHEK'14, Eskişehir, Türkiye, Mayıs 2014.
5. Alnak, D.E., Teymur, B., Tokgöz, N., Yanıktepe, B., Özalp, C., Numerical investigation of pressure drop of Al₂O₃ nano dispersion in water at common components of pipe system, 1st International Conference on Engineering and Natural Sciences, Skopje, Makedonya, Mayıs 2015.

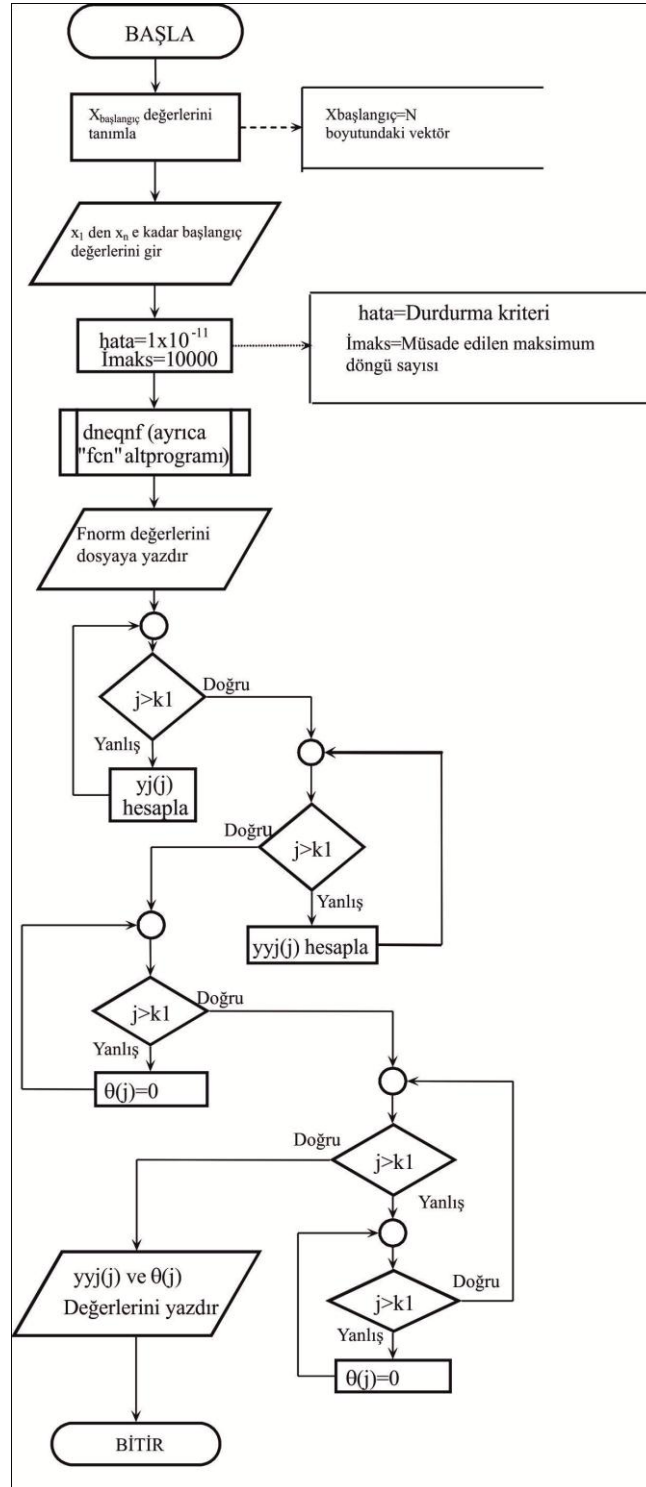
EKLER

EK-1: HIZ İÇİN AKIŞ DİYAGRAMI



Şekil B.1 Sayısal analiz için Fortran Programında kullanılan hız akış diyagramı

EK-2: SICAKLIK İÇİN AKIŞ DİYAGRAMI



Şekil B.2 Sayısal analiz için Fortran Programında kullanılan sıcaklık akış diyagramı

EK-3: CHEBYSHEV POLİNOM AÇILIMLARININ ÖZELLİKLERİ

n derecesinin Chebyshev polinom açılımı, $T_n(x)$,

$$T_n(\cos\theta) = \cos n\theta \quad (A.1)$$

olarak tanımlanır. Böylece

$T_0(x) = 1$, $T_1(x) = x$, $T_2(x) = 2x^2 - 1$, $T_3(x) = 4x^3 - 3x$, $T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1$ vb. elde edilir. Chebyshev polinomları $x = \pm 1$ ile sınırlı diferansiyel denklem,

$$\sqrt{1-x^2} \frac{d}{dx} \sqrt{1-x^2} \frac{dT_n}{dx} + n^2 T_n = 0 \quad (A.2)$$

çözümleridir.

Bu polinomlar ortogonal eşitlik ,

$$\int_{-1}^1 T_n(x) T_m(x) (1-x^2)^{-1/2} dx = \frac{\pi}{2} c_n \delta_{nm} \quad (A.3)$$

sağlamaktadır. Burada $n < 0$ için $c_n = 2$, $c_n = 1$ dir.

Chebyshev polinomlarının bazı özellikleri,

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x) \quad (A.4)$$

$$|T_n(x)| \leq 1, |T_n'(x)| \leq n^2 \quad (A.5)$$

$$\frac{d^p}{dx^p} T_n(\mp 1) = (\mp 1)^{n+p} \prod_{k=0}^{p-1} (n^2 - k^2) / (2k + 1) \quad (A.6)$$

$$\left| \frac{d^p}{dx^p} T_n(x) \right| = O(n^{2p}), n \rightarrow \infty, p \text{ sabit}, |x| \leq 1 \quad (\text{A.7})$$

$$\begin{aligned} T_n(\mp 1) &= (\mp 1)^n, \quad T_{2n}(0) = (-1)^n, \quad T_{2n+1}(0) = 0 \\ T_{2n}'(0) &= 0, \quad T_{2n+1}'(0) = (-1)^n n \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Aşağıda genişletme katsayıları a_n, b_n serilere açılımları ile formüle edilmiştir.

$$\begin{aligned} f_x &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n T_n(x) \quad |x| \leq 1, \\ Lf_x &= \sum_{n=0}^{\infty} b_n T_n(x) \quad |x| \leq 1, \end{aligned}$$

L lineer değişken operatörünü ifade etmektedir. c_n, d_n sabitleri,

$$\begin{aligned} c_0 &= 2, \quad c_n = 0(n < 0), \quad c_n (n > 0), \\ d_n &= 1(n \geq 0), \quad d_n = 0(n < 0) \end{aligned}$$

olarak tanımlanır. Bazı formüller;

$$Lf = f'(x): c_n b_n = 2 \sum_{\substack{p=n+1 \\ p+n \text{ tek}}}^{\infty} p a_p, \quad (\text{A.9})$$

$$Lf = f''(x): c_n b_n = \sum_{\substack{p=n+2 \\ p+n \text{ çift}}}^{\infty} p(p^2 - n^2) a_p, \quad (\text{A.10})$$

$$Lf = x f(x): b_n = \frac{1}{2}(c_{n-1} a_{n-1} + a_{n+1}), \quad (\text{A.11})$$

$$Lf = x^2 f(x): b_n = \frac{1}{4}\{c_{n-2} a_{n-2} + (c_n + c_{n-1})a_n + a_{n+2}\}, \quad (\text{A.12})$$

$$Lf = x^4 f(x): b_n = \frac{1}{16} \{c_{n-4} a_{n-4} + (c_{n-3} + c_{n-2}^2 + 2c_{n-2})a_{n-2} + (c_{n-2} + 2c_{n-1} + c_{n-1}^2 + c_n^2 + c_n)a_n + (c_{n-1} + c_n + c_{n+1} + c_{n+2})a_{n+2} + a_{n+4}\} \quad (A.13)$$

$$Lf = \frac{f(x) - f(0)}{x}: c_n b_n = 2 \sum_{\substack{p=n+1 \\ p+n \text{ tek}}}^{\infty} (-1)^{(p-n-1)/2} a_p, \quad (A.14)$$

$$Lf = \frac{f(x) - f(0) - f'(0)x}{x^2}: c_n b_n = 2 \sum_{\substack{p=n+2 \\ p+n \text{ çift}}}^{\infty} (p-n)(-1)^{(p-n-2)/2} a_p, \quad (A.15)$$

$$Lf = \frac{f'(0) - f'(x)}{x}: c_n b_n = 4 \sum_{\substack{p=n+2 \\ p-n=2 \pmod{4}}}^{\infty} p a_p, \quad (A.16)$$

$$Lf = \frac{f'(x) - f'(0) - f''(0)x}{x^2}: c_n b_n = 2 \sum_{\substack{p=n+3 \\ p-n=3 \pmod{4}}}^{\infty} (p-n+1) p a_p - \sum_{\substack{p=n+5 \\ p-n=1 \pmod{4}}}^{\infty} (p-n-1) p a_p \quad (A.17)$$

$$Lf = x f'(x): c_n b_n = n a_n + 2 \sum_{\substack{p=n+2 \\ p+n \text{ çift}}}^{\infty} p a_p, \quad (A.18)$$

$$Lf = x^2 f'(x): = \frac{1}{2} \left\{ (n-1)a_{n-1}(n+1) + a_{n+1} 4 \sum_{\substack{p=n+3 \\ p+n \text{ tek}}}^{\infty} p a_p \right\} \quad (A.19)$$

$$Lf = x f''(x): c_n b_n = 2n(n+1)a_{n+1} + \sum_{\substack{p=n+3 \\ p+n \text{ tek}}}^{\infty} p(p^2 - n^2 - 1)a_p, \quad (A.20)$$

$$\begin{aligned}
Lf = x^2 f''(x): c_n b_n \\
= n(n-1)a_n + \sum_{\substack{p=n+2 \\ p+n \text{ çift}}}^{\infty} p(p^2 - n^2 - 2)a_p,
\end{aligned} \tag{A.21}$$

$$\begin{aligned}
Lf = \frac{f(x)}{1-x^2}, \quad f(\mp 1) = 0: c_n b_n \\
= -2 \sum_{\substack{p=n+2 \\ p+n \text{ çift}}}^{\infty} (p-n)a_p,
\end{aligned} \tag{A.22}$$

$f^{(q)}(x)$, $\frac{d^q}{dx^q} f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n^{(q)} T_n(x)$ gibi genişletilirse

$$c_{n-1} a_{n-1}^{(q)} - a_{n+1}^{(q)} = 2n a_n^{(q-1)}, n \geq 1 \text{ olur.}$$