

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PARALEL PLAKALAR ARASINDA MHD NEWTONIAN OLMAYAN
NANOAKIŞKANIN AKIŞINDA AKIŞ VE ISI TRANSFERİ
KARAKTERİSTİKLERİ**

DAMLA ÖZGÜR

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşegül CAN

EDİRNE-2024

DAMLA ÖZGÜR'ün hazırladığı “**PARALEL PLAKALAR ARASINDA MHD NEWTONIAN OLMAYAN NANOAKIŞKANIN AKIŞINDA AKIŞ VE ISI TRANSFERİ KARAKTERİSTİKLERİ**” başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri :

İmza

Prof. Dr. Ayşegül CAN

.....

Prof. Dr. Kamil KAHVECİ

.....

Prof. Dr. Uğur AKYOL

.....

Prof. Dr. Nezaket PARLAK

.....

Dr. Öğr. Üyesi Deniz TAŞKIN

.....

Tez Savunma Tarihi: 10/06/2024

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Ayşegül CAN
Tez Danışmanı

.....

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. M. Tolga SAKALLI

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDSİLİĞİ ANABİLİM DALI DOKTORA PROGRAMI

DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

10 / 06 / 2024

Damla ÖZGÜR

Doktora Tezi

Paralel Plakalar Arasında MHD Newtonian Olmayan Nanoakışkanın Akışında Akış ve Isı Transferi Karakteristikleri

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada, mikro ölçekli paralel plakalar arasındaki manyetohidrodinamik kayma akışında viskoz yayılım etkileri dahil edilerek, Newtonian olmayan nanoakışkanların akış ve ısı transfer özelliklerini incelenmiştir. Alt plaka sabit ve üst plaka hareketli ve sabit sıcaklıklarda yürütülen araştırma, daimi tam gelişmiş laminer akış koşullarında birinci mertebeye kayma hızı modeli ile hız ve sıcaklık dağılımı ile Nusselt sayısını değerlendirilmiştir. Manyetik alan şiddeti (M), kayma hızı (β_v), Brinkman sayısı (Br), nanopartikül hacim fraksiyonu (ϕ) ve akışkanın davranış indeksi (n) gibi parametrelerin akışkanın hız ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerini ve bu parametrelerin Nusselt sayısına nasıl etki ettiğini ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Sonuçlar manyetik alan şiddeti ve nanopartikül hacim fraksiyonunun artmasının akışkanın ısı transfer oranını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Brinkman sayısı, β_v ve n gibi parametreler için Nusselt sayısı, hız ve sıcaklık karmaşık davranışı gösterilmiştir. Bu sonuçlar, Newtonian olmayan nanoakışkanların termal performansının anlaşılması ve ısı transferi ile akış dinamikleri konusundaki bilgi birikimine önemli katkılarda bulunmaktadır.

Yıl : 2024

Sayfa Sayısı : 82

Anahtar Kelimeler : Newtonian olmayan akışkanlar, Nanoakışkanlar, Mikro plakalar, MHD, Viskoz yayılım

PhD Thesis

Flow and Heat Transfer Characteristics in the Flow of MHD Non-Newtonian Nanofluid
Between Parallel Plates

Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

This study investigates the flow and heat transfer characteristics of non-Newtonian nanofluids in a magnetohydrodynamic slip flow between microscale parallel plates, incorporating the effects of viscous dissipation. The analysis is conducted with a stationary lower plate and a moving upper plate at constant temperatures, under steady-state fully developed laminar flow conditions, using a first-order slip velocity model to evaluate velocity and temperature distribution as well as the Nusselt number. Parameters such as magnetic field strength (M), slip velocity (β_v), Brinkman number (Br), nanoparticle volume fraction (ϕ), and the fluid behavior index (n) are examined in detail to understand their effects on the fluid's velocity and temperature distribution and their impact on the Nusselt number. The results indicate that increasing magnetic field strength and nanoparticle volume fraction significantly enhance the fluid's heat transfer rate. The Nusselt number, velocity, and temperature exhibit complex behavior for parameters such as Brinkman number, β_v , and n . These findings contribute substantially to the understanding of the thermal performance of non-Newtonian nanofluids and provide valuable insights into heat transfer and flow dynamics.

Year : 2024

Number of Pages : 82

Keywords : Non-Newtonian fluids, Nanofluids, Microscale parallel plates, MHD, Viscous dissipation.

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlarken bana rehberlik eden ve değerli bilgileriyle yol gösteren tez danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Ayşegül CAN'a derin minnettarlığımı sunarım. Onun bilgisi, sabrı ve ilham veren desteği, bu çalışmanın her aşamasında benim için paha biçilemezdi. Akademik ve kişisel gelişimimde oynadığı rol, bu tezin çok ötesinde bir değere sahiptir.

Bu tezin şekillenmesinde önemli bir role sahip olan, değerli katkıları ve sürekli desteği için değerli hocam Doç.Dr. Önder TÜRK'E içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Annem ve babama, hayatımın her aşamasında bana verdikleri destek ve ilham için teşekkür ederim. Onların sevgisi ve güveni, bu çalışmanın her satırında hissedilmektedir. Eşim Nuri Özgür'e, bu zorlu sürecin her adımında bana gösterdiği anlayış, sevgi ve destek için sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Kızlarım Eda ve Nisa, sizin varlığınız her gün bana mutluluk ve güç veriyor. Bu çalışma, sizin için ve sizinle birlikte yapılmıştır.

Haziran-2024

Damla ÖZGÜR

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. Newtonian Olmayan Akışkanlar	2
1.1.1. Power-Law Modeli.....	4
1.1.2. Bingham Plastik Modeli.....	6
1.1.3. Herschel-Bulkley Modeli	7
1.1.4. Casson Modeli.....	8
1.1.5. Carreau Modeli.....	8
1.1.6. Jeffreys Modeli.....	9
1.2. Nanoakışkanlar.....	10
1.2.1. Nanoakışkanların Elde Edilişi.....	10
1.2.2. Termal İletkenlik Modelleri	11
1.2.2.1. Maxwell İletkenlik Modeli.....	12
1.2.2.2. Hamilton-Crosser İletkenlik Modeli	12

1.2.2.3. Bruggeman İletkenlik Modelli	13
1.2.2.4. Yu ve Choi İletkenlik Modelli	14
1.2.3. Viskozite Modelleri.....	15
1.2.3.1. Einstein Viskozite Modeli Modelli	15
1.2.3.2. Brinkman Viskozite Modelli.....	16
1.2.3.3. Batchelor Viskozite Modelli	16
1.2.4. Nanoakışkanların Efektif Yoğunluğu	16
1.3. Manyetohidrodinamik (MHD).....	17
1.4. Mikrokanallar	19
1.4.1. Mikrokanallarda Akış Rejimleri	19
1.4.2. Mikrokanallarda Kayma Sınır Koşulları	20
1.4.2.1. Lineer Navier Kayma Yasası	20
1.4.2.2. Lineer Olmayan Navier Kayma Yasası	21
1.5. Tezin Kapsamı ve Amacı	22
BÖLÜM 2 LİTARATÜR ÇALIŞMASI	23
BÖLÜM 3 ANALİZ	31
3.1. Hız Dağılımı.....	33
3.2. Kayma Akış Rejiminde Birinci Mertebe Kayma Hızı Sınır Şartı.....	35
3.3. Sıcaklık Dağılımı	36
3.4. Sınır Şartları	38
3.5. Ortalama Sıcaklık ve Nusselt Sayısı	39
3.6. Sayısal Yöntem ve Metot	40
BÖLÜM 4 SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	42
4.1. Değerlendirme.....	62
4.2. Öneriler	62

KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	69



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Newtonian olmayan akışkanlar için kayma gerilmesi ile deformasyon hızı arasındaki ilişki.....	3
Şekil 1.2. Kayma hızı ve kayma uzunluğu.....	20
Şekil 3.1. MHD mikro paralel plakalar arasından akışta geometri ve koordinat sistemi.....	31
Şekil 4.1. Mevcut çalışmanın literatürdeki çalışma ile kıyaslanması.....	43
Şekil 4.2. Hız profili ve manyetik alan parametresinin, ϕ nanopartikül hacim fraksiyonu ile değişimi $n=0.76$	44
Şekil 4.3. β_v kayma hızı katsayısının hız profiline etkisi $M=1$, $\phi=0.03$	45
Şekil 4.4. Hız ve Manyetik alan parametresinin n akış davranışı indeksi ile değişimi $\beta_v=0.1$, $\phi=0.05$	46
Şekil 4.5. $n=0.76$, $\phi=0.05$, $\beta_v=0.1$, Manyetik alan parametresinin hız profili değişimi.....	46
Şekil 4.6. Hızın β_v ve M ile değişimi, $n=0.91$, $\phi=0.0$	46
Şekil 4.7. Hız profilinin n ve β_v ile değişimi $M=\phi=0$	48
Şekil 4.8. Sıcaklık profilinin Br ve ϕ değişimi $n=0.91$, $M=1$, $\beta_v=0.1$	50
Şekil 4.9. Sıcaklık profilinin n ile değişimi $M=Br=\beta_v=\phi=0.00$	51
Şekil 4.10. Sıcaklık profilinin M ile değişimi.....	52
Şekil 4.11. Sıcaklık profilinin β_v kayma hızı katsayısı ile değişimi, $n=0.91$, $\phi=0.03$, $Br=M=1$	53

Şekil 4.12. Sıcaklık profilinin Br , ϕ ve β_v kayma katsayısı ile değişimi $n=0.91$, $M=0$	54
Şekil 4.13. Sıcaklık profilinin Br , ϕ ve β_v kayma katsayısı ile değişimi $n=0.80$, $M=0$	54
Şekil 4.14. Sıcaklık profilinin Br , ϕ ve β_v kayma katsayısı ile değişimi $n=0.76$, $M=0$	55
Şekil 4.15. Nusselt sayısının β_v , Br ve ϕ ile değişimi $n=0.76$, $M=0$	56
Şekil 4.16. Nusselt sayısının β_v , Br ve ϕ ile değişimi $n=0.80$, $M=0$	56
Şekil 4.17. Nusselt sayısının β_v , Br ve ϕ ile değişimi $n=0.90$, $M=0$	57
Şekil 4.18. Nusselt sayısının, n , β_v ve ϕ ile değişimi $Br=0.1$ $M=0$	58
Şekil 4.19. Nusselt sayısının ϕ ve M ile değişimi $Br=0.1$, $\beta_v=0.0$	59
Şekil 4.20. Nusselt sayısının, β_v ve M ile değişimi $Br=0.1$, $\phi=0.0$	59
Şekil 4.21. Nusselt sayısının, β_v ve M ile değişimi $Br=0.1$, $\phi=0.03$	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

τ	Kayma Gerilmesi
$\dot{\gamma}$	Deformasyon Hızı
k	Akış Konsantrasyon İndeksi ya da Konsistensi
n	Akışkanın Akış Davranış İndeksi/ Power-Law Davranış İndeksi
τ_y	Akma Gerilimi
μ	Viskozite
K	Casson Viskozitesi Katsayısı
η_0	Sıfır Deformasyon Hızı Viskozitesi
λ	Zaman Sabiti
k_{nf}	Nanoakışkanın Isı İletim Katsayısı
k_f	Baz Akışkanın Isı İletim Katsayısı
k_p	Nanopartiküllerin Isı İletim Katsayısı
ϕ	Nanopartikül hacim fraksiyonu
β	Nanotabaka Kalınlığının Orijinal Parçacık Çapına Oranı
η_{nf}	Nanoakışkanın Viskozitesi
η_f	Baz Akışkanın Viskozitesi
ρ_{nf}	Nanoakışkanın Yoğunluğu
ρ_f	Baz Akışkanın Yoğunluğu
ρ_p	Nanopartiküllerin Yoğunluğu
$\sigma(t)$	Zamana Bağlı Stres
$\gamma(t)$	Zamana Bağlı Deformasyon Hızı
λ_1	Akışkanın Stres Altında Deformasyona Uğradığı Süre
λ_2	Retardasyon Süresi
u_s	Yüzeye Yakın Akışkan Hızı
L_s	Kayma Uzunluğu
u_0	Üst Plaka Hızı

β_v	Kayma Hızı Katsayısı
\vec{V}	Hız Vektörü
\vec{B}	Manyetik Alan Vektörü
p	Statik Basınç
C_p	Akışkanın Sabit Basıncıta Özgül Isısı
T	Akışkan Sıcaklığı
\vec{g}	Yerçekimi
\vec{j}	Elektrik Akım Yoğunluğu
σ	Akışkanın Elektrik İletkenliği
\vec{E}	Elektrik Alan Şiddeti
Kn	Knudsen Sayısı
u	x-Yönündeki Hız Bileşeni
U	Boyutsuz Hız
v	y- Yönündeki Hız Bileşeni
Re	Reynolds Sayısı
Re_m	Manyetik Reynolds Sayısı
M	Manyetik Alan Parametresi
Ha	Hartman Sayısı
Nu	Nusselt Sayısı
T_w	Plaka Sıcaklığı
T_c	Merkez Sıcaklığı
T_m	Ortalama Akışkan Sıcaklığı
θ	Boyutsuz Sıcaklık
h	Isı Taşınım Katsayısı
Br	Brinkman Sayısı
CHF	Sabit Isı Akısı
CWT	Sabit Duvar Sıcaklığı
EVA	Etilen-Vinil Asetat
MHD	Manyetohidrodinamik

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Mikroelektronik sistemler, 20. yüzyılın ikinci yarısında, özellikle transistörlerin ve entegre devrelerin icadı ile başlayan elektronik devrimin bir parçasıdır. Mikroelektromekanik sistemler (MEMS), mikro ölçekte mekanik cihazları ve elektronik bileşenleri bir araya getiren minyatürleştirilmiş sistemlerdir. Bu sistemler, genellikle silikon tabanlı yarı iletken üretim teknolojileri kullanılarak üretilir ve geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

MEMS cihazları, mikro boyutta mekanik hareketler ve elektronik sinyal işleme yeteneklerini birleştirir. Bu cihazlar, genellikle mikron ölçeğinde hareketli parçalara sahiptir. Bu hareketli parçalar, çevresel değişikliklere (basınç, sıcaklık, ışık, vb.) tepki olarak hareket edebilir veya elektronik sinyalleri mekanik harekete dönüştürebilir. MEMS cihazları genellikle, yarı iletken endüstrisinden alınan fotolitografi ve mikro imalat teknikleri kullanılarak üretilir. MEMS teknolojisinin avantajları arasında düşük maliyet, düşük enerji tüketimi, yüksek performans, küçük boyut ve ağırlık bulunur. Ancak, MEMS cihazlarının tasarımı ve üretimi karmaşık ve zordur.

Modern bilgisayarların, tabletlerin ve akıllı telefonların gelişiminde, uydu, radyo, ağ ekipmanları, mobil iletişim teknolojileri, gelişmiş sürücü destek sistemleri, elektrikli araçlar, giyilebilir sağlık izleme cihazları, tıbbi görüntüleme sistemleri, robotik cerrahi, sensörler, aktüatörler, kontrol üniteleri, uzay araçları, teleskoplar, uydu sistemleri ve savunma teknolojileri gibi mikroelektromekanik bileşenler kullanılmaktadır.

Mikrokanallar ve Newtonian olmayan akışkanların birlikte kullanılması, birçok farklı alanda önemli uygulamalara yol açmıştır. Bu kombinasyon, küçük ölçekli hassas

işlemler için güçlü bir araçtır ve gelecekte daha fazla araştırma ve geliştirme fırsatları sunmaktadır.

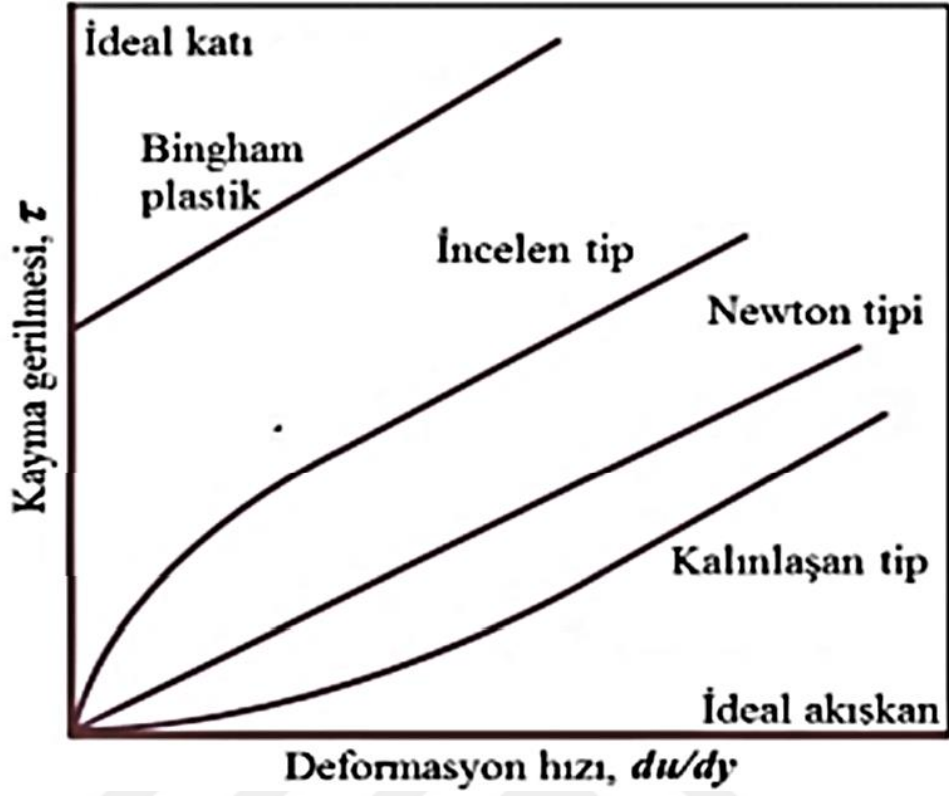
1.1.Newtonian Olmayan Akışkanlar

Newtonian olmayan akışkanlar, Isaac Newton'un akışkanların davranışı üzerine yaptığı çalışmaların dışında kalan, daha karmaşık ve çeşitli davranışları sergileyen akışkanlardır. Isaac Newton'un 1687'de yayımlanan "Principia Mathematica" adlı eserinde tanımladığı akışkanlar, kayma gerilimi ile oluşan deformasyon hızı arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu, yani sabit bir viskoziteye sahip olan akışkanlardır. Bu tür akışkanlara "Newtonian akışkanlar" adı verilir.

Newton'un çalışmalarından sonra, Newtonian olmayan akışkanların keşfi ve incelenmesi 19. ve 20. yüzyıllarda gerçekleşmiştir. Bu dönemde, bilim insanları ve mühendisler, polimerler, süspansiyonlar, jeller ve diğer karmaşık akışkanların incelenmesiyle Newtonian olmayan davranışlarını keşfettiler ve tanımladılar. 20. yüzyılın ortalarında, polimer bilimi ve reoloji alanındaki gelişmeler, Newtonian olmayan akışkanlar üzerine yapılan araştırmalarda büyük ilerlemelere yol açmıştır.

Eugene Bingham, Markus Reiner, Ronald Rivlin ve John D. Ferry gibi bilim insanları önemli katkılarda bulunmuşlardır. Araştırmacılar, akışkanların viskoelastik özellikleri hakkında temel teorileri ve modelleri geliştirmişlerdir. Bu çalışmalar, Newtonian olmayan akışkanların daha iyi anlaşılmasına ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Şekil 1.1'de, farklı akışkan türleri için kayma gerilmesi (τ) ile deformasyon hızı (du/dy) arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu grafik, Çengel ve Cimbala (2006) tarafından sunulmuştur. Grafik, ideal katı, Bingham plastik, incelen tip, Newton tipi, kalınlaşan tip ve ideal akışkan gibi farklı akışkan davranışlarını temsil eden eğrileri içermektedir.



Şekil 1.1. Akışkanlar için kayma gerilmesi ile deformasyon hızı arasındaki ilişki
(Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., 2006)

Mikrokanallar, akışkanların mikro ölçekte hassas bir şekilde kontrol edilebildiği bir platform sağlamaktadır. Bu tür sistemlerde Newtonian olmayan akışkanların kullanılması, viskozite değişikliklerinin hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi anlamına gelmektedir.

Newtonian olmayan akışkanlar, mikrokanallar içinde karışımı hızlandırmak ve kimyasal reaksiyonların verimliliğini artırmak için kullanılabilir. Akışkanın viskozitesinin kontrol edilebilmesi, karışımın homojenliğini artırabilir ve böylece reaksiyonların daha verimli olmasına katkıda bulunabilir.

Biyomedikal uygulamalarda, mikrokanallar ve Newtonian olmayan akışkanlar, biyomedikal cihazların tasarımında ve biyolojik numune işleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu sistemler, özellikle kan veya diğer biyolojik akışkanların mikroskobik ölçekte manipüle edilmesi ve analiz edilmesi için kullanılmaktadır.

İlaç endüstrisinde mikrokanalların kullanımı, ilaçların formülasyonu ve dağıtım süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Mikrokanalların sağladığı hassas kontrol mekanizması, ilaç bileşenlerinin dikkatli bir şekilde karıştırılmasını ve istenilen özelliklere sahip ilaç formülasyonlarının geliştirilmesini sağlamaktadır. Newtonian olmayan akışkanların bu sistemlerde kullanılması, ilaçların viskozitesini ve akış karakteristiklerini özelleştirmek için etkili bir yöntem sağlamaktadır. Böylece, ilaçların etkinliğini ve kararlılığını artırmak, yan etkileri azaltmak ve hedeflenen tedavi alanlarına daha doğru bir şekilde ulaştırmak mümkün olmaktadır.

Sıcaklık kontrolü uygulamalarında, Newtonian olmayan akışkanlar mikrokanallar içinde sıcaklık kontrolü için kullanılabilir. Akışkanın viskozitesi sıcaklıkla değişebilir, bu da ısı transferi uygulamalarında kullanılmaktadır.

Optofluidik uygulamalarda, Newtonian olmayan akışkanların mikrokanallar içinde kullanılması, optik ve mikroakustik cihazlar gibi optofluidik uygulamalarda önemlidir. Akışkanın optik özellikleri üzerindeki etkisi göz önüne alınarak optik cihazların tasarımında kullanılabilir.

Mikrokanallar ve Newtonian olmayan akışkanların birlikte kullanılması, birçok farklı alanda önemli uygulamalara yol açmıştır. Bu kombinasyon, küçük ölçekli hassas işlemler için güçlü bir araçtır ve gelecekte daha fazla araştırma ve geliştirme fırsatları sunmaktadır.

Newtonian olmayan akışkanlarda kayma gerilmesi ile deformasyon hızı arasındaki ilişkinin doğrusal olmaması nedeniyle Newtonian olmayan akışkanların davranışını modellemek için birçok farklı yaklaşım ve model geliştirilmiştir. Bu modeller, Newtonian olmayan akışkanın viskozite davranışını, deformasyon hızını ve diğer değişkenlerin etkilerini tanımlamak için kullanılmaktadır. Bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan Newtonian olmayan akışkan modelleri ve yaklaşımları aşağıda yer almaktadır.

1.1.1. Power-Law Modeli

Power-Law modeli, ya da Ostwald-de Waele modeli, 20. yüzyılın başlarında geliştirilmiştir. Bu model, özellikle Wilhelm Ostwald ve Paul Oswald Heinrich de Waele tarafından araştırılmıştır. Wilhelm Ostwald, özellikle kolloid kimyası ve fiziksel kimya

alanlarında önemli katkılarda bulunmuş bir bilim insanıydı ve akışkanların reolojik özellikleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Paul Oswald Heinrich de Waele ise, bu modelin gelişiminde önemli rol oynamıştır. Bu model, özellikle kesme incelmeye (shear-thinning) veya kesme kalınlaşması (shear-thickening) gösteren akışkanlar için uygundur. Power-Law modeli, akışkanın kayma gerilmesiyle deformasyon hızı arasındaki ilişkiyi bir kuvvet yasası ile ifade eder.

Power-Law modeli, aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (1.1)$$

τ kayma gerilmesi, bir akışkanın veya malzemenin belirli bir bölgesindeki katmanlarının birbirlerine göre kaymasını direnen içsel kuvvettir. Fiziksel olarak, iki yakın yüzey arasındaki bir akışkanın farklı katmanları arasındaki sürtünme kuvvetini ifade eder. Kayma gerilmesi, yüzey alanına düşen kuvvetin oranı olarak tanımlanır ve genellikle pascal (Pa) cinsinden ölçülür.

$\dot{\gamma}$ deformasyon hızı, akışkan katmanlarının birbirine paralel olarak ne kadar hızlı hareket ettiğini gösterir. Yüksek deformasyon hızları, katmanlar arasında büyük hız farkları olduğunu gösterir. Deformasyon hızı, akışkanın viskozite özelliklerini anlamak için de önemlidir. Newtonian akışkanlarda, deformasyon hızı arttıkça, kayma gerilmesi de orantılı olarak artar. Newtonian olmayan akışkanlarda ise, deformasyon hızının artmasıyla akışkanın viskozitesi değişmektedir.

k , akış konsantrasyon indeksi ya da konsistensi, reolojide Newtonian olmayan akışkanların reolojik davranışını tanımlamak için kullanılan bir parametredir. Konsistensi, bir akışkanın direncini veya "yoğunluğunu" temsil eder ve kayma gerilmesi ile hız gradyanı arasındaki ilişkinin matematiksel ifadesinde yer alır. Fiziksel olarak, k değeri, bir akışkanın ne kadar dirençli veya "kalın" olduğunu gösterir. k değeri büyükse, bu, akışkanın daha yüksek bir başlangıç viskozitesine sahip olduğunu belirtir. Newtonian akışkanlar için, k sabit bir viskozite değeri ile eşdeğerdir. Kısacası, konsistensi ya da akış konsantrasyon indeksi, bir akışkanın içsel viskoz direncini temsil eden bir parametredir ve Newtonian olmayan akışkanların reolojik davranışını tanımlamak için kullanılır.

n akışkanın akış davranış indeksidir.

$n < 1$ ise, akışkanın daha yüksek deformasyon hızlarında daha az viskoz hale geldiği durumu tanımlar. Bu tür akışkanlara pseudoplastik akışkanlar denir. Pseudoplastik davranışın moleküler temeli, akışkanın iç yapısının ve moleküler düzeydeki etkileşimlerinin anlaşılmasıyla açıklanabilir. Örneğin, polimer çözeltilerinde, düşük deformasyon hızlarında polimer zincirleri karışık bir yapıda bulunur. Deformasyon hızı arttığında, bu zincirler akış yönünde hizalanmaya başlar ve bu da iç sürtünmeyi azaltarak viskozitenin düşmesine neden olur.

$n = 1$ ise, akışkan Newtonian davranış gösterir; yani viskozitesi deformasyon hızından bağımsızdır.

$n > 1$ ise, akışkanın daha yüksek deformasyon hızlarında daha viskoz hale geldiği durumu tanımlar. Bu davranış bazı süspansiyonlarda ve kolloidal karışımlarda görülür. Bu tarz akışkanlara dilatant akışkanlar denir. Dilatant akışkanlar, Newtonian olmayan akışkanlar sınıfına ait özel bir türdür. Bu akışkanlar, uygulanan deformasyon hızının artmasıyla birlikte viskoziteleri artan akışkanlardır. Bu davranış, özellikle yüksek partikül konsantrasyonuna sahip süspansiyonlarda gözlemlenir ve akışkanın iç yapısındaki partikül etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır. Dilatant akışkanların bu özelliği, bu tür akışkanların mikroskobik yapısıyla ilgilidir.

Tipik olarak, bu akışkanlar yüksek konsantrasyonda katı partikülleri içeren süspansiyonlardır. Düşük deformasyon hızlarında, bu partiküller arasında yeterli boşluk bulunmakta ve akışkan kolayca akmaktadır. Ancak, deformasyon hızı arttıkça, partiküller birbirlerine daha yakın hareket etmekte ve aralarındaki hidrodinamik etkileşimler artmaktadır. Bu durum, akışkanın iç sürtünmesini ve dolayısıyla viskozitesini artırmaktadır.

1.1.2 Bingham Plastik Modeli

Bingham (1919) plastik modeli, Eugene Cook Bingham'ın adını taşır. Bingham, 20. yüzyılın başlarında bu modeli geliştirmiştir. Model, özellikle endüstriyel ve malzeme bilimlerinde, çeşitli malzemelerin akış davranışlarını tanımlamak için kullanılmıştır. Bingham, akışkanların reolojisi konusunda öncü bir çalışma yürütmüş ve bu model, özellikle endüstriyel süreçlerde kullanılan çeşitli malzemeleri karakterize etmek için hala kullanılmaktadır. Bingham plastik modeli, akışkanın belirli bir kayma gerilimi eşiği, yani

bir akma gerilimi τ_y aşıldığında akış gösteren, ancak bu eşiğin altında katı gibi davranan bir Newtonian olmayan akışkan modelidir. Bu tür akışkanlar, akış başlamadan önce belirli bir deformasyon kuvveti gerektirir; bu eşik değeri aşıldığında ise, akışkan lineer bir viskozite davranışı gösterir.

Matematiksel olarak, Bingham plastik modeli şu şekilde ifade edilir:

$$\tau = \tau_y + \mu\dot{\gamma} \quad (1.2)$$

Bu denklemde;

τ kayma gerilmesi

τ_y akma gerilmesi (yield stress) olup, akışkanın akış göstermeye başlaması için aşması gereken kayma gerilmesi eşiğidir.

μ viskozite, akışkanın akış başladıktan sonraki Newtonian davranışını tanımlar.

$\dot{\gamma}$ deformasyon hızıdır.

Bu modelde, τ_y değeri sıfırdan büyük olduğunda, akışkanın akış göstermesi için bu eşiği aşması gerekmektedir. Eğer uygulanan kayma gerilmesi τ_y değerinden küçükse, akışkan akış göstermez ve katı gibi davranır. $\tau > \tau_y$ ise, akışkan lineer bir viskozite ile akar.

1.1.3. Herschel-Bulkley Modeli

Herschel-Bulkley (1926) modeli, Wallace H. Herschel ve Ronald Bulkley tarafından 1926 yılında tanıtıldı. Herschel-Bulkley modeli, Bingham plastik modelini genelleştiren bir Newtonian olmayan akışkan modelidir. Bu model, akışkanların hem bir verim gerilimi (yield stress) hem de deformasyon hızının bir fonksiyonu olarak değişen viskoziteyi içerir. Bu model, özellikle kayma inceltme (shear thinning) veya kayma kalınlaşma (shear thickening) özellikleri gösteren akışkanlar için kullanışlıdır.

Herschel-Bulkley modeli matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \quad (1.3)$$

τ kayma gerilimidir.

τ_y akma gerilmesi ve akışkanın akış göstermeye başlaması için aşması gereken kayma gerilimi eşiğidir.

k konsistans indeksidir ve akışkanın viskozitesini temsil eder.

$\dot{\gamma}$ deformasyon hızıdır.

n akış davranışı indeksidir ve akışkanın kayma inceltme veya kayma kalınlaşma davranışını belirler.

Herschel-Bulkley modelinde, $n < 1$ ise akışkan pseudoplastik (kayma inceltme) davranış gösterir; $n = 1$ ise Bingham plastik modeline dönüşür; $n > 1$ ise dilatant (kayma kalınlaşma) davranışı gösterir.

1.1.4. Casson Modeli

Casson modeli, 1959 yılında Nigel B. Casson tarafından geliştirilmiştir. Casson, bu akışkanların akma gerilmesi ve viskozitelerinin deformasyon hızına bağlı olarak nasıl değiştiğini tanımlamak için bu modeli geliştirmiştir. Casson modeli, özellikle düşük deformasyon hızlarında akışkanın davranışını tanımlamada etkilidir ve akışkanların inceltmesi ve kalınlaşması gibi özellikleri dikkate alır.

Casson modeli aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$\tau^{1/2} = \tau_y^{1/2} + K\dot{\gamma}^{1/2} \quad (1.4)$$

τ kayma gerilimidir.

τ_y akma gerilmesidir ve akışkanın akış göstermeye başlaması için aşması gereken kayma gerilimi eşiğidir.

K Casson viskozitesi katsayısıdır.

$\dot{\gamma}$ deformasyon hızıdır.

Bu model, akışkanın karekök kayma gerilimi ile karekök deformasyon hızı arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu, özellikle düşük deformasyon hızlarında akışkanın viskozitesini ve akış davranışını anlamak için kullanışlıdır.

1.1.5. Carreau Modeli

Carreau modeli, genellikle polimer eriyikleri ve bazı biyolojik akışkanlar gibi zaman bağımlı viskoelastik özelliklere sahip Newtonian olmayan akışkanların reolojik davranışını tanımlamak için kullanılan bir matematiksel modeldir. Bu model, akışkanın viskozitesinin deformasyon hızına bağlı olarak değiştiğini ve hem düşük hem de yüksek deformasyon hızlarında Newtonian davranışa yaklaştığını varsayar.

Carreau modeli, akışkanın viskozitesinin deformasyon hızına bağlı olarak nasıl değiştiğini aşağıdaki denklemle tanımlar:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 + [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (1.5)$$

Bu denklemde:

$\eta(\dot{\gamma})$ deformasyon hızındaki viskozitedir.

η_0 sıfır deformasyon hızı viskozitesidir.

λ bir zaman sabitidir.

n akışkanın viskozite davranışını tanımlayan bir indekstir. $n < 1$ ise akışkan psödoplastik davranış gösterirken, $n > 1$ ise dilatant davranışı gösterir.

Bu modeller, farklı türdeki Newtonian olmayan akışkanların davranışını modellemek için kullanılır. Akışkanın özelliklerine ve uygulamanın gereksinimlerine göre doğru modelin seçilmesi önemlidir.

1.1.6. Jeffreys Modeli

Jeffreys modeli, viskoelastik özelliklere sahip Newtonian olmayan akışkanların davranışını anlamak ve modellemek için kullanılan bir matematiksel modeldir. Bu model, özellikle hem viskoz (akışkan benzeri) hem de elastik (katı benzeri) özelliklere sahip karmaşık akışkanların dinamiklerini tanımlamada kullanılmaktadır. Jeffreys modeli, akışkanın stres ve deformasyon hızı arasındaki ilişkiyi lineer bir viskoelastik çerçevede tanımlar. Model, Maxwell modelinin temel yapısını alır ve ona ek olarak bir retardasyon süresi ekler. Bu ek süre, malzemenin elastik özelliklerini ve stresin kaldırılmasından sonra malzemenin orijinal haline dönme süresini temsil etmektedir.

Jeffreys modeli, genellikle aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\sigma(t) + \lambda_1 \frac{d\sigma(t)}{dt} = \eta \left(\gamma(t) + \lambda_2 \frac{d\gamma(t)}{dt} \right) \quad (1.6)$$

$\sigma(t)$ zamana bağılı strestir.

$\gamma(t)$ zamana bağılı deformasyon hızıdır.

η viskozite katsayısıdır.

λ_1 rahatlama süresidir, akışkanın stres altında ne kadar süreyle deformasyona uğradığını gösterir.

λ_2 retardasyon süresidir, akışkanın stresin kaldırılmasından sonra orijinal haline dönme süresini temsil eder.

1.2. Nanoakışkanlar

Nanoakışkanların ilk kez incelenmesi ve tanımlanması, 1990'ların sonunda, Choi ve Eastman tarafından Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Choi (1995), "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles" başlıklı bir makalede, nanopartiküllerin akışkanların termal iletkenliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu çalışmıştır. Bu yeni malzeme sınıfı, mühendislik ve bilimsel araştırmaların çeşitli alanlarında büyük ilgi görmüştür. Nanoakışkanlar, temelde baz akışkanların (su, yağ, etilen glikol gibi) içerisine nano ölçekte partiküllerin (genellikle metaller, metal oksitler veya karbon nanotüpleri gibi) dağıtılmasıyla elde edilen akışkanlardır. 2000'li yılların başından itibaren, nanoakışkanların uygulama alanları genişlemeye başladı. Bu akışkanlar, özellikle elektronik soğutma, motor yağlama, ısı değiştiricileri ve güneş enerjisi sistemleri gibi alanlarda dikkat çekmiştir. Nanoakışkanların enerji verimliliğini artırma potansiyeli, sürdürülebilir enerji teknolojilerinin gelişimine katkıda bulunmuştur.

1.2.1 Nanoakışkanların Elde Edilişi

Nano akışkanlar, tipik olarak 1 ila 100 nanometre (nm) boyut aralığındaki partiküllerin bir baz akışkan içerisine homojen olarak dağıtılmasıyla oluşturulur. Bu nanopartiküller, genellikle metaller, metal oksitler, karbon nanotüpler veya diğer nano ölçekli yapılandırılmış malzemelerden seçilir. Nano akışkanların üretimi, iki ana yöntem kullanılarak yapılmaktadır.

İki Aşamalı Yöntem: Bu yöntemde, öncelikle nanopartiküller ayrı olarak üretilir ve daha sonra fiziksel karıştırma yöntemiyle baz akışkana eklenir. Bu yöntem, nanopartiküllerin aglomerasyonunu önlemek için uygun dispersiyon teknikleri ve yüzey aktif maddelerin kullanılmasını gerektirir.

Tek Aşamalı Yöntem: Tek aşamalı yöntemde, nanopartiküller doğrudan baz akışkan içinde oluşturulur. Bu yöntem, nanopartikül oluşumu ve stabilizasyonunu aynı anda gerçekleştirir ve genellikle daha homojen bir dağılım sağlar.

Nanoakışkan teknolojisi, ısı iletkenlik gibi termofiziksel özelliklerin iyileştirilmesi yoluyla ısı transferi uygulamalarının verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda Kleinstreuer ve Feng (2011) tarafından da belirtildiği üzere, ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi, özellikle ısıtma ve soğutma sistemlerinde önemli bir avantaj sunar.

Nanoakışkanların ısı transferi performansındaki iyileşmeler, nanopartiküllerin eklenmesiyle gerçekleşir ve bu iyileşmelerin temel sebepleri Xuan ve Li (2000) tarafından şu şekilde sıralanmıştır:

- Nano boyutundaki parçacıkların eklenmesi, etkin ısı transferi alanını genişletir ve bu da akışkanın ısı taşıma kapasitesini artırır.
- Nanopartiküllerin kendine özgü yüksek ısı iletkenlik değerleri, akışkanın genel ısı iletkenlik özelliğini iyileştirir.
- Nanopartiküller ve akışkan molekülleri arasındaki etkileşimlerin artması, ısı transferinin verimliliğini artırır.
- Akışkan içerisindeki nanopartiküllerin hareketi, türbülansın ve karışımın artmasına yol açar, bu da homojen bir sıcaklık dağılımı sağlar.
- Nanopartiküllerin eşit ve homojen bir şekilde dağılması, akışkan içindeki ve yüzey ile akışkan arasındaki sıcaklık farkını azaltır, bu da ısı transferi etkinliğini artırır.

Nano akışkanlar için kullanılan modeller, bu akışkanların termofiziksel ve reolojik özelliklerini anlamak ve tahmin etmek için tasarlanmıştır. Nanoakışkanların karmaşık doğası, gelişmiş modellerin ve simülasyonların kullanımını gerektirir. İşte nanoakışkanlar için kullanılan bazı temel modeller:

1.2.2. Termal İletkenlik Modelleri

Nanoakışkanların termal iletkenliği, nanoteknoloji ve akışkan mekaniği alanlarında yoğun bir şekilde incelenmiş ve çeşitli matematiksel modellerle ifade edilmiştir. Nanoakışkanların termal iletkenliklerini modellemek için kullanılan modeller, genellikle nanopartiküllerin termal özellikleri ve bu partiküllerin baz akışkanla etkileşimlerine dayanır. İşte bu konuda kullanılan bazı önemli modeller:

1.2.2.1 Maxwell İletkenlik Modeli:

Maxwell (1954) modeli, James Clerk Maxwell tarafından 19. yüzyılda geliştirilmiş bir matematiksel modeldir. Maxwell, başta elektromanyetizma olmak üzere, fizik alanında birçok temel katkıda bulunmuştur. Bu model, küçük, düzgün şekilli ve düşük konsantrasyonlu partiküller için geçerlidir. Maxwell, süspansiyonun etkin termal iletkenliğini hesaplamak için homojen bir dağılım varsayar.

Model, partiküller ve baz akışkan arasındaki termal iletkenlik farkını dikkate alır ve etkin termal iletkenliği şu denklemle hesaplar:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - 2(k_p - k_f)\phi} \quad (1.7)$$

Bu denklemde:

k_{nf} nanoakışkanın ısı iletim katsayısı

k_f baz akışkanın ısı iletim katsayısı

k_p nanopartiküllerin ısı iletim katsayısı

ϕ ise nanopartikül hacim fraksiyonu

Maxwell modeli, partiküllerin akışkan içinde homojen bir şekilde dağıldığını ve aralarında etkileşim olmadığını varsayar. Bu model, özellikle nanoteknoloji ve nanoakışkanlar alanında, nanopartiküllerin termal iletkenlik üzerindeki etkisini anlamak için kullanılır.

1.2.2.2. Hamilton-Crosser İletkenlik Modeli:

Hamilton-Crosser (1962) modeli, Robert Hamilton ve Oscar Crosser tarafından 1962 yılında geliştirilmiştir. Bu model, özellikle heterojen karışımlar ve süspansiyonlar için tasarlanmıştır. Hamilton ve Crosser, Maxwell'in orijinal teorisini modifiye ederek, partikül şeklinin süspansiyonun etkin termal iletkenliğine etkisini dikkate almışlardır. Bu model, karmaşık şekilli partiküller içeren süspansiyonların termal iletkenliklerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesine olanak tanımıştır.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + (3\lambda - 3)k_f + (\lambda - 1)(k_p - k_f)\phi}{k_p + (3\lambda - 3)k_f - (\lambda - 1)(k_p - k_f)\phi} \quad (1.8)$$

Bu denklemde:

k_{nf} nanoakışkanın ısı iletim katsayısı

k_f baz akışkanın ısı iletim katsayısı

k_p nanopartiküllerin ısı iletim katsayısı

ϕ nanopartikül hacim fraksiyonu

λ partikül şekil faktörüdür.

Bu model, nanopartiküllerin baz akışkana göre farklı şekillerinin (örneğin, küresel olmayan partiküller) etkisini dikkate alarak, etkin termal iletkenliği hesaplar. Bu, özellikle karmaşık geometrilere sahip partiküllerin etkileşimlerini modellemek için kullanılır.

1.2.2.3. Bruggeman İletkenlik Modeli

Bruggeman (1935) modeli, karmaşık heterojen karışımların ve süspansiyonların etkin termal iletkenliklerini hesaplamak için kullanılan bir modeldir. Özellikle yüksek partikül konsantrasyonlarına sahip sistemler için uygundur ve süspansiyon içindeki partiküller arasındaki etkileşimleri dikkate alır. Bu model, heterojen karışımların ve süspansiyonların reolojik özelliklerini anlamak için kullanılan temel araçlardan biridir.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \left[1 + \frac{3\phi}{2} \left(\frac{k_p}{k_f} - 1 \right) \right]^{1/3} \quad (1.9)$$

Bu denklemde:

k_{nf} nanoakışkanın ısı iletim katsayısı

k_f baz akışkanın ısı iletim katsayısı

k_p nanopartiküllerin ısı iletim katsayısı

ϕ ise nanopartikül hacim fraksiyonudur.

Bu model, partiküllerin baz akışkan içinde rastgele dağıldığını ve birbirleriyle etkileşim içinde olduğunu varsayar. Model, partiküllerin birbirlerine yaklaşması ve daha yüksek konsantrasyonlarda bir arada bulunması durumlarında, partiküller arasındaki termal köprülenme etkisini dikkate alır. Bu, özellikle yüksek partikül konsantrasyonları için önemlidir, çünkü bu durumda partiküller arasındaki etkileşimler etkin termal iletkenliği önemli ölçüde etkileyebilir.

Bruggeman modeli, özellikle karmaşık ve yüksek konsantrasyonlu süspansiyonların termal iletkenliğini anlamak için kullanılır. Model, nanoteknoloji, malzeme bilimi ve mühendislik gibi alanlarda geniş uygulama bulmuştur ve bu tür karışımların termal yönetimi için önemli bir araç olarak kabul edilir. Ancak, modelin doğruluğu, partikül dağılımı, büyüklüğü ve formu gibi faktörlere bağlı olabilir ve bu nedenle her uygulama için dikkatle değerlendirilmesi gerekir.

1.2.2.4. Yu ve Choi İletkenlik Modeli

Yu ve Choi (2003), nanopartiküllerin yüzey özellikleri ve bu partiküllerin baz akışkanla etkileşimlerinin, nanoakışkanların termal iletkenlikleri üzerindeki etkisini de göz önünde bulundurmışlardır. Çalışmada, nanopartiküllerin yüzey alanının ve bu yüzeylerde oluşan ısı transfer mekanizmalarının, nanoakışkanların etkin termal iletkenliğini artırma kapasitesinde kritik rol oynadığı vurgulanmıştır.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_f - 2(k_p - k_f)(1 + \beta)^3 \phi} \quad (1.10)$$

Burada, k_{nf} nanoakışkanın ısı iletim katsayısı, k_f baz akışkanın ısı iletim katsayısı, k_p nanopartiküllerin ısı iletim katsayısı, ϕ ise nanopartikül hacim fraksiyonudur.

Nanotabaka kalınlığının orijinal parçacık çapına oranını ifade eden β parametresi, nanoakışkanların termal iletkenlik özelliklerini anlamada kritik bir rol oynar. Yu ve Choi (2003) tarafından yapılan kapsamlı çalışmada, $\beta=0.1$ değeri için elde edilen sonuçlar, literatürde mevcut olan deneysel verilerle yüksek derecede uyum göstermiştir. Bu alışma, nanopartiküllerin yüzey alanı ve bu yüzeylerde oluşan ısı transfer mekanizmalarının, nanoakışkanların etkin termal iletkenliklerini nasıl etkilediğini ortaya koymuştur. Özellikle, yüzey etkilerinin ve partikül-baz akışkan etkileşimlerinin nanoölçekte önemli olduğu ve bu etkileşimlerin nanoakışkanların genel termal performansını artırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, β değerinin optimize edilmesiyle, nanoakışkanların ısı transfer uygulamalarındaki verimliliğinin önemli ölçüde iyileştirilebileceği vurgulanmıştır.

1.2.3. Viskozite Modelleri

Nanoakışkanlar için kullanılan klasik viskozite modelleri, bu akışkanların reolojik davranışlarını anlamak ve tahmin etmek amacıyla geliştirilmiştir. Nanoakışkanlar, baz akışkanlara nanometre ölçeğinde partiküllerin eklenmesiyle oluşturulduğundan, bu partiküllerin akışkanın viskozitesi üzerinde önemli etkileri olmaktadır. Nanoakışkanların viskozite davranışlarını modellemek için kullanılan bazı klasik modeller:

1.2.3.1 Einstein Viskozite Modeli

Einstein (1906) modeli, Albert Einstein tarafından 1906'da geliştirilen bir teoridir. Bu model, süspansiyonların viskozitesini, özellikle düşük partikül konsantrasyonlarındaki süspansiyonların viskozitesini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Einstein, bu modeli, katı partiküllerin akışka bir matriste nasıl dağıldığını ve bu dağılımın matrisin viskozitesi üzerindeki etkisini anlamak amacıyla geliştirmiştir.

Einstein'ın bu çalışması, kolloidal süspansiyonlar ve daha sonra nanoakışkanlar gibi sistemlerin anlaşılmasında temel bir adımı temsil etmektedir. Model, katı partiküllerin akışkan bir ortamda nasıl davrandığını matematiksel olarak ifade eder ve bu konudaki ilk teorik çalışmalardan biridir.

Einstein modeli, düşük partikül konsantrasyonlarında süspansiyonların viskozitesini hesaplamak için kullanılan basit bir denkleme dayanır.

$$\eta_{nf} = \eta_f(1 + 2.5\phi) \quad (1.11)$$

Burada η_{nf} nanoakışkanın viskozitesi, η_f baz akışkanın viskozitesi ve ϕ nanopartikül hacim fraksiyonudur.

Einstein modeli, partiküllerin etkileşimini ve aglomerasyonunu göz ardı eder, bu nedenle yalnızca düşük konsantrasyonlar için uygundur.

1.2.3.2. Brinkman Viskozite Modeli

Brinkman (1952) modeli Einstein modelinin yalnızca düşük partikül konsantrasyonları için geçerli olduğu varsayımını genişletir ve daha yüksek konsantrasyonlardaki partiküllerin etkileşimlerini dikkate alır. Bu model, partiküllerin birbirleriyle ve çevreleyen akışkanla etkileşimlerinin viskozite üzerinde önemli bir etkisi olduğunu kabul eder.

$$\frac{\eta_{nf}}{\eta_f} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (1.12)$$

Burada η_{nf} nanoakışkanın viskozitesi, η_f baz akışkanın viskozitesi ve ϕ nanopartikül hacim fraksiyonudur. Brinkman modeli, yüksek partikül konsantrasyonlarına sahip nanoakışkanların viskozitesi üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmalarda kullanılmaktadır.

1.2.3.3. Batchelor Viskozite Modeli

Batchelor (1977), Einstein modelini genişleterek, partiküllerin yüksek konsantrasyonları için bir düzeltme faktörü eklemiştir. Model, partiküllerin etkileşimlerini ve hidrodinamik etkilerini dikkate alır.

Modelin ifadesi şöyledir:

$$\eta_{nf} = \eta_f(1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \quad (1.13)$$

Burada η_{nf} nanoakışkanın viskozitesi, η_f baz akışkanın viskozitesi ve ϕ nanopartikül hacim fraksiyonudur. Model, süspansiyon ve nanoakışkanların viskozite

davranışları üzerine yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarını yorumlamak ve anlamak için bir araç olarak kullanılmaktadır.

1.2.4. Nanoakışkanların Efektif Yoğunluğu

Xuan ve Roetzel (2000), nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini modellemek için kullanılan bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım, nanoakışkanların yoğunluğunu, ısı kapasitesini, termal iletkenliğini ve viskozitesini tahmin etmek için kullanılır. Nanoakışkanların yoğunluğunu hesaplama konusunda, Xuan ve Roetzel modeli, baz akışkanın ve içinde bulunan nanopartiküllerin yoğunluklarını dikkate alarak efektif yoğunluğu belirlemiştir.

Nanoakışkanın yoğunluğunu hesaplamak için aşağıdaki formülü kullanır:

$$\rho_{nf} = \rho_p \phi + \rho_f (1 - \phi) \quad (1.14)$$

ρ_{nf} nanoakışkanın yoğunluğu, ϕ nanopartikül hacim fraksiyonu, ρ_f baz akışkanın yoğunluğu, ρ_p nanopartiküllerin yoğunluğudur. Bu model, nanoakışkanın efektif yoğunluğunun, nanopartiküllerin ve baz akışkanın yoğunluklarının ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanabileceğini varsayar. Bu ağırlıklı ortalama, nanopartiküllerin hacim fraksiyonuna bağlı olarak ayarlanır.

1.3. Manyetohidrodinamik (MHD)

Manyetohidrodinamik (MHD) terimi, ilk olarak 1940'lerde ve 1950'lerde bilimsel literatürde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak manyetik alanlarla akışkanlar arasındaki etkileşim konusundaki temel kavramlar ve ilk çalışmalar daha önceye dayanmaktadır.

Manyetohidrodinamiğin kökenleri, elektromanyetizma ve akışkan mekaniği alanlarının birleşiminden gelmektedir. Elektromanyetizmanın temel denklemleri ve akışkanların hareketini tanımlayan Navier-Stokes denklemleri gibi matematiksel formalizmler, manyetik alanların akışkanlar üzerindeki etkisini incelemek için temel oluşturmuştur. Bu kavramlar ve denklemler, özellikle plazma fiziği, astrofizik ve güneş fizik gibi alanlarda manyetohidrodinamik çalışmaların temelini oluşturmuştur.

İlk kez 1937 yılında Hartmann tarafından tanımlanan bu etki, daha sonra Hartmann ve Lazarus tarafından detaylı bir şekilde incelenmiş ve Manyetohidrodinamik (MHD) akışların ısı transferi ve akış kontrolü üzerindeki etkilerini anlamak için kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Hartmann ve Lazarus'un araştırmaları, MHD akışların termal performansını optimize etmek ve akış dinamiklerini yönetmek amacıyla manyetik alanların etkin kullanımını ortaya koymuştur. Bu bulgular, MHD teknolojilerinin gelişimi için önemli bir temel oluşturmuş ve elektriksel iletkenliğe sahip akışkanların manyetik alan altında nasıl davrandığına dair kapsamlı bilgiler sağlamıştır.

Elektriksel iletkenliği olan bir akışkan, manyetik bir alan etkisi altına girdiğinde, akışkan içinde elektrik akımının oluşmasına neden olur. Bu oluşan elektrik akımları, manyetik alanla etkileşime girerek Lorentz kuvveti olarak bilinen bir kuvvet oluşturur. Lorentz kuvveti, akışkanın hareketine doğrudan etki eder ve böylece ısı transferi süreçlerini de değiştirir. Elektriksel iletkenliğe sahip akışkanlar üzerine uygulanan manyetik alanlar, akış hızlarını ve akışkanın davranışını değiştirebilir.

Hartmann'ın çalışmalarından bu yana, farklı geometrilerde manyetik alanın etkisi altındaki elektriksel iletken akışkanların akışını anlamak ve modellenmek üzere çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler arasında deneysel çalışmalar, analitik çözümler ve nümerik simülasyonlar da yer almaktadır. Bu sayede manyetik alanın akışkanların davranışı üzerindeki etkileri daha iyi anlaşılmış ve birçok endüstriyel ve bilimsel uygulama için önemli bir rol oynamıştır.

Hareket halindeki ve elektriksel iletkenliğe sahip bir akışkanın dışına uygulanan bir manyetik alan, akışkan içinde elektrik akımının indüklenmesine neden olur. Bu indüklenen elektrik akımıyla manyetik alan arasında bir etkileşim meydana gelir ve bu etkileşime Lorentz kuvveti adı verilir. Lorentz kuvvetleri, akışkanın hareketi üzerinde etkili olan kuvvetlerdir ve bu kuvvetler akışkan içinde ısı iletimini dolaylı olarak etkileyebilir. Lorentz kuvveti matematiksel olarak $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ şeklinde ifade edilir. Burada \mathbf{J} , indüklenen elektrik akım yoğunluğunu temsil ederken \mathbf{B} , manyetik indüksiyonu vektörel olarak ifade etmektedir (Davidson, 2001).

Lorentz Kuvveti, özellikle manyetohidrodinamik (MHD) alanında büyük önem taşımaktadır. Elektriksel iletkenliğe sahip akışkanlar, manyetik alanların etkisi altında Lorentz Kuvveti ile etkileşirler. Bu etkileşim, manyetik alanın akışkanın hareketini

kontrol etmesine veya sınırlamasına yol açabilir. MHD uygulamaları arasında nükleer füzyon reaktörlerinin tasarımı, plazma kontrolü ve manyetik jeneratörler gibi kritik alanlar bulunmaktadır.

$$\vec{J} \times \vec{B} = -\sigma B_0^2 \vec{V} \quad (1.15)$$

Burada \vec{V} hız vektörünü, \vec{B} manyetik alan vektörünü, σ akışkanın elektrik iletkenliğini, \vec{J} manyetik alanın etkisi altında hareket halinde olan, elektrik yüklü parçacıkların oluşturmuş olduğu elektrik akım yoğunluğunu ifade etmektedir.

1.4. Mikrokanallar

Mikrokanallar, sıvıların veya gazların mikro ölçekteki kontrol edilmiş hareketini sağlamak için tasarlanmış küçük boyutlu kanallardır. Bu kanallar genellikle birkaç mikrometreden birkaç milimetreye kadar olan boyutlarda olup, mikrofluidik sistemlerde ve ısı transfer uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar.

Mikro Couette akışı, biri hareketli diğeri sabit iki paralel plaka arasındaki akışkanın akışını ifade eder; üst plaka genellikle sabit durumda tutulurken, alt plaka belli bir hızda hareket eder. Bu durum, mikroakışkan sistemlerde sıklıkla karşılaşılan bir durumdur ve mikro ölçekte akış davranışlarını anlamak için kullanılır. Mikro ölçekte kullanılan sınır şartları, makro ölçekte kullanılan sınır şartlarından farklılıklar gösterir.

1.4.1. Mikrokanallarda Akış Rejimleri

Makro ölçekteki akışlarda, kütle, momentum ve enerji denklemleri temel denklemler olarak bilinir ve bu denklemler, akışın sürekli olduğu ve duvarlarda kaymama hız sınır şartının geçerli olduğu varsayılarak çözülür. Ancak, mikro ölçekteki akışlarda, karakteristik uzunluk ölçeği akışkan moleküllerinin ortalama serbest yol uzunluğuna yaklaştığında süreklilik varsayımı geçersiz hale gelir. Bu durum, mikro ölçekteki akış rejimlerinin tanımlanmasında önemli bir faktördür ve bu bağlamda Danimarkalı bilim adamı Martin Knudsen'in (1871-1949) adıyla anılan Knudsen (Kn) sayısı kullanılır. Knudsen sayısı, bir akışın belirli bir bölgedeki seyrelme derecesini ve süreklilik modelinin ne kadar geçerli olduğunu belirler. Knudsen sayısı, karakteristik uzunluğu temsil eden "L" ve moleküler ortalama serbest yol uzunluğunu temsil eden " λ " olarak tanımlanır.

Knudsen sayısının yerel değeri, bir akış içerisindeki seyrelme derecesini ve süreklilik modelinin geçerlilik sınırlarını belirler. Knudsen sayısının artışı, akışkanın seyrelmesine neden olur; bu durumda seyrelme etkisi belirgin hale gelerek akışı etkiler ve moleküller arasındaki çarpışma sıklığı azalır. Bu, ısı dengelinin bozulmasına ve akışın süreklilik varsayımından sapmasına yol açar. Akışkan, hız profilindeki süresizlikler nedeniyle duvar yüzeyinde kayma davranışı sergiler. Bu, akışkanın duvarla temas ettiğinde hızının sıfır olmaması anlamına gelir; yani, kaymama şartı geçerli olmaz. Bu durum, duvarla temas eden akışkanın sıcaklığı ile duvarın sıcaklığı arasında fark oluşmasına ve sıcaklık sıçramalarına neden olur.

1.4.2. Mikrokanallarda Kayma Sınır Koşulları

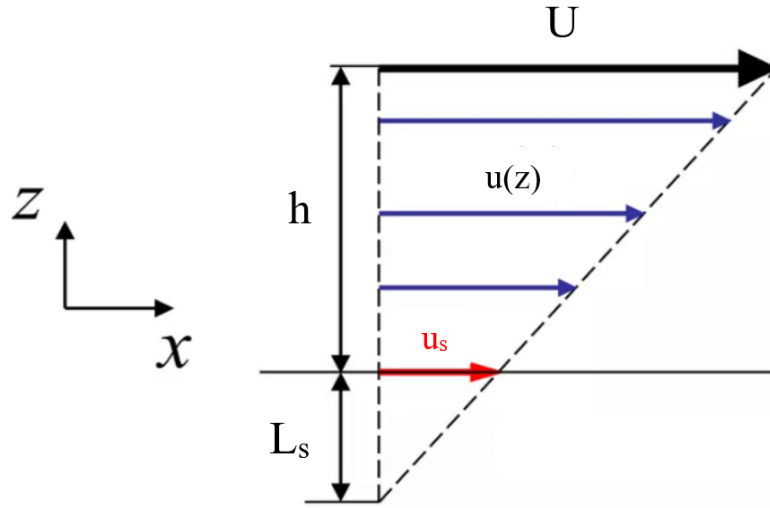
1.4.2.1 Lineer Navier Kayma Yasası

Navier kayma yasası, akışkanların katı yüzeylerle etkileşimini tanımlayan bir sınır koşuludur ve özellikle mikro ve nanoskala akışlar için önemlidir. Bu yasa, akışkanın hızının katı yüzeye yakınsarken hızın sıfıra yaklaşmadığı bir sınır koşulunu ifade eder. Yani, akışkanın katı yüzeyde tamamen durmamasına ve bir tür kayma hareketi sergilemesine izin verir.

Navier kayma yasasının temelinde şu denklem bulunur:

$$u_s = L_s \dot{\gamma} \quad (1.16)$$

u_s yüzeye yakın akışkan hızı (slip hızı), L_s kayma uzunluğu (slip length), $\dot{\gamma}$ akışkanın yüzeye dik hız gradyanıdır.



Şekil 1.2. Kayma hızı ve kayma uzunluğu (Niavarani ve Priezjev, 2009).

Kayma uzunluğu, akışkanın bir katı yüzeyle temas ettiği durumlarda akışkanın yüzeydeki kayma davranışını tanımlar. Bu uzunluk, akışkanın moleküler etkileşimleri ve yüzeyin özellikleri tarafından belirlenen bir ölçüttür.

Kayma uzunluğunun büyüklüğü, akışkanın yüzeyde kayma veya yapışma derecesini belirler. Eğer kayma uzunluğu pozitifse, akışkan yüzeyde kayar, kayma uzunluğu sıfırsa tam yapışma (no-slip) koşulu geçerlidir ve kayma uzunluğu negatifse, akışkanın bazı alt katmanları yüzeye yapışır.

Pereira (2009), lineer Navier kayma sınır koşulu kullanarak Newtonian genelleştirilmiş Newtonian ve viskoelastik akışkanların mikroakışkanlarını incelemiştir. Kayma hızını $u_s = \beta \tau_{yx}$ diye tanımlamış ve β kayma hızı katsayısı olup, kayma uzunluğu sayısına benzeyen bir rol oynadığını belirtmiştir.

Chen, Han, & Hwang, (2020) çalışmasında lineer Navier kayma sınır koşulları kullanılarak düz bir yüzey üzerinde yeniden üretilebileceğini göstermektedir. Lineer Navier kayma uzunluğu, dalgalı bir yüzeye sahip bir kanal akışında analitik olarak türetilmiştir. Farklı en-boy oranlarına sahip dalgalı desenlerin etkilerini incelenmiştir. Sonuçlar, kayma uzunluğunun akış hızından bağımsız olduğunu ve reolojik özelliklerden neredeyse etkilenmediğini göstermektedir. Ayrıca, Newtonian olmayan akışkanların boyutsuz kayma uzunluğunun, Newton akışkanlarının kayma uzunluğuna yakın olduğunu ve akış geometrisine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Lineer Navier kayma yasası, akışkanın yüzeye yapışık olduğu ve yüzeye yakın bölgelerde hızının yavaşladığı durumları açıklamak için kullanılır. Bu yasa, özellikle düşük Reynolds sayısına sahip akışlar için uygundur ve akışkanın viskozitesine, yüzeyin pürüzlülüğüne ve sıcaklığına bağlı olarak değişebilir.

1.4.2.2. Lineer Olmayan Navier Kayma Yasası

Lineer Olmayan Navier Kayma Yasası (Nonlinear Navier Slip Law), mikro ve nano ölçekteki akışlarda akışkanın yüzeye olan etkileşimini tanımlamak için kullanılan bir modeldir. Bu yasa, akışkanın hız dağılımını ve kayma hızını yüzeye olan etkileşime dayalı olarak açıklar.

$$u_s = \beta \dot{\gamma}^k \quad (1.17)$$

u_s yüzeye yakın akışkan hızı (slip hızı), β kayma hızı katsayısı, $\dot{\gamma}$ akışkanın yüzeye dik hız gradyanı, k yüzeyin pürüzlülüğü ve kimyasal özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişen bir üs değeridir.

Lineer olmayan Navier kayma yasası, tipik olarak lineer Navier kayma yasasından farklıdır, çünkü kayma hızı deformasyon hızının bir üssü olan n ile ilişkilendirilir. Bu, akışkanın yüzeye olan etkileşiminin doğrusal olmayan ve daha karmaşık bir şekilde tanımlandığını gösterir. $k=1$ olduğu durumlarda lineer Navier kayma yasasına eşittir (Ferrás, 2012).

1.5. Tezin Kapsamı ve Amacı

Bu çalışma, pratik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan sonsuz uzunluktaki iki mikro paralel plaka arasında (Couette akış, alt plaka sabit, üst plaka hareketli), Newtonian olmayan bir nanoakışkanın akışında manyetohidrodinamik (MHD) etkileri ve viskoz yayılım etkisi incelenmiştir. Her iki mikro plaka sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Problemin geometrisine uygun olarak elde edilen hız ve enerji denklemlerinin çözümünde sınır şartı olarak birinci mertebe Navier kayma koşulu kullanılarak MHD Newtonian olmayan nanoakışkanların hız ve ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. Yapılan çalışma, MHD kayma akış rejiminde Newtonian olmayan nanoakışkanların karmaşık davranışlarını anlama ve mikro ölçekteki akış kontrolünü ve ısı transferi karakteristiklerinin anlaşılması konusunda önemli bir katkı sağlamaktadır.

BÖLÜM 2

LİTARATÜR ÇALIŞMASI

Newtonian olmayan akışkanlarda, deformasyon hızındaki değişiklikler mikroyapısal dönüşüme ve sonucunda akışkanın dinamik viskozitesi ile termal iletkenliğindeki değişikliklere neden olur. Bu, güç yasası akışkanları için hem momentumunu hem de ısı transfer davranışını etkileyebileceği anlamına gelir. Hughes, Proctor, Eltayeb, (2022) yaptıkları çalışmada Newtonian olmayan akışkanlar için klasik Fourier ısı iletim modelinin eksiklikleri olduğunu ve doğru ısı taşınım mekanizmalarını incelemenin öneminden bahsetmişlerdir.

Inman (1964), çalışmasında, tam gelişmiş laminer kayma akışı koşulları altında, paralel plakalar arasındaki ve dairesel boru içindeki ısı transfer özelliklerini sabit duvar sıcaklığı durumunda kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Araştırmasında, kayma akışı rejimini detaylı bir biçimde analiz ederek, bu rejimin ısı transfer performansına etkilerini belirlemiştir. Çalışma, farklı geometrilerdeki akışkan hareketlerinin termal davranışlarını karşılaştırarak, kayma akışının ısı transferi üzerindeki kritik rolünü vurgulamıştır.

Lin (1979), biri hareketli diğeri sabit, paralel plakalar arasındaki Newtonian olmayan akışkanın oluşturduğu laminer akışta ısı transferini incelemiştir. Bu çalışmada, enerji denkleminde yer alan viskoz yayılım terimini içeren matematiksel hesaplamalar yapılmış ve ısı transferi üzerindeki viskoz yayılım etkilerini anlamak için iki farklı termal sınır koşulu kullanılmıştır. Bu iki sınır koşulu şunlardır: Birinci durumda, levhaların her biri için belirli bir sıcaklık belirtilirken, ikinci durumda ise hareketli plakanın izole edilmiş olduğu sabit bir plakada belirli bir sıcaklık sınır koşulu uygulanmıştır. Tam gelişmiş laminer akışta viskoz yayılımın ısı transferi üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir.

Gad-el-Hak (2001) çalışmasında, mikro ölçekteki akışkan akışı ve ısı transferi süreçlerinin, makro ölçekli sistemlerden önemli ölçüde farklılık gösterdiğini vurgulamıştır. Çalışmasında, mikro ölçekli cihazların küçük boyutlarının yanı sıra, bu cihazların daha yüksek verimlilik sunduğunu ve bu nedenle araştırmacıların bu alana özel bir ilgi göstermeleri gerektiğini belirtmiştir. Gad-el-Hak, mikro akışkan sistemlerde gözlemlenen farklı fiziksel prensipleri ve etkileri detaylandırmış, mikro ölçekli akışkan dinamiklerinin ve termal yönetiminin, makro ölçekli analoglarına kıyasla nasıl benzersiz zorluklar ve fırsatlar sunduğunu açıklamıştır.

Gaz mikro akışları, Knudsen sayısına göre sınıflandırılırken, $Kn < 0.001$ olduğunda, akış rejimi sürekli olup klasik Navier-Stokes denklemleriyle simüle edilebileceğini; ancak, $0.001 < Kn < 0.1$ olduğunda, kayma akış rejimi hakim olacağını ve kayma sınır koşulu ile Navier-Stokes denklemleri kullanılmasını Raisi, Ghasemi, Aminossadati, (2011) çalışmasında göstermiştir. Karimipour, (2015). $0.1 < Kn < 10$ ve $Kn > 10$ olduğunda, sırasıyla geçici ve serbest moleküler rejimler akışı işler ve parçacık tabanlı yöntemlerin daha uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Ellahi ve Hameed, (2012), bir kanalda sıkıştırılmaz, termodinamik olarak tam gelişmiş, üçüncü derece bir akışkanın, doğrusal olmayan kısmi kaymanın etkilerini incelemişlerdir. Bu makalede ele aldıkları temel soru, katı-sıvı sınırında kayma olmaması koşulunun uygulanabilirliği ile ilgili olmuştur. Homojen ve termodinamik olarak uyumlu bir üçüncü derece akışkan içinde Couette, Poiseuille ve Couette-Poiseuille akışları için kayma, manyetohidrodinamik (MHD) ve ısı transferi etkilerini çalışmışlardır.

Zhang (2017) çalışmasında, gerilme levhası üzerinde sonlu bir filmde sıkıştırılmaz pseudoplastik EVA nanoakışkanın akışı üzerinde değişken manyetik alan ve hız kayması etkileri incelemiştir. Kayma parametresindeki artış, sıcaklıkta bir iyileşme ve daha ince film kalınlığını göstermektedir. Prandtl sayısının ince film kalınlığı üzerindeki etkisi neredeyse ihmal edilebilir olduğunu söylemiştir. CuO, TiO₂ ve Al₂O₃'ten daha belirgin bir şekilde EVA eriyiğinin ısı transferini arttırdığını ve Hartmann sayısı arttıkça, akış hızının azaldığını belirtmiştir.

Newtonian olmayan akışkanların reolojisini yakalamak için birçok model önerilmiştir, bunlarda kayma gerilmesi, deformasyon hızının bir güç yasası fonksiyonudur. EVA, etilen ve vinil asetatın bir kopolimeridir ve fotovoltaik modülün

kapsülleme işleminde kullanılmaktadır. Hwang, Liu, Hsu, Yeh, Yang, Chen, (2012) çalışmasında EVA nanokompozitlerinin reolojik davranışı analiz edilmişleridir. EVA nanokompozitlerinin kesme incelmesi özelliği gösterdiği belirtmişleridir. Sonuç olarak tipik bir pseudoplastik (güç yasası) akışkan olduğunu gösterilmiştir.

Shojaeian ve Koşar (2016) paralel plakalar ve dairesel mikrokanallar içinde hidrodinamik ve termal olarak tam gelişmiş Newtonian olmayan güç yasası akışkan akışlarının konvektif ısı transferi, sabit izoflüks termal koşul altında analitik ve sayısal olarak incelenmişlerdir. Çalışmada, viskoz yayılım, kayma koşulu ve termofiziksel özellikler sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olarak dikkate alınmıştır. Güç yasası akışkanları için, Nusselt sayısının hem güç yasası indeksi hem de Brinkman sayısı ile azalan bir eğilim gösterdiği bulmuşlardır.

Nadeem, Lee ve Kim'in (2015) gerçekleştirdikleri çalışmada, mikro ölçekteki Couette akışta ısı transfer özelliklerini ele almaktadırlar. Araştırmalarında, sabit alt plaka ve hareketli üst plaka ile karakterize edilen mikro-Couette akışını incelemişlerdir ve eksenel ısı iletimini göz ardı ederek sıcaklık dağılımı ve ısı transferini analiz etmişleridir. Çalışma kapsamında, sıcaklık dağılımı ve ısı transferi, Reynolds sayısı, Nusselt sayısı ve Prandtl sayısı gibi kritik parametrelerin varyasyonları altında değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, sıcaklık dağılımı ve ısı transferinin Reynolds sayısı ve Prandtl sayısı ile negatif korelasyon gösterdiğini, Nusselt sayısının ise Reynolds sayısı ile arttığını ve Prandtl sayısı ile azaldığını ortaya koymuşlardır.

Borhan ve Zhou'nun (2011) yürüttükleri çalışmada, düşük Reynolds sayılı mikro Couette akışı doğrudan sayısal simülasyon (DNS) yöntemiyle incelemiştir. Bu çalışmanın bulguları, akışın Reynolds sayısının artışıyla birlikte kararsızlık gösterdiğini ve akışın niteliği hakkında detaylı bilgiler sunduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışma ayrıca, alt plakanın sabit olduğu ve üst plakanın hareketli olduğu Couette akışında, eksenel ısı iletimini ihmal etmiş ve bu durumun sonuçlar üzerindeki etkisini analiz edilmiştir. Bu bağlamda, çalışma düşük Reynolds sayısındaki mikro Couette akışının karakteristiği ve kararsızlık özellikleri hakkında önemli katkılarda bulunmuşlardır.

Makinde ve Onyejekwe (2011) değişken viskoziteye ve elektriksel iletkenliğe sahip bir elektriksel olarak iletken akışkanın, enine manyetik alanın varlığında iki paralel plaka arasındaki hız ve ısı transferi karakteristiklerini incelemişlerdir. Akışın, eksenel

basınç gradyanı ve üst plakanın düzgün hareketinin birleşik etkisiyle yönlendirildiği varsayılmıştır. Manyetik alanın, viskozitenin üslerinin, çeşitli akışkan ve ısı transferi boyutsuz niceliklerinin ve elektriksel iletkenlik değişiminin birleşik etkisinin, akışkanın hidromanyetik ve elektriksel özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadırlar.

Türk ve Tezer-Sezgin (2012), elektriksel olarak iletken ve sıcaklığa bağlı viskoziteye sahip akışkanın, paralel plakalar arasındaki bir akışkanın zamana bağlı manyetohidrokinamik (MHD) akışı ve ısı transferini incelemiştir. Çözüm, uzayda Chebyshev spektral yöntemi ve zamanda geri farklar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş, Navier kayma koşulları fiziksel olarak tanıtılmıştır. Hartmann sayısı, viskozite ve Navier kayma parametrelerinin akış ve sıcaklık üzerindeki etkileri simüle edilmiştir

Mondal (2014) çalışmasında iki farklı akış konfigürasyonu için, yani zayıf bir basınç gradyanının uygulanması ve nispeten güçlü bir basınç gradyanı altında, asimetric olarak ısıtılan iki paralel plaka arasındaki Newtonian olmayan akışkanların Couette akışı için tersinmezlik analizini çalışmıştır. Akışkan sürtünmesi ve ısı transferinin, farklı derecelerdeki asimetric duvar ısıtması ve üst plaka hızı için sistemin tersinmezliğini nasıl yönlendirdiği üzerine karmaşık etkileşimi vurgulamıştır. Çalışma ayrıca, belirli bir derecede asimetric duvar ısıtması için, akışkanın reolojik davranışındaki değişikliklerle tersinmezlik üretim oranının nasıl değiştiğini göstermektedir.

Tso, Hor, Chen ve Kok, (2018) mikrokanal akışkanındaki viskoz yayılım kaynaklı ısı transferini ilk kez incelemişlerdir. Bu ısı, alt plakanın küçük salınımlı hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Akışkan hızının, yalnızca plakanın salınım hızına bağlı olduğunu ve sıcaklık alanının plakanın salınım hızına bağlı olarak oluşan ısı için Brinkman sayısı ve Prandtl sayısı önemli olduğunu belirtmişlerdir. Salınım hızı veya Brinkman sayısının artması ve Prandtl sayısının birimden küçük olduğunda azalması, sıcaklık alanını önemli ölçüde artırdığı analiz edilmiştir.

Rashidi, Farahani ve Alhuthali'nin (2018) mikrokanalın termal performansının, saf su veya Cu-su nanoakışkan ile soğutulduğunda, kayma sınır şartlarının akış alanı ve ısı transferi üzerindeki etkilerini dikkate alarak sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, mikrokanal, sabit bir sıcaklıkta kısmen ısıtılmakta ve nispeten daha

düşük sıcaklıkta laminar akışın zorlanmış konveksiyonu ile soğutulmaktadır. Reynolds sayısı, parçacık hacim fraksiyonu ve kayma hızı katsayısı gibi ilgili parametrelerin mikrokanalın termal performansı üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir.

Deng, Bian, Lian, (2023) Power-Law akışkanın elektrokinetik etki altındaki mikrokanallarda basınç gradyanının akışını analiz etmişleridir. Duvarlardaki kayma akışı ve akışkanın doğrusal olmayan reolojisini dikkate alarak, modifiye Cauchy momentum ve enerji denklemlerini çözümlenmişlerdir. Analiz, farklı akış davranış indeksleri, elektrokinetik genişlikler, kayma uzunlukları ve Brinkman sayıları için yapılmıştır. Akış davranış indeksi ve kayma uzunluğu, akış hızı ve ısı transferi üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Davaa, Shigechi ve Momoki (2000) iki paralel plaka arasında akan bir Newtonian olmayan akışkanın, biri sabit diğeri hareketli iki plaka arasından tam gelişmiş laminar akışı analitik olarak incelemişlerdir. Power-Law modeli tarafından tanımlanan kayma gerilimini uygulayarak, momentum denkleminin kesin çözümleri elde edilmiştir. Hareketli bir plakanın hızının ve Newtonian olmayan bir güç yasası akışkanın akış indeksinin, hız dağılımı ve sürtünme faktörü üzerindeki etkilerini tartışmışlardır.

Turkylmazoglu (2012) elektriksel olarak iletken ve Newtonian olmayan bir akışkanın, daralan bir levha etrafındaki manyetohidrodinamik (MHD) kayma akışını incelemiştir. Çalışmada viskoelastiklik (Newtonian olmayan), manyetik parametre, kayma parametresi gibi fiziksel parametreler incelenmiştir. Araştırma, kayma olmayan sınır durumunda, Newtonian olmayan akışkanın MHD kayma akışının, yazarın daha önceki çalışmalarıyla örtüşüğünü göstermiştir. Manyetik alanın hız ve sıcaklık alanları üzerinde önemli etkileri olduğunu bulmuştur.

Pereira (2009), lineerleştirilmiş White–Metzner modeli altında Newtonian, genelleştirilmiş Newtonian ve viskoelastik akışkanların kayma koşullarında mikroakışkan akışlarını lineer Navier kayma sınır koşulunu kullanarak incelemiştir.

Ferras ve arkadaşları (2012), kayma sınır koşullarını kullanarak hem Newtonian hem de elastik olmayan Newtonian olmayan akışkanların Couette ve Poiseuille akışlarını analitik olarak çözmüştür. Çalışmalarında, Navier'in lineer kayma yasası, doğrusal olmayan kayma yasası, Hatzikiriakos kayma yasası ve asimptotik kayma yasasını gibi çeşitli kayma sınır koşullarını dikkate almışlardır.

Kiyasatfar (2018), Power-Law akışkanda kayma sınır koşulu altında konvektif ısı transferi ile entropi üretiminin analizini incelemiştir. Sonuçlar, daha büyük değere sahip kayma katsayısının ortalama entropi üretim oranında azalmaya ve daha büyük Nusselt sayısına yol açtığını göstermektedir. Çalışmasında, paralel plakalı mikrokanalın dairesel geometriye kıyasla daha fazla entropi sağladığını bulmuştur. Değişen termal özellikler ve entropi üretimi nedeniyle, viskoz yayılımın dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir.

Ghazian, O., Rezvantalab, H. and Ashjaee, M. (2011) çalışmasında, sabit ısı akısı sınır şartında, ısı transferi karakteristiklerinin güç yasası indeksine ve Brinkman sayısına bağlı olduğu gösterilmiştir. Çalışmalarında ayrıca, psödoplastik ve dilitant akışkanların viskoz yayılımın ısı transferi karakteristikleri nasıl etkilediğini de sergilediğini ortaya koymuşlardır. Kısmen gözenekli ortamla doldurulmuş paralel plaka kanalından geçen tam gelişmiş zorlanmış konveksiyon Couette akışında viskoz yayılımın etkisi de analiz etmişlerdir. Çalışmalarında boyutsuz sıcaklığın ve dolayısıyla Nusselt sayısının, Brinkman sayısının artmasıyla azaldığını göstermişlerdir.

Aminossadati, Raisi ve Ghasemi (2011) yatay bir mikrokanalda su- Al_2O_3 nanoakışkanın laminer zorlanmış konveksiyonda sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, Reynolds sayısı ($0 \leq Re \leq 1000$), nanopartikül hacim fraksiyonu ($0 \leq \phi \leq 0.04$) ve Hartmann sayısı ($0 \leq Ha \leq 100$) gibi ilgili parametrelerin akış ve sıcaklık alanlarına ve mikrokanalın ısı transfer performansına etkileri sayısal incelenmiştir. Sonuçlar, mikrokanalın Reynolds ve Hartmann sayılarının yüksek değerlerinde daha iyi ısı transferi performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Aydın (2005) sabit özelliklere sahip Newtonian bir akışkanın borudaki laminer zorlanmış konveksiyonunu viskoz yayılım etkisini hesaba katarak ele almaktadır. Çalışma hem ısıtma hem de soğutma durumlarını içeren farklı Brinkman sayısı değerleri için boyutsuz radyal sıcaklık ve Nusselt sayısı değişimlerini incelemiştir. Ayrıca, Nusselt sayısının gelişimine katkıda bulunan faktörler, sabit duvar sıcaklığı (CWT) durumu için Brinkman sayısı ve sabit ısı akısı (CHF) durumu için ise modifiye Brinkman sayısı gibi termal sınır koşulları altında araştırılmıştır. Aydın ve Avcı'nın (Aydın ve Avcı, 2006) analitik çalışması da viskoz yayılım etkisine odaklanarak düz Poiseuille akışı için konvektif ısı transfer sorununu ele almıştır. Bu çalışmada, ısı denklemi, termal olarak gelişmiş ve gelişen durumlar için sırasıyla CWT ve CHF sınır koşulu altında ayrı ayrı

çözölmüştür. Her iki durumda da akışın hidrodinamik olarak gelişmiş olduğu kabul edilmiştir. Sonuçlar, viskoz yayılım etkisinin artmasıyla ısı transferinin belirli bir kritik değere kadar azaldığını ve bu azalmanın viskoz yayılım etkisinden kaynaklanan içsel ısı üretimine bağılı olduğunu göstermektedir.

Öztürk (2013), elektriksel olarak iletken, viskoz bir akışkanın, sabit bir ısı akısı ile ısıtılan iki paralel plaka arasında durağan, tam gelişmiş laminer akışı ve ısı transferi, manyetik alan varlığında analitik olarak incelemiştir. Knudsen sayısı, Brinkman sayısı ve Hartmann sayısı etkileri, hız ve sıcaklık dağılımı ile ısı transfer özelliklerini incelemiştir.

Öztürk ve Kahveci (2016), tarafından yürütölen araştırmada, sabit bir ısı akısı altında ısıtılan paralel plakalar arasındaki nanoakışkanların tam gelişmiş laminer akışı ve ısı transferi dinamikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma, kayma hızı faktörü için 0 ile 0.04 arasında, Brinkman sayısı için -0.1 ile 0.1 arasında, ve nanotabaka kalınlığının orijinal parçacık çapına oranı 0.1, 0.2, ve 0.4 değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, nanopartiköl hacim fraksiyonu %0 ile %8 arasında değışen değerler üzerinde analiz yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, nanopartiköl hacim fraksiyonunun artması ile ortalama Nusselt sayısı önemli ölçüde artmış, özellikle nanotabaka kalınlığının orijinal parçacık çapına oranı yüksek değerler alındığı durumlarda Nusselt sayısında daha da yüksek artışlar olduğunu belirtmişlerdir.

Kumar ve Sanchayan (2012), iki asimetric şekilde ısıtılmış paralel plaka arasındaki kayma akışının Nusselt sayıları üzerindeki viskoz yayılım etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, ısı transferinin sıcaklık profili ve sıcaklık farkının Brinkman sayısının artmasıyla arttığını tespit etmişlerdir.

Lin vd. (2015) araştırmasında, (MHD) akışlarında Newtonian olmayan akışkanların akışı üzerindeki ısı ve kütle transferi etkilerini incelemiştir. Bulunan sonuçlara göre, manyetik alanın uygulanması, akışkanın hızını Lorentz kuvveti yoluyla yavaşlattığını belirtmişleridir ve Lorentz kuvvetinin etkisinin akışkanın termal davranışları üzerindeki rolü, akışkanın ısı ve kütle transferi özelliklerini incelemiştir.

Santra, Sen, Chakraborty (2009) çalışmasında, bakır-su nanoakışkanın iki boyutlu bir dikdörtgen kanal içindeki akışının ısı transfer özelliklerini incelemiştir. İnceleme, farklı Reynolds sayıları ($5 \leq Re \leq 1500$) ve nanopartiköl hacim fraksiyonu ($0.00 \leq \phi \leq 0.050$) aralığını kapsamaktadır. Nanoakışkan hem Newtonian hem de Newtonian olmayan olarak

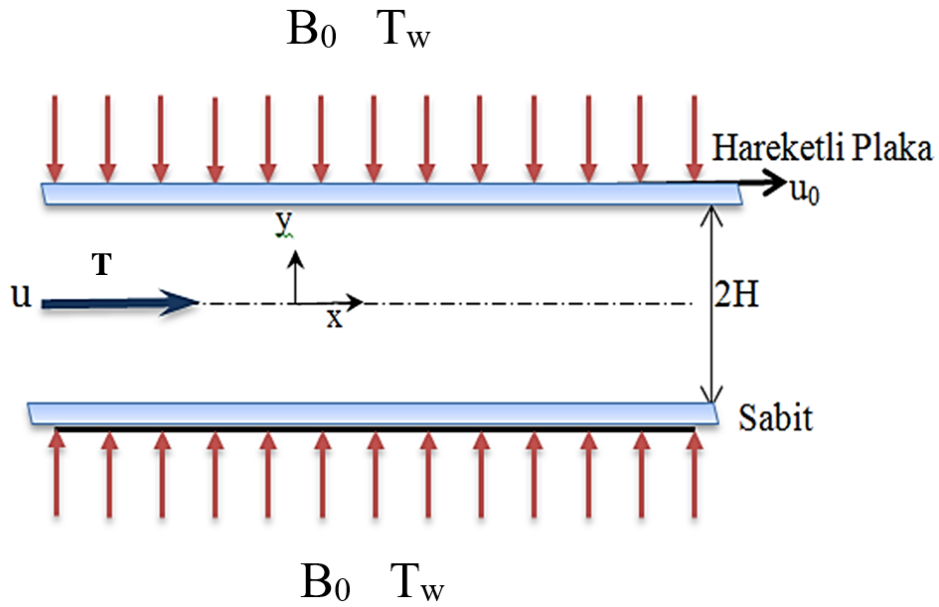
ele alınmıştır. Düşük Reynolds sayılarında Newtonian olmayan nanoakışkan, Newtonian nanoakışkana göre daha fazla kesme gerilimi uygularken, Reynolds sayısı arttıkça bu fark azalmaktadır. $Re=1500$ 'de duvar kesme gerilimi ϕ ile azalır, bu da Newtonian olmayan nanoakışkan daha az pompa gücü gerektirdiğini göstermişlerdir.



BÖLÜM 3

ANALİZ

Bu çalışmada, alt plaka sabit üst plaka hareketli ve sabit sıcaklıkta, sonsuz uzunluktaki iki mikro paralel plaka arasından manyetohidrodinamik (MHD) kayma akış rejiminde, daimi, hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş, laminar, viskoz yayılım etkileri dahil edilerek, Newtonian olmayan nanoakışkanın hız alanı birinci mertebeye kayma hızı modeli kullanılarak, hız ve sıcaklık dağılımı ile Nusselt sayısı incelenmiştir. Geometri ve koordinat sistemi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. MHD mikro paralel plakalar arasından akışta geometri ve koordinat sistemi.

Kartezyen koordinatlarda, kütle korunumu, momentum korunumu ve enerji korunumu denklemleri, aşağıda sıralanmıştır.

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

$$\rho(\vec{\nabla} \cdot \vec{V})\vec{V} = \rho\vec{g} - \vec{\nabla}p + \mu\nabla^2\vec{V} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (3.2)$$

$$\rho C_p(\vec{\nabla} \cdot \vec{V})T = k\nabla^2T + \Phi \quad (3.3)$$

Burada \vec{V} hız vektörünü, \vec{B} manyetik alan vektörünü, p statik basıncı, μ akışkanın dinamik viskozitesini, k ısı iletim katsayısını, C_p akışkanın sabit basınçta özgül ısısını, T akışkan sıcaklığını, \vec{g} yerçekimini, Φ viskoz yayılımı ρ akışkanın yoğunluğunu, \vec{J} ise manyetik alanın varlığında hareket eden elektrik yüklü parçacıkların oluşturduğu elektrik akım yoğunluğunu ifade etmekte ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (3.4)$$

Burada σ akışkanın elektrik iletkenliğini, \vec{E} elektrik alan şiddetini ifade etmektedir.

Her iki plakada sabit sıcaklıkta olup alt plaka hareketsiz üst plaka ise u_0 hızıyla pozitif x yönünde hareket etmektedir. Elektriksel iletkenliği olan, sıkıştırılmaz, Newtonian olmayan nanoakışkanın kayma akış rejiminde akışı, daimi, iki boyutlu, hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş laminer akış kabul edilmiştir. Manyetik alan etkisi akış yönüne dik olarak uygulanmıştır.

Manyetik Reynolds sayısı, indüklenen manyetik alanın ve uygulanan manyetik alanın göreceli gücünü gösterir. Çoğu endüstriyel ve laboratuvar akışlarında manyetik Reynolds sayısı (Re_m) 10^{-2} 'den daha azdır ve ihmal edilebilir (Knaepen, Kassios ve Carati, 2003). Elektriksel iletkenliğe sahip akışkanın hareketiyle oluşan indüklenmiş manyetik alanın etkisi, manyetik Reynolds sayısının (Re_m) 1'den küçük olması nedeniyle göz ardı edilmiştir (Sutton ve Sherman, 1965). Ayrıca, elektrik alan şiddeti, Hall etkisi ve Joule ısıtma etkileri de ihmal edilmiştir. Akış, iki boyutlu olarak ele alınmış ve koordinat sistemi mikro plakaların merkezine yerleştirilmiştir; x eksenı akış yönünde, y eksenı ise akışa dik yönde konumlandırılmıştır. Bu varsayımlar altında, manyetik alan etkisi altındaki Newtonian olmayan nanoakışkanın akışı için boyutlu temel denklemler,

yani kütle korunumu, momentum korunumu ve viskoz yayılımı da içeren enerji denklemi aşağıda sunulmuştur.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.5)$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right] - \sigma B_0^2 u \quad (3.6)$$

$$(\rho c_p)_{nf} u \frac{\partial T}{\partial x} = k_{nf} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (3.7)$$

Burada, B_0 manyetik alan şiddetini, σ elektrik iletkenliğini, k_{nf} nanoakışkanın ısı iletim katsayısını, ρ_{nf} nanoakışkanın yoğunluğunu, u x-ekseni boyunca olan hız bileşenini, v y-ekseni boyunca olan hız bileşenini göstermektedir.

Newtonian olmayan akışkanlar için Power-Law akışkan modeline (Ostwald-deWaele model) göre kayma gerilmesi

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = -m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.8)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada m akışkan kıvamlilik indeksi, n Power-Law akışkan davranış indeksidir. Newtonien olmayan naoakışkanlar için Brinkman viskozite modeli kullanılmıştır.

3.1. Hız Dağılımı

Bu çalışmada, hidrodinamik olarak tam gelişmiş laminer Couette akışımı analiz etmek için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

$$v = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \text{ve} \quad u = u(y) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad \text{ve} \quad p = p(x) \quad (3.10)$$

Bu kabuller altında denklem (3.6)

$$0 = -\frac{dp}{dx} + mn \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{d^2 u}{dy^2} - \sigma B_0^2 u \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilir.

Boyutsuz değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{u}{u_0}, \quad P = \frac{p}{\rho_{nf} u_0^2} \quad (3.12)$$

Denklem (3.11)'de tanımlanan momentum denklemi için denklem (3.12)'te tanımlanan boyutsuz değişkenler kullanılarak boyutsuz momentum denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \frac{n}{Re} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} MU \quad (3.13)$$

Burada M manyetik alan parametresi, Re Reynolds sayısı olup

$$M = \frac{\sigma B_0^2 H}{\rho_f u_0}, \quad Re = \frac{\rho_f u_0^{2-n} H^n}{m_f} \quad (3.14)$$

olarak tanımlanmıştır.

Xuan ve Roetzel (2000) tarafından bir nanoakışkanın efektif yoğunluğu

$$\rho_{nf} = \rho_p \phi + \rho_f (1 - \phi) \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

Denklem (3.15) denklem (3.13) de yerine yazılarak hız denklemi,

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{(1-\phi) + \phi \frac{\rho_p}{\rho_f}} \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \frac{n}{Re} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \frac{1}{(1-\phi) + \phi \frac{\rho_p}{\rho_f}} MU \quad (3.16)$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial X} + \varepsilon_1 \left[\frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \frac{n}{\text{Re}} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - MU \right] \quad (3.17)$$

$$B = \varepsilon_1 \left[\frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \frac{n}{\text{Re}} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - MU \right] \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{(1-\phi) + \phi \frac{\rho_p}{\rho_f}}, \quad B = \frac{\partial P}{\partial X} \quad (3.19)$$

elde edilir.

3.2. Kayma Akış Rejiminde Birinci Mertebe Kayma Hızı Sınır Şartı

Kayma akış rejiminde Newtonian olmayan akışkan için lineer Navier kayma hızı u_s , Pereira (2009) tarafından

$$u_s = \beta \tau_{yx} \quad (3.20)$$

şeklinde tanımlanmıştır. β kayma hızı katsayısı olup, bir gazın mikro ölçekteki akışında duvardaki kaymanın düzeyini gösteren Knudsen (Kn) sayısına benzeyen bir rol oynar. Denklem (3.15), denklem (3.8)' de tanımlanan Power-Law kayma gerilmesi modeli kullanılarak kayma hızı

$$u_s = \beta \left(-m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) \quad (3.21)$$

olarak ifade edilir.

Denklem (3.18)' de yer alan momentum denkleminin sınır şartları

$$y = +H, \quad u = u_0 + u_s = u_0 - \beta m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.22)$$

$$y = -H, \quad u = u_s = -\beta m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.23)$$

şeklinde ifade edilir.

Boyutsuz değişkenler,

$$U = \frac{u}{u_0} \quad U_s = \frac{u}{u_s} \quad Y = \frac{y}{H} \quad \beta_v = \frac{\beta m u_0^n}{H^{n-2}} \quad (3.24)$$

olmak üzere denklem (3.22) ve (3.23)'de tanımlanan sınır şartları, denklem (3.24)'da tanımlanan boyutsuz değişkenler kullanılarak boyutsuz sınır şartları elde edilir.

$$Y = 1, \quad U = 1 - \beta_v \left| \frac{\partial U}{\partial Y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right) \quad (3.25)$$

$$Y = -1, \quad U = -\beta_v \left| \frac{\partial U}{\partial Y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right) \quad (3.26)$$

veya

$$U(1) + \beta_v \left| \frac{\partial U}{\partial Y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right) = 1 \quad (3.27)$$

$$U(-1) + \beta_v \left| \frac{\partial U}{\partial Y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right) = 0 \quad (3.28)$$

3.3. Sıcaklık Dağılımı

Yapılan çalışmada plakalar sabit sıcaklıkta kabul edilmiştir, ısı olarak tam gelişmiş laminer akışa ait viskoz yayılımı da içeren enerji denklemi aşağıdaki gibidir.

$$(\rho c_p)_{nf} u \frac{\partial T}{\partial x} = k_{nf} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + m \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^{n+1} \quad (3.29)$$

Denklemin sol tarafındaki terimler konveksiyonla olan ısı transferini, sağ tarafındaki terimler ise akışkan parçacıklarına etki eden ısı difüzyon oranını ve viskoz yayılım etkisini göstermektedir.

Boyutsuz parametreler,

$$\theta = \frac{T - T_w}{T_c - T_w}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{u}{u_0}, \quad X = \frac{x}{H} \quad (3.30)$$

T akışkan sıcaklığı, T_w plaka sıcaklığı ve T_c merkez sıcaklığı olmak üzere ve denklem (3.30)'daki boyutsuz değişkenler kullanılarak denklem (3.29) boyutsuz olarak aşağıda ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{k_f}{k_{nf}} Br \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^{n+1} = \frac{(\rho c_p)_{nf}}{(\rho c_p)_f} \frac{k_f}{k_{nf}} Pe \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (3.31)$$

Burada Br, Brinkman sayısı ve Pe, Peclet sayısı olup

$$Br = \frac{\mu u_0^{n+1}}{k_f (T_c - T_w) H^{n-1}}, \quad Pe = \frac{(\rho c_p)_f u_0 H}{k_f} \quad (3.32)$$

olarak tanımlıdır. Brinkman sayısı, akışkanın viskoz ve termal davranışının bir arada etkilediği bir akışkan ortamını tanımlamak için kullanılır. Brinkman sayısı büyüdükçe, viskozite termal iletkenliğe göre daha baskın hale gelir ve akışkanın viskoz etkileri artar. Bu nedenle Brinkman sayısının büyüklüğü, akışkanın viskoz veya termal etkilerinin baskın olduğunu gösterir.

Mikrokanalda küçük bir karakteristik uzunluk, düşük bir Re (Reynolds sayısı) anlamına gelir ve bunun sonucunda düşük bir Pe (Peclet sayısı) oluşur. Bu nedenle yönetici enerji denkleminde konvektif terim ihmal edilebilir. Bu nedenle, herhangi bir sıcaklık artışı, sadece y-konumuna bağlı olarak bir noktada artış olarak kabul edilebilir (Tso, Hor, Chen, Kok, 2018). Denklem (3.31),

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = - \frac{k_f}{k_{nf}} Br \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^{n+1} \quad (3.33)$$

olarak tanımlıdır.

Literatürde, nanoakışkanların ısı iletim katsayılarını belirlemek amacıyla, mikron boyutlarındaki parçacıkları içeren karışımlar için geliştirilmiş modeller kullanılmaktadır. Bu modeller arasında en klasik ve yaygın olarak kabul edilenlerden biri, küresel parçacıklar için geçerli olan Maxwell (1954) modelidir. Maxwell modeline göre, nanoakışkanların ısı iletim katsayısı şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} \quad (3.34)$$

Yapılan çalışmada da Maxwell (1954) modeli kullanılmıştır ve Denklem (3.34) Denklem (3.33)'de yerine yazılarak sıcaklık dağılımını veren denklem aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = - \frac{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi} Br \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)^{n+1} \quad (3.35)$$

3.4. Sınır Şartları

Gaz akışlarında meydana gelen sıcaklık sıçraması şartı, sıvı akışları için geçerli olmadığına dikkat edilmelidir (Kiyasatfar, 2018). Bu nedenle, bu çalışmada enerji denklemi sıcaklık sıçraması olmayan koşullar altında çözülmüştür.

Denklem (3.35)' de yer alan sıcaklık dağılımını veren denkleminin sınır şartları

$$y = +H \quad T = T_w \quad (3.36)$$

$$y = -H \quad T = T_w \quad (3.37)$$

Boyutsuz değişkenler

$$Y = \frac{y}{H}, \quad \theta = \frac{T - T_w}{T_c - T_w} \quad (3.38)$$

olmak üzere denklem (3.36) ve (3.37)'de tanımlanan sınır şartları, denklem (3.38)'da tanımlanan boyutsuz değişkenler kullanılarak boyutsuz sınır şartları elde edilmiştir.

$$Y = +1 \quad \theta = 1 \quad (3.39)$$

$$Y = -1 \quad \theta = 0 \quad (3.40)$$

3.5. Ortalama Sıcaklık ve Nusselt sayısı

Ortalama sıcaklık veya yığın akışkan sıcaklığı bir akışkanın belirli bir kesit boyunca sıcaklık değerlerinin hacimsel ortalamasıdır. Termodinamik ve akışkan mekaniği bağlamında, bu değer özellikle tam gelişmiş akışlarda kullanılır. Nield (2004), ortalama duvar ısı akısı ve ortalama duvar sıcaklığına dayanarak genel bir Nusselt sayısı tanımlamıştır.

$$T_m = \frac{\int \rho u T dA}{\int \rho u dA} \quad (3.41)$$

Şeklinde ifade edilir. Denklem (3.30)'de tanımlanan boyutsuz değişkenler kullanılarak,

$$\theta_m = \frac{\int U \theta dY}{\int U dY} = \frac{T_m - T_w}{T_c - T_w} \quad (3.42)$$

Boyutsuz ortalama sıcaklık elde edilmiştir.

Nusselt sayısı, ısı taşınım katsayısı, ısı akısı nanoakışkan için aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$Nu = \frac{h_{nf} 2H}{k_{nf}} \quad (3.43)$$

$$h_{nf} = \frac{q}{T_m - T_w} \quad (3.44)$$

$$q = -k_{nf} \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=\mp H} \quad (3.45)$$

Denklem (3.44) ve denklem (3.45), denklem (3.43)'de yerine konur ve denklem (3.38)'de tanımlanan boyutsuz değişkenler kullanarak yazılırsa Nusselt sayısı,

$$Nu = -\frac{T_c - T_w}{T_m - T_w} \left. \frac{d\theta}{dY} \right|_{y=\mp H} = -\frac{1}{\theta_m} \left. \frac{d\theta}{dY} \right|_{y=\mp H} \quad (3.46)$$

elde edilir.

3.6. Sayısal Yöntem ve Metot

Bu çalışmada, daimi, tam gelişmiş laminer akışta, manyetohidrodinamik (MHD) kayma akış rejiminde, Newtonian olmayan bir nanoakışkanın, alt plakanın sabit olduğu ve üst plakanın hareket ettiği iki mikro paralel plaka arasından hız ve sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Hız ve sıcaklık dağılımını belirlemek için elde edilen diferansiyel denklemler ve sınır koşulları son derece karmaşık ve nonlinear (doğrusal olmayan) olduğundan, analitik veya sayısal bir çözüm bulmak için, yüksek dereceli Chebyshev spektral yöntemi kullanılarak MATLAB programlama dili içinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

Spektral yöntemin temel fikri, interpolasyon yapan global polinomların kesin türevlerinin yerine geçmektir. Chebyshev spektral yönteminde, interpolasyon polinomları olarak Chebyshev polinomları kullanılır. Bu yöntemler çok verimlidir ve daha yüksek doğruluk oranı sağlar. Bu yöntem, doğrusal olmayan terimlerle başa çıkma avantajına sahiptir. Trefethen, (2000), Chebyshev spektral yerleştirme yöntemi kullanarak sayısal çözümler bulmuştur. Chebyshev polinomları, çeşitli sınır değer problemlerinin sayısal çözümlerini bulmada başarıyla kullanılmış ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çalışılmasında başarıyla kullanılmıştır (Canuto ve diğerleri, 1993).

Chebyshev spektral yöntemini uygulamak için, $[-1, 1]$ aralığındaki $u(y)$ fonksiyonunu ele alınır. Aralığı, Chebyshev noktalarını (Chebyshev-Gauss-Lobatto noktaları) kullanarak ayıklaştırıyoruz:

$$y_j = \cos\left(\frac{j\pi}{N}\right) \quad j = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3.47)$$

$u(y)$ fonksiyonunun n . türevi Chebyshev noktalarında şu şekilde verilir:

$$u^n(y_i) = \sum_{j=0}^N D_{kj}^n f(y_j), \quad n = 1, 2. \quad (3.48)$$

Burada,

$$D_{kj}^{(1)} = \frac{4\gamma_j}{N} \sum_{n=0}^N \sum_{l=0, n+1=tek}^{n-1} \frac{n\gamma_n}{c_l} T_l(y_j) T_N(y_j), \quad k, j = 0, 1, \dots, N \quad (3.49)$$

$$D_{kj}^{(2)} = \frac{2\gamma_j}{N} \sum_{n=0}^N \sum_{l=0, n+1=tek}^{n-2} \frac{1}{c_l} \gamma_n n (n^2 - l^2) T_l(y_j) T_N(y_j), \quad k, j = 0, 1, \dots, N \quad (3.50)$$

şeklinde tanımlıdır ve $T_n(y_j)$ Chebyshev polinomlarıdır.

Denklem (3.18) ve (3.35)' de Chebyshev polinomlarına dönüştürerek yazarsak

$$B = \varepsilon_1 \left[\frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \frac{n}{\text{Re}} \left(D_{kj}^{(1)} U_j \right)^{n-1} D_{kj}^{(2)} U_j - M U_j \right] \quad (3.51)$$

$$D_{kj}^{(2)} \theta_j = - \frac{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi} \text{Br} \left(D_{kj}^{(1)} U_j \right)^{n+1} \quad (3.52)$$

denklemleri elde edilir.

Chebyshev spektral yöntemi uygulandıktan sonra hesaplamalar için MATLAB programla dili içinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu program, denklemlerin sayısal çözümlerini üretmek için kullanılmış ve sonuçlar grafiklerle sunulmuştur.

BÖLÜM 4

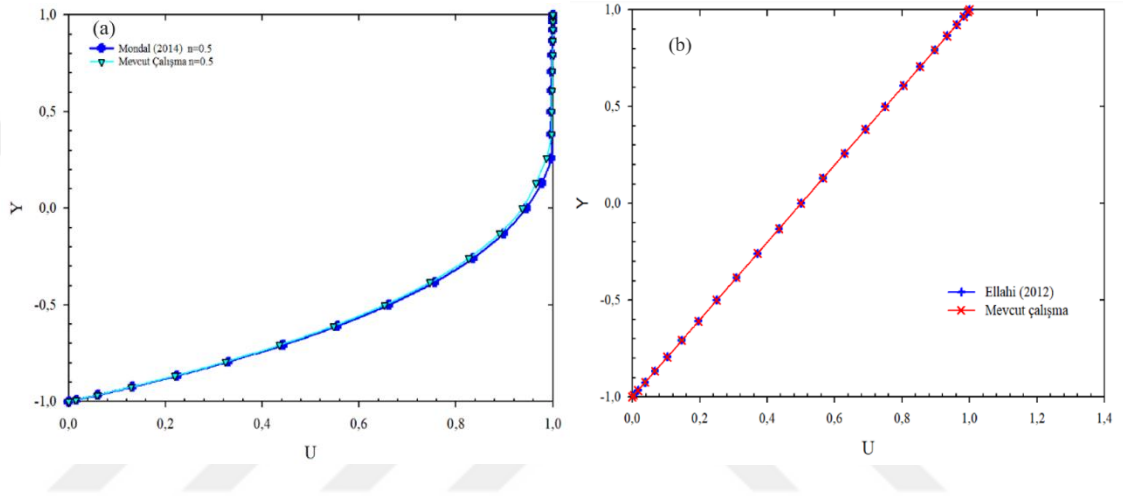
SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, daimi, manyetohidrodinamik (MHD) kayma akış rejiminde, Newtonian olmayan bir nanoakışkanın, sonsuz uzunluktaki paralel plakalar arasındaki hidrodinamik ve ısı olarak tam gelişmiş laminar akışında, hız, sıcaklık dağılımı ve Nusselt sayısını incelenmiştir. Bu çalışmada, sınır şartı olarak birinci dereceden lineer Navier kayma hızı modeli kullanılmıştır. Elde edilen diferansiyel denklemler ve sınır koşulları son derece karmaşık ve doğrusal olmadığından nümerik çözümünü elde etmek için yüksek dereceli Chebyshev spektral yöntemi kullanılarak MATLAB programlama dili içinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir ve sonuçlar grafiklerle sunulmuştur.

Bu çalışmada manyetik alan parametresi $M=0$ ile $M=3$ arasında, nanopartikül hacim fraksiyonu $0.00 \leq \phi \leq 0.05$, viskoz yayılım etkilerini incelemek için $Br = -1, -0.5, -0.1, 0.1, 0.5, 1$, kayma hızı katsayısı $\beta_v = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$ ve mikro kanallarda tam gelişmiş laminar akış için literatürde önerildiği aralıklarda olan $Re=25$, baz akışkan olarak EVA ve nanopartikül olarak Al_2O_3 kullanılmıştır. Baz akışkan EVA (etilen-vinil asetat) ideal bir Power-Law akışkanı olup, akışkan davranış indeksi $n=0.76, 0.8, 0.91$ değerlerindedir. Tablo 4.1’de kullanılan baz akışkan ve nanopartikülün fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Baz akışkan ve nanopartikülün fiziksel özellikleri

	$\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	$k \text{ (W/mK)}$
EVA (Baz akışkan)	$\rho_f = 915.6$	$k_f = 0.0148608$
Al_2O_3 (Nanopartikül)	$\rho_p = 3970$	$k_p = 40$



Şekil 4.1. Mevcut çalışmanın literatürdeki çalışmalar ile kıyaslanması

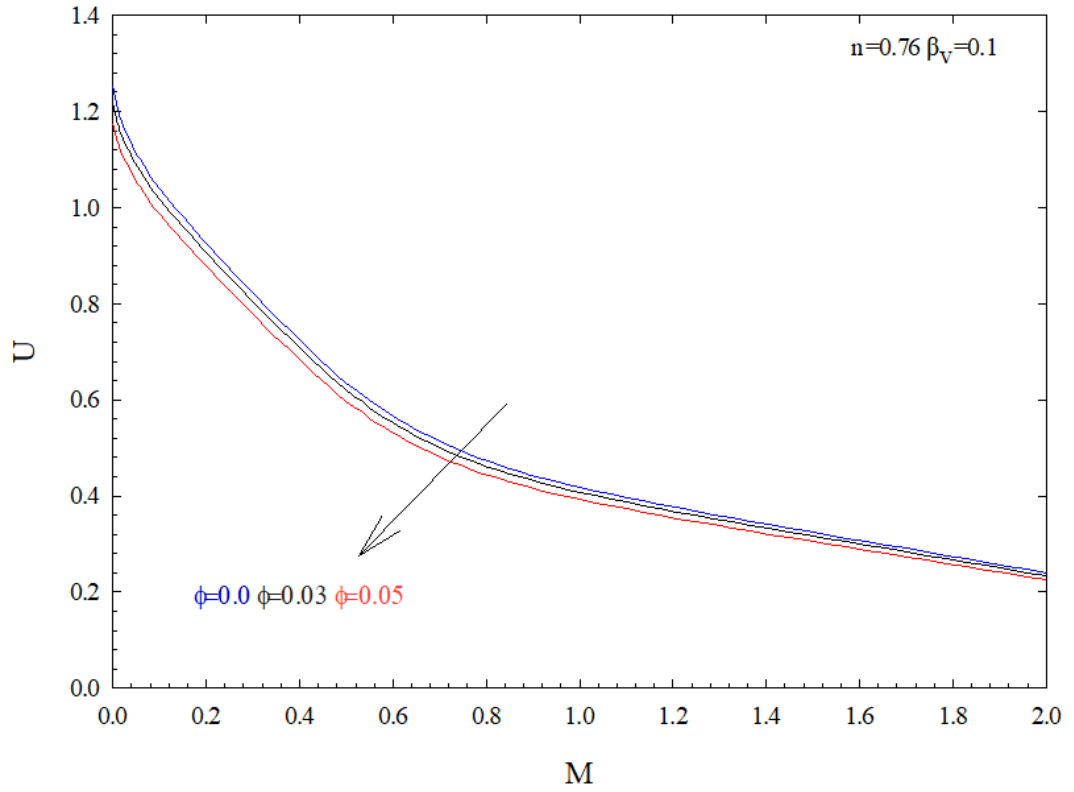
Şekil 4.1(a)'da çalışma Mondal'ın (2014) çalışmasıyla kıyaslanmıştır. Mondal (2014) çalışmasında asimetrik olarak ısıtılmış iki paralel plakanın Couette akışında Newtonian olmayan akışkan için farklı basınç gradyanındaki davranışını ve entropi üretimini incelemiştir. Newtonian olmayan akışkan için Power-Law modelini kullanmıştır ve düşük basınç gradyanı için hız profili Şekil 4.1(a)'da görüldüğü gibidir. Çalışmasında Pseudoplastik akışkanlar için $n=0.5$ incelemiştir. Mevcut çalışmanın doğruluğunu kanıtlamak için Mondal'ın çalışmasındaki değerler alındığında $M=0$, $n=0.5$, $B=-0.2$, $Br=0$, $\phi=0.0$, $\beta_v=0.0$ benzerlik gösterdiği Şekil4.1(a)'da hız profili için görülmektedir.

Şekil 4.1(b)'de çalışma Ellahi'nin (2012) çalışmasıyla kıyaslanmıştır. Ellahi (2012) çalışmasında, tam gelişmiş laminar Newtonian olmayan ve dilitant akışkanlar için ($n=2$) durumu için incelemiştir. Ayrıca, üst plakanın U_0 hızında pozitif x-yönlü hareket

ettiği ve alt plakanın sabit olduğu koşullarda akışın basınç içermediğine dikkat çekmiştir. Mevcut çalışmanın doğruluğunu kanıtlamak için Ellahi'nin çalışmasındaki değerler alındığında $M=0$, $n=2$, $B=0$, $Br=0$, $\phi=0.0$, $\beta_v=0.0$ benzerlik gosterdiği Şekil4.1(b)'da hız profili için gorlmektedir.

Bu çalışmada da akış st plakanın hareketiyle sağlanmaktadır ve basınç gradyanı sıfırdır. Denklem (3.19)'da tanımlanan basınç gradyanı $B=0$ olarak uygulanmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmada elde edilen hız profili, incelenen tüm Power-Law akışkan tipleri için yayınlanmış sonuçlarla benzerlik gostermektedir.

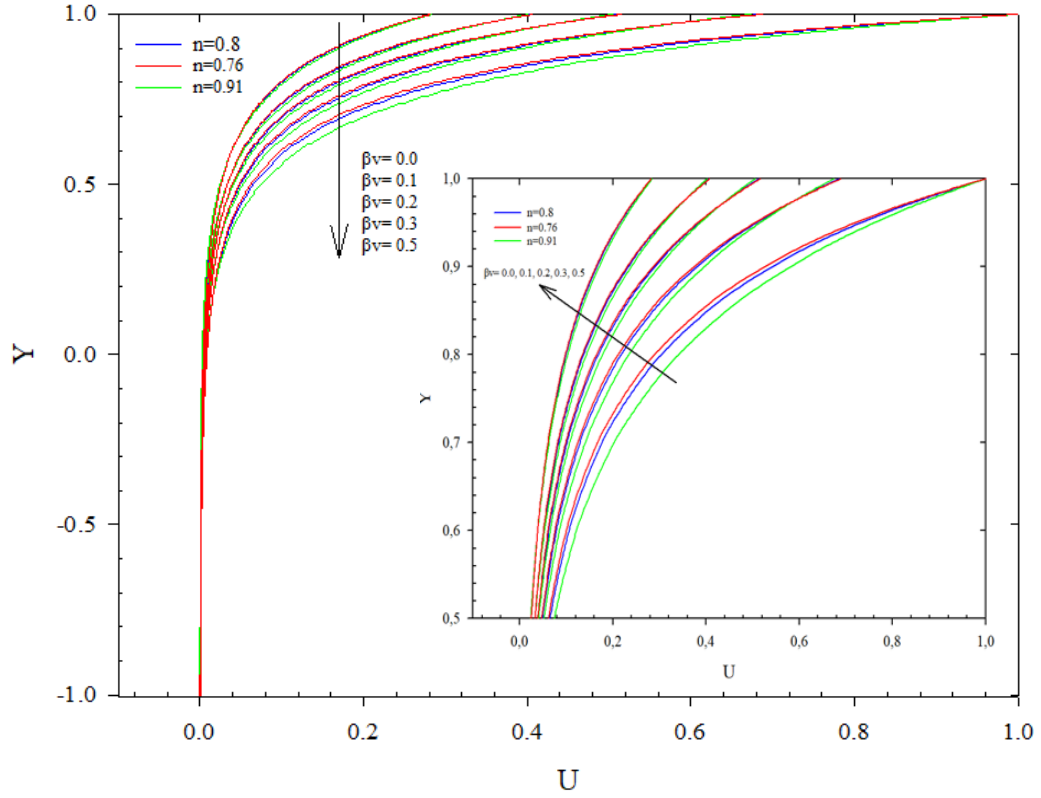




Şekil 4.2. Hız profilinin manyetik alan parametresi M ve ϕ nanopartikül hacim fraksiyonu ile değişimi

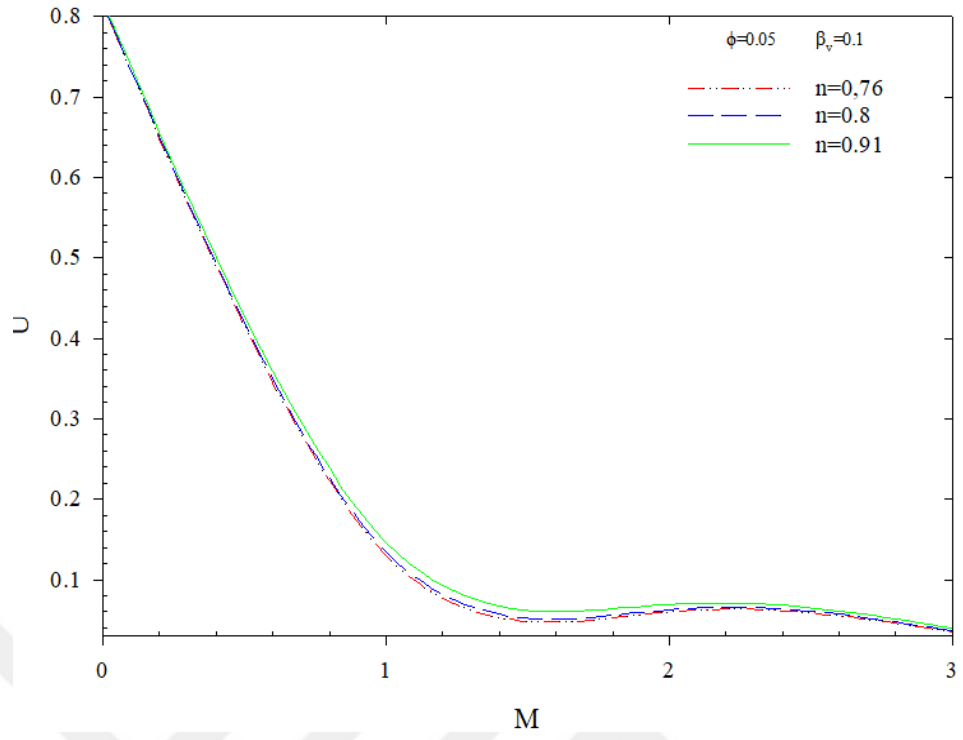
Şekil 4.2’de, farklı ϕ nanopartikül hacim fraksiyonu oranları için hızın manyetik alan parametresi ile değişimi gösterilmiştir. Nanopartikül hacim fraksiyonunun ve manyetik alan etkisinin artması ile hız profilinin baskılanması sonucu hız azalmıştır.

Seetharaman ve Sangwai'nin (2020) çalışmasında, nanopartikül eklenmesinin pseudoplastik özellik gösteren akışkanların viskozitesini daha etkili bir şekilde azalttığı belirtilmiştir. Viskozitenin azalması, akışkanın daha kolay deformasyona uğraması anlamına gelir, bu da hız profilinin artmasına neden olur. Yani, viskozitenin azalması, akışkanın hız profilini artırır. Bu etki, özellikle yüksek deformasyon hızlarında daha belirgin hale gelir ve akışkanın akış özelliklerini iyileştirir.

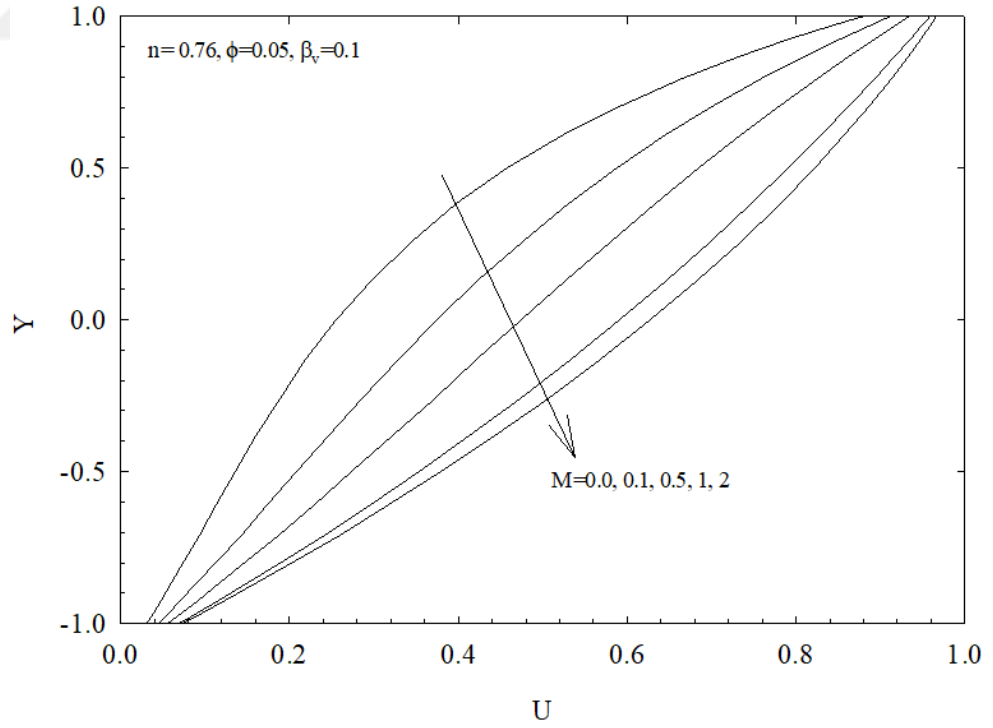


Şekil 4.3. β_v kayma hızı katsayısının hız profiline etkisi $M=1$, $\phi=0.03$

Şekil 4.3, Manyetik alan etkisi $M=1$ ve nanopartikül hacim fraksiyonu $\phi=0.03$ iken, β_v kayma hızı katsayısının hız profiline etkisini göstermektedir. Hareket halindeki üst plakanın yakın bölgesinde, β_v kayma hızı katsayısı arttıkça akışkanın hızında bir azalma olduğu görülmektedir. β_v kayma hızı katsayısı arttıkça, yüzey ve akışkan arasındaki etkileşim azalır. Bu durum, özellikle hareket eden yüzeylerde önemlidir. Hareket eden üst plaka, akışkanı daha az sürükler, bu da akışkanın genel hızının azalmasına neden olur.

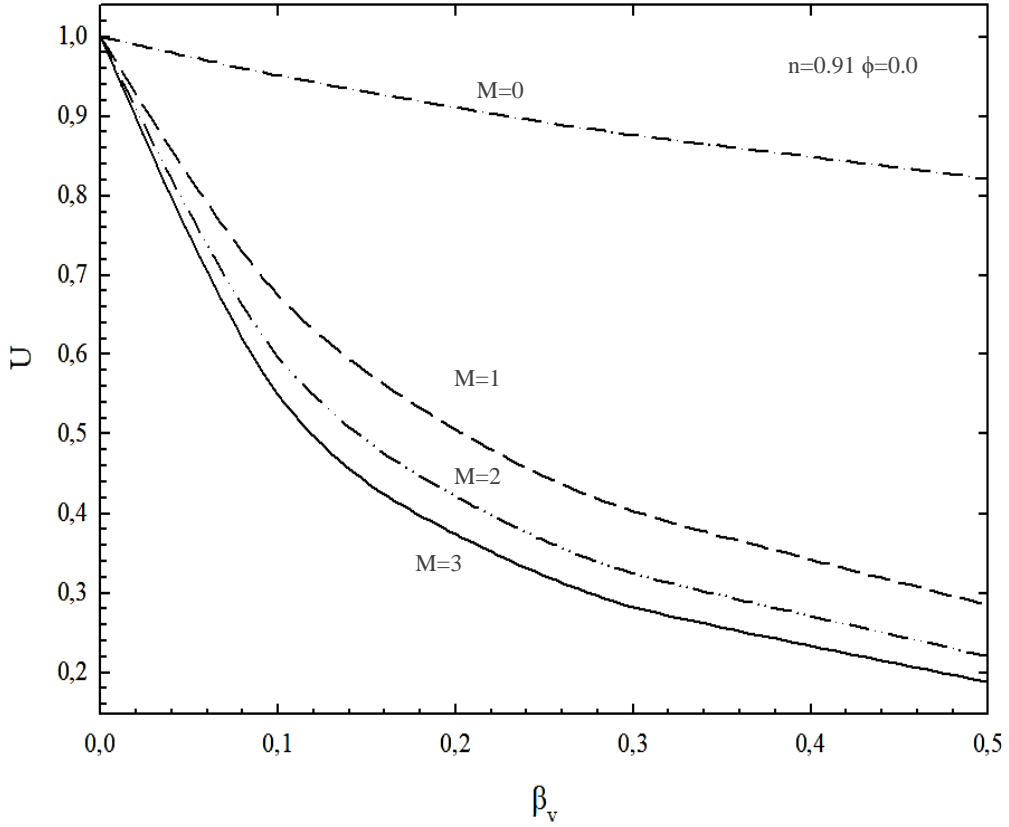


Şekil 4.4. Hız profilinin Manyetik alan parametresi ve n akış davranışı indeksi ile değişimi



Şekil 4.5. $n=0.76$, $\phi=0.05$, $\beta_v=0.1$ için, Manyetik alan parametresinin hız profili değişimi

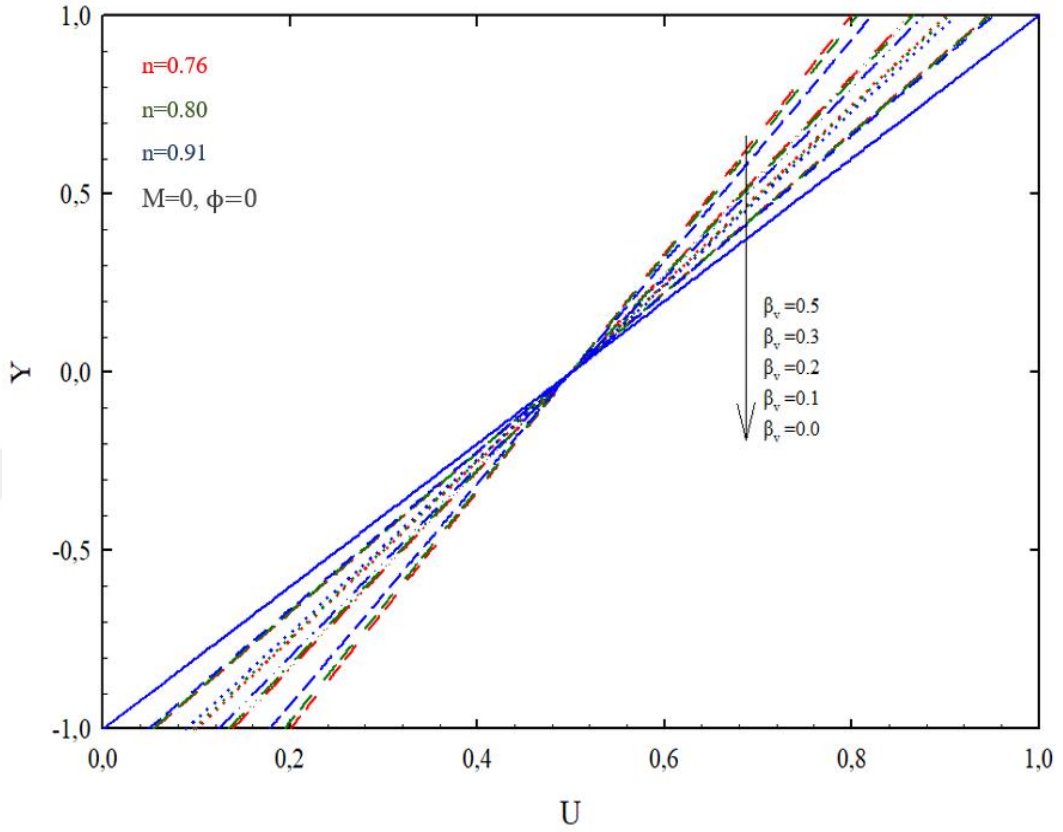
Şekil 4.4 ve Şekil 4.5, manyetik alan parametresi M 'in farklı değerleri için, Newtonian olmayan nanoakışkanın hız profillerini sunmaktadır. Şekil 4.5, manyetik alanın uygulanması sonucu hızda yaklaşık %2.4'lük bir azalma olduğunu göstermektedir. Güç yasası modelindeki Newtonian olmayan nanoakışkanlar için, tam gelişmiş hız profili, elektromanyetik kuvvetlerin varlığında belirgin değişimler göstermektedir. Artan manyetik alan etkisi M ile, Newtonian olmayan nanoakışkanın boyutsuz hız profilinin karakteristik yapısı değişmektedir. Manyetik alanın etkisi altında, Denklem (3.17)'de yer alan momentum denkleminde kendini göstermekte ve bu, aksel akış yönünde bir direnç oluşturmaktadır.



Şekil 4.6. Hızın profilinin kayma katsayısı β_v ve manyetik alan parametresi M ile değişimi

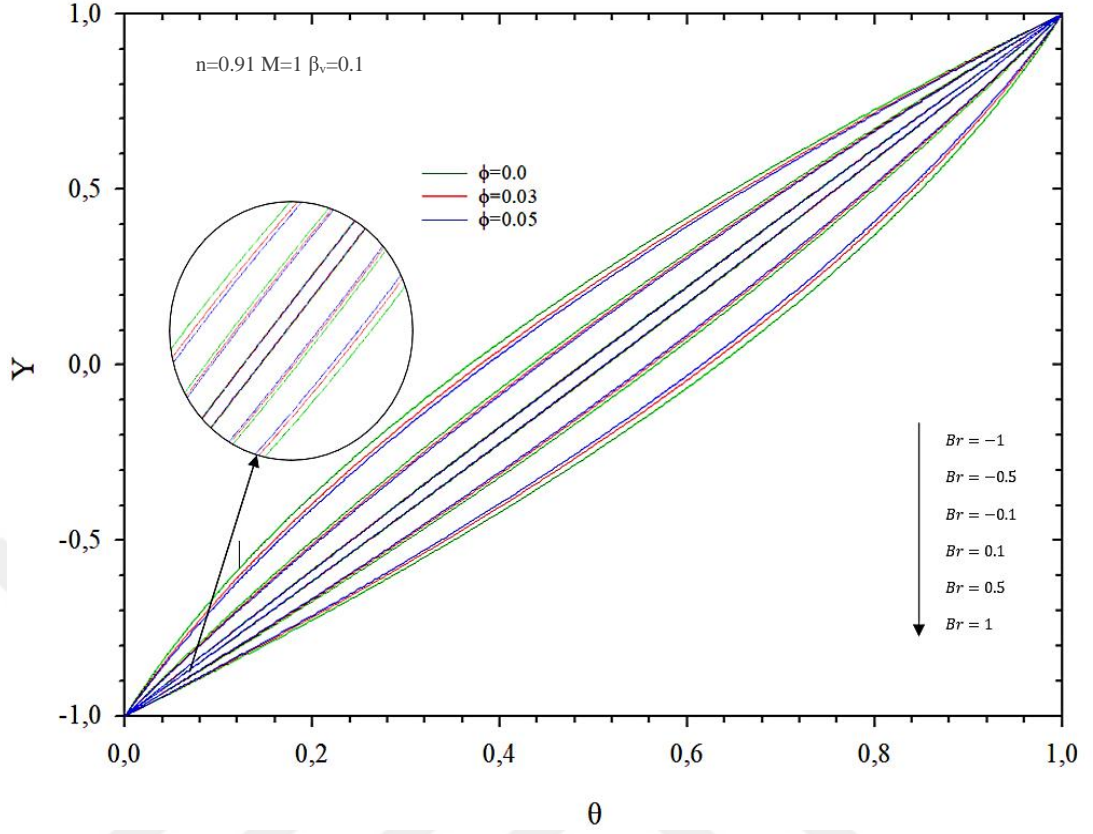
Şekil 4.6, Kayma katsayısı β_v ve manyetik alan parametresi M 'in hız profili üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Manyetik alan parametresinin ve kayma parametresi β_v şiddeti arttıkça, hız azalma eğilimi göstermektedir. Kayma katsayısı, akışkanın viskozitesini ve kayma gerilimini temsil eder; artışı, hız profilinin düşmesine yol açar.

Manyetik alanın varlığında, akışkan hareketi Lorentz kuvveti ile baskılanır ve bu da hız profiline azalmasına neden olur.



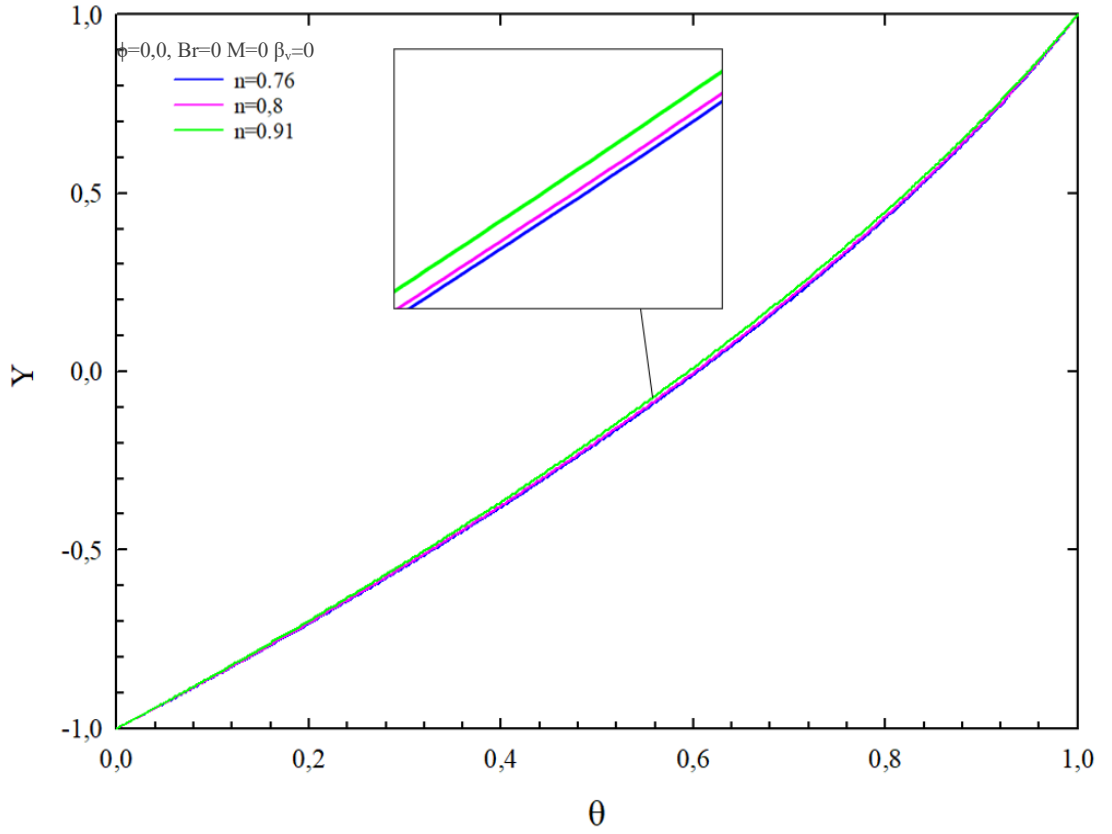
Şekil 4.7. Hız profiline n akış davranış indeksi ve β_v kayma hızı parametresi ile değişimi

Manyetik alanın etkisi olmaksızın baz akışkan EVA'nın hız profili, kayma hızı parametresi β_v ve akış davranış indeksi n değerlerine bağlı olarak Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Hareketsiz alt plakada akış davranış indeksi n artmasıyla hız azalmakta, hareketli üst plakada ise akış davranış indeksi arttıkça hız artmaktadır. Hız kayma nedeniyle hareketli plakada azalır, buna karşılık sabit plakada hız artar. Bunun nedeni, Kayma hızı katsayısı arttıkça, yüzey ve akışkan arasındaki sürtünme azalır. Bu, yüzeyin akışkanı sürüklenme kapasitesini azaltarak akışkanın genel hızında bir azalmaya yol açar. Bu durum, özellikle hareket eden yüzeylerin olduğu sistemlerde belirgin hale gelir ve akışkanın hız profiline düşüş olarak gözlemlenir.



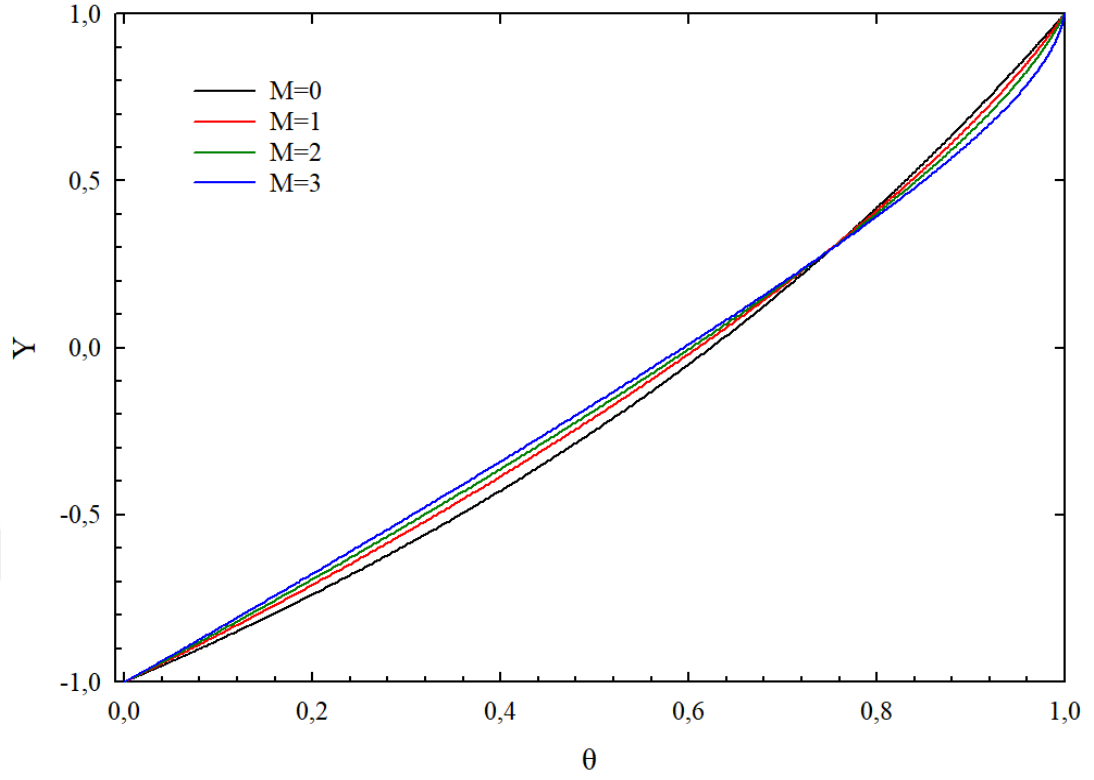
Şekil 4.8. Sıcaklık profilinin Br ve ϕ değişimi

Şekil 4.8, Brinkman sayısının ($-1 \leq Br \leq 1$ aralığında) nanopartikül hacim fraksiyonu manyetik alan etkisi altında, sıcaklık profili üzerindeki etkilerini göstermektedir. Brinkman sayısının pozitif değerlerinde, akışkanın sıcak bir yüzey tarafından ısıtıldığını, buna karşılık Brinkman sayısının negatif değerlerinde ise soğuk bir yüzey tarafından soğutulduğu bilinmektedir. Şekil 4.8'de gösterildiği üzere Br değerinin artmasıyla birlikte sıcaklık dağılımının daha simetrik hale geldiği ve eğrilerin daha dik bir eğim kazandığı gözlemleniyor. Bu, artan Br değerlerinin sıcaklık farklarını arttırdığını ve dolayısıyla sıcaklık profilini daha belirgin hale geldiğini gösteriyor. $\phi=0.0$, $\phi=0.03$, $\phi=0.05$ değerleri incelenmiştir. ϕ değerinin artmasıyla birlikte sıcaklık profillerinin daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülüyor. Yani, ϕ arttıkça (daha fazla nanopartikül içeriği ile), sıcaklık dağılımı daha belirgin hale geliyor. Br değerinin pozitif yönde artması, sıcaklık profilini artırırken, ϕ değerinin artması sıcaklık dağılımını daha belirgin hale getirmektedir.



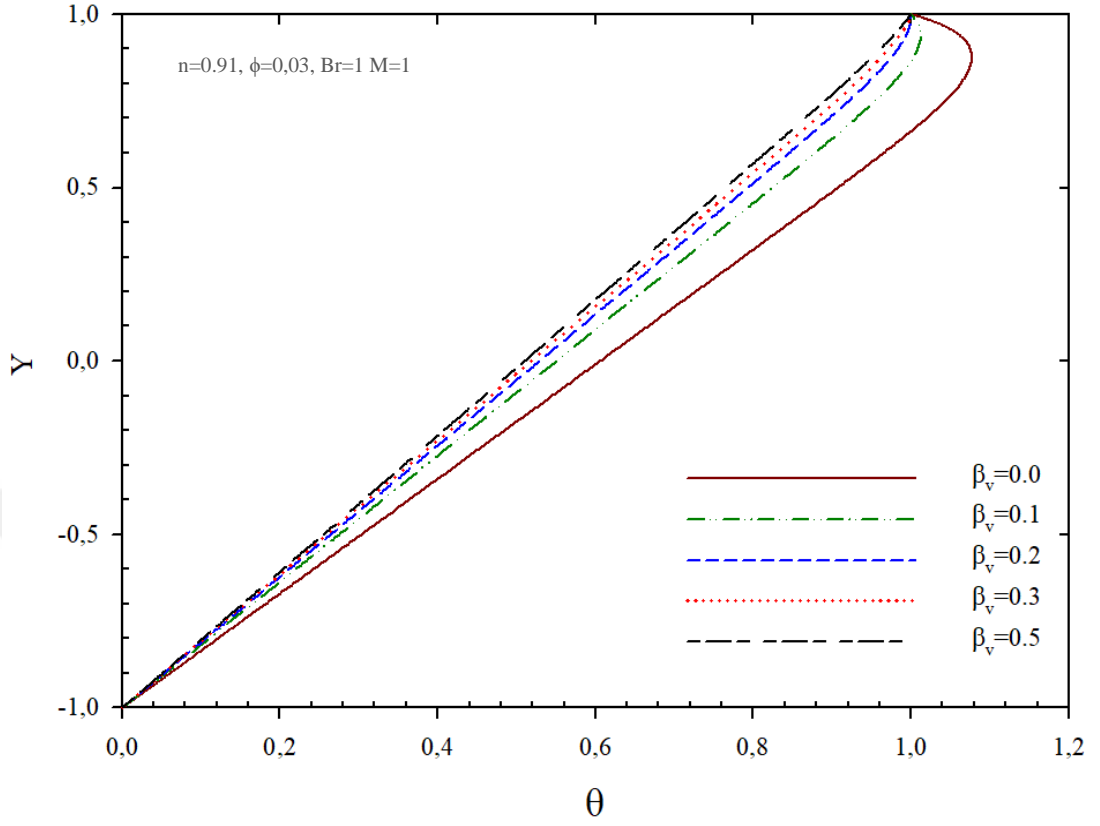
Şekil 4.9. Sıcaklık profilinin akışkan davranış indeksi ile değişimi

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi akışkan davranış indeksi arttıkça sıcaklık azalmaktadır. Newtonian olmayan akışkanlarda, viskozitenin artması, iç sürtünmeyi ve enerji dağılımını artırmaktadır. Bu, akışkanın homojen bir şekilde ısınmasına yol açar ve duvarlar ile akışkan arasındaki sıcaklık farkını azaltmaktadır ve bu nedenle sıcaklık gradyanını düşmektedir. $n=0.76$ ile $n=0.8$ arasında %0.43 oranında boyutsuz sıcaklıkta azalma görülürken, $n=0.8$ ile $n=0.91$ arasında ise %0.87 oranında azalma görülmektedir. EVA akışkanının en yüksek ve en düşük n değerleri arasındaki boyutsuz sıcaklık farkı %1,3 olarak hesaplanmıştır.



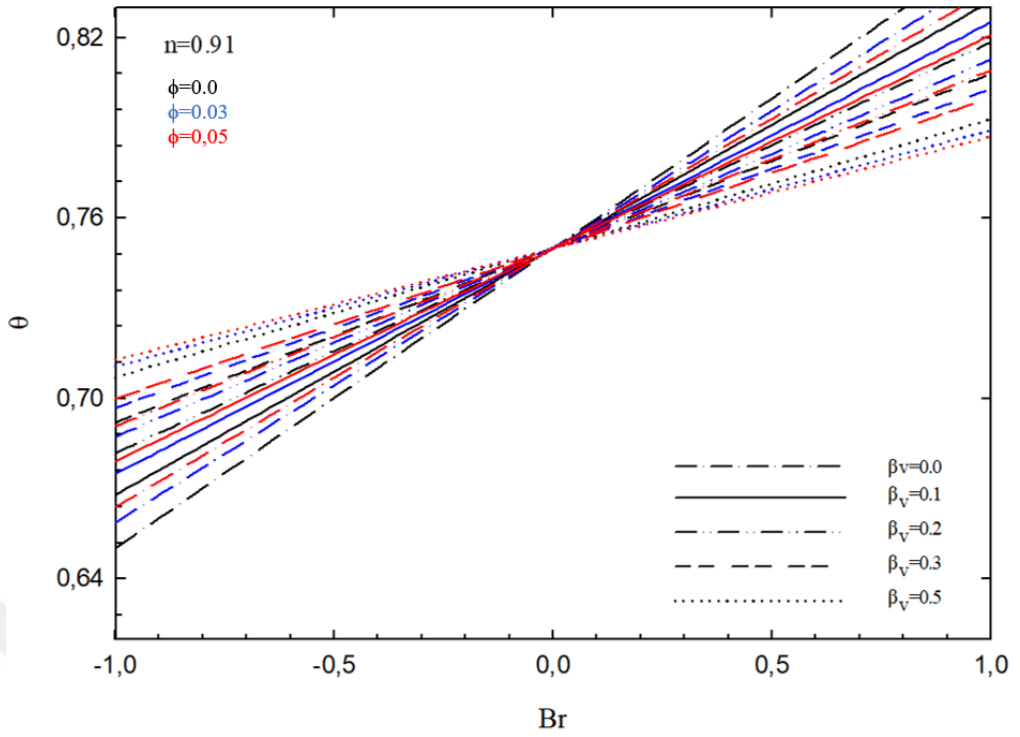
Şekil 4.10. Sıcaklık profilinin M ile değişimi

Şekil 4.10, manyetik alan parametresi M artışının sıcaklık profili üzerindeki etkisini göstermektedir. Manyetik alan parametresi M'in artışıyla sıcaklık profili artış göstermektedir. M'nin artışı ile Lorentz kuvvetinin güçlenmesini ve bu kuvvetin akışkan içerisindeki katmanlar arası sürtünmeyi artırarak akışa karşı direnç oluşturduğunu göstermektedir. Bu artan direnç, sıcaklığın artmasına yol açmaktadır.

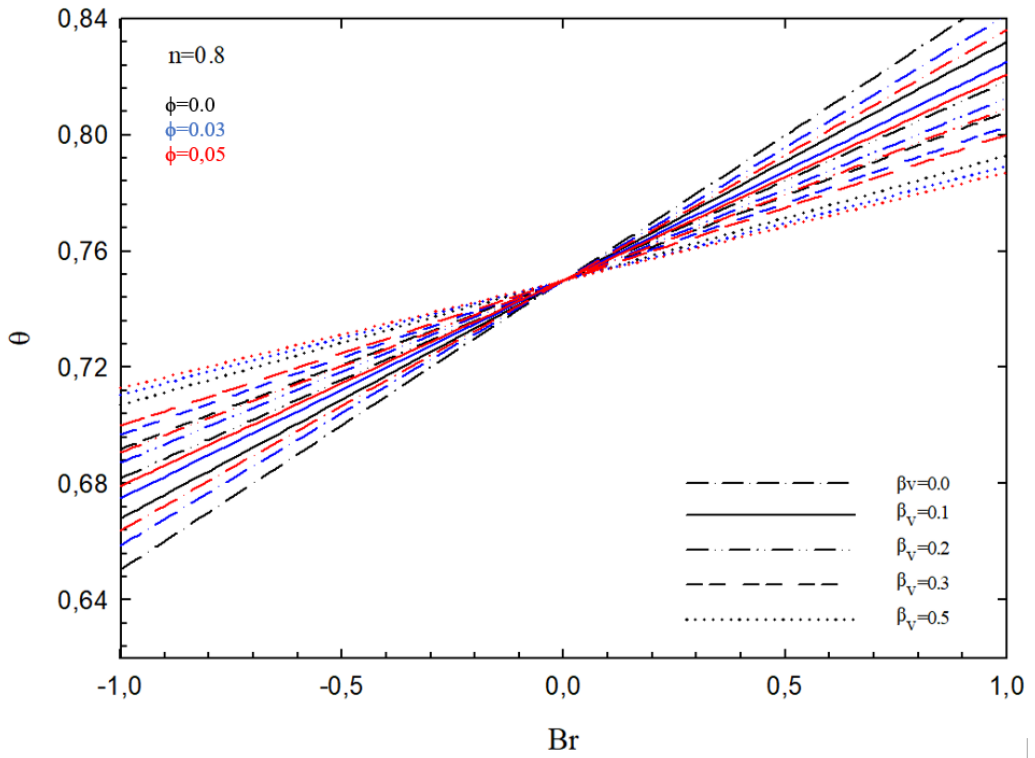


Şekil 4.11. Sıcaklık profilinin β_v kayma hızı katsayısı ile değişimi

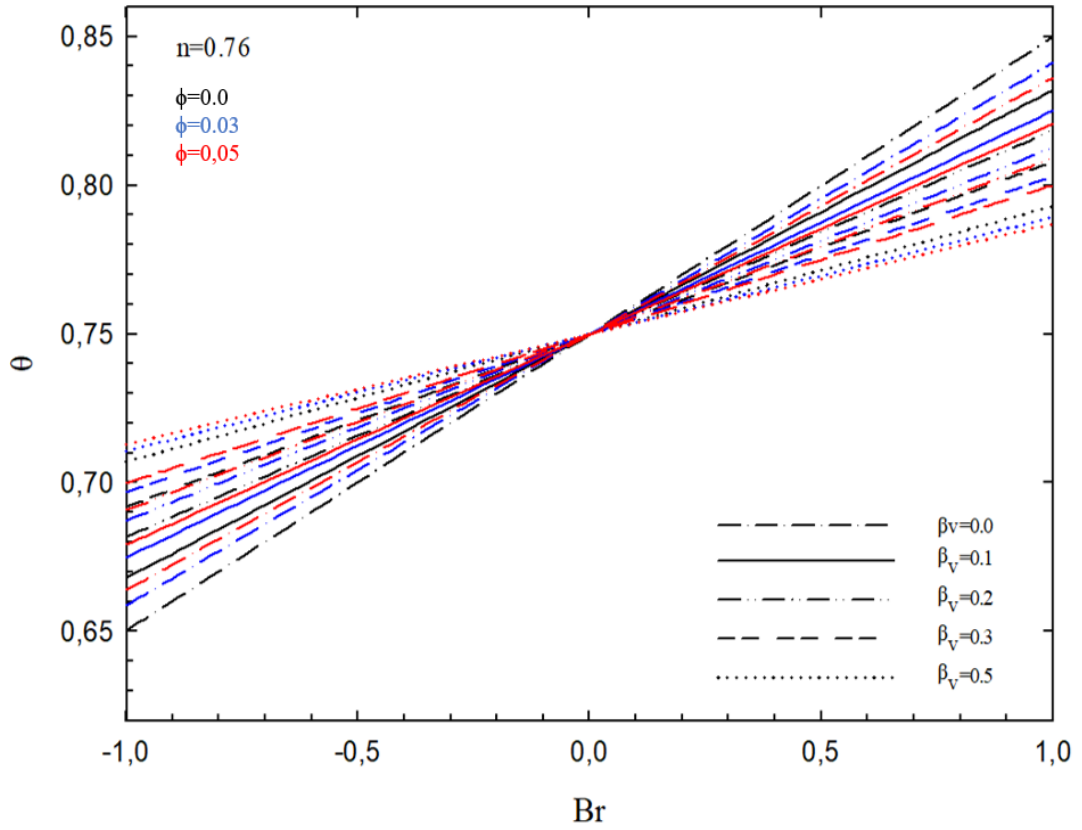
Şekil 4.11’de, β_v değerlerinin 0.0, 0.1, 0.2, 0.3 ve 0.5 olduğu durumlar için sıcaklık profilinin değişimi y ekseninde verilmiştir. Analiz, $n=0.91$, $\phi=0.03$, $Br= M=1$ değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Kayma hızı katsayısının artmasıyla sıcaklık profilinde belirgin bir artış olduğunu grafikte görülmektedir.



Şekil 4.12. Sıcaklık profilinin Br , ϕ ve β_v kayma katsayısı ile değişimi

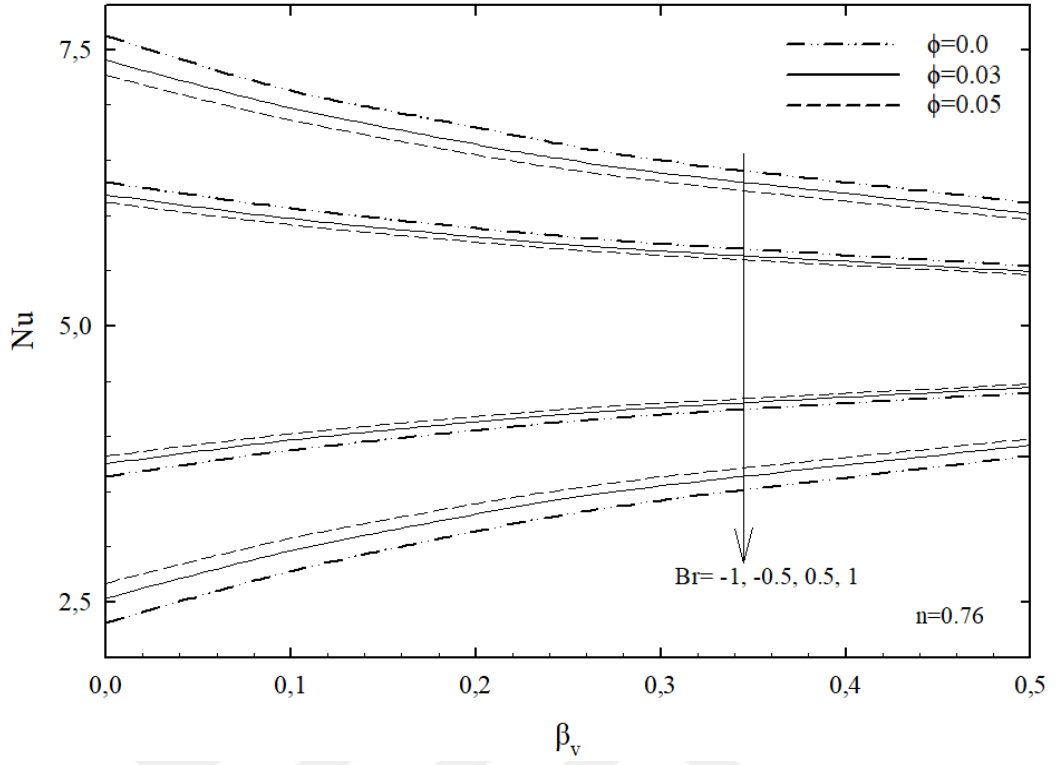


Şekil 4.13. Sıcaklık profilinin Br , ϕ ve β_v kayma katsayısı ile değişimi

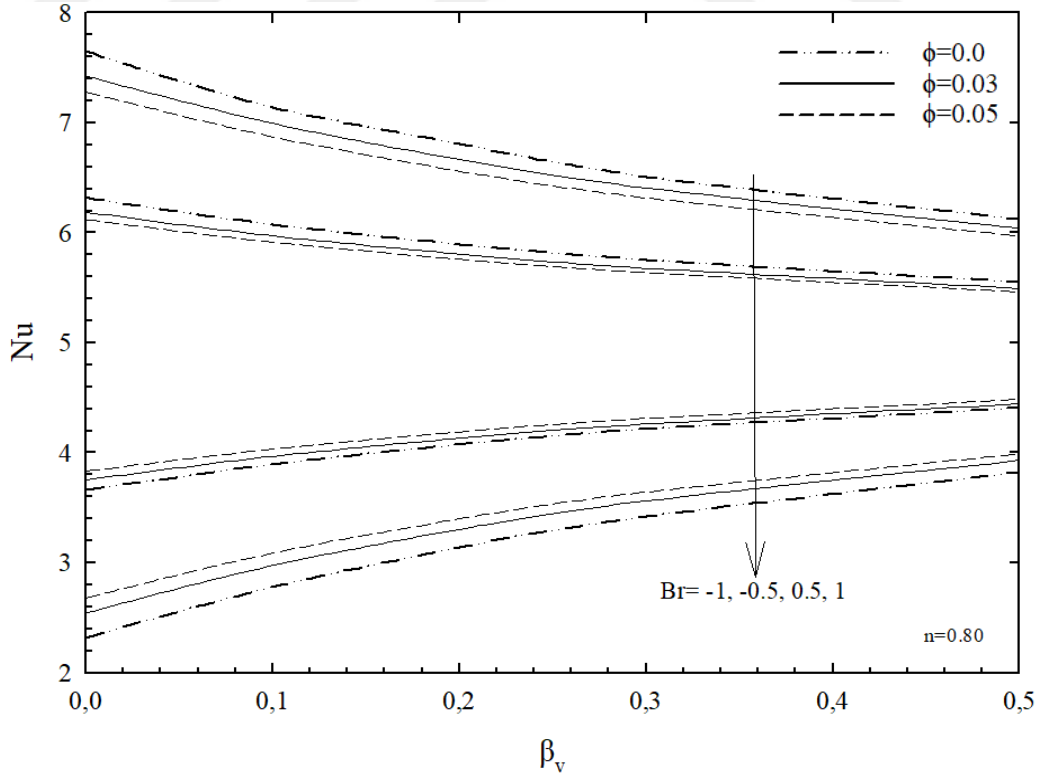


Şekil 4.14. Sıcaklık profilinin Br, ϕ ve β_v kayma katsayısı ile değişimi

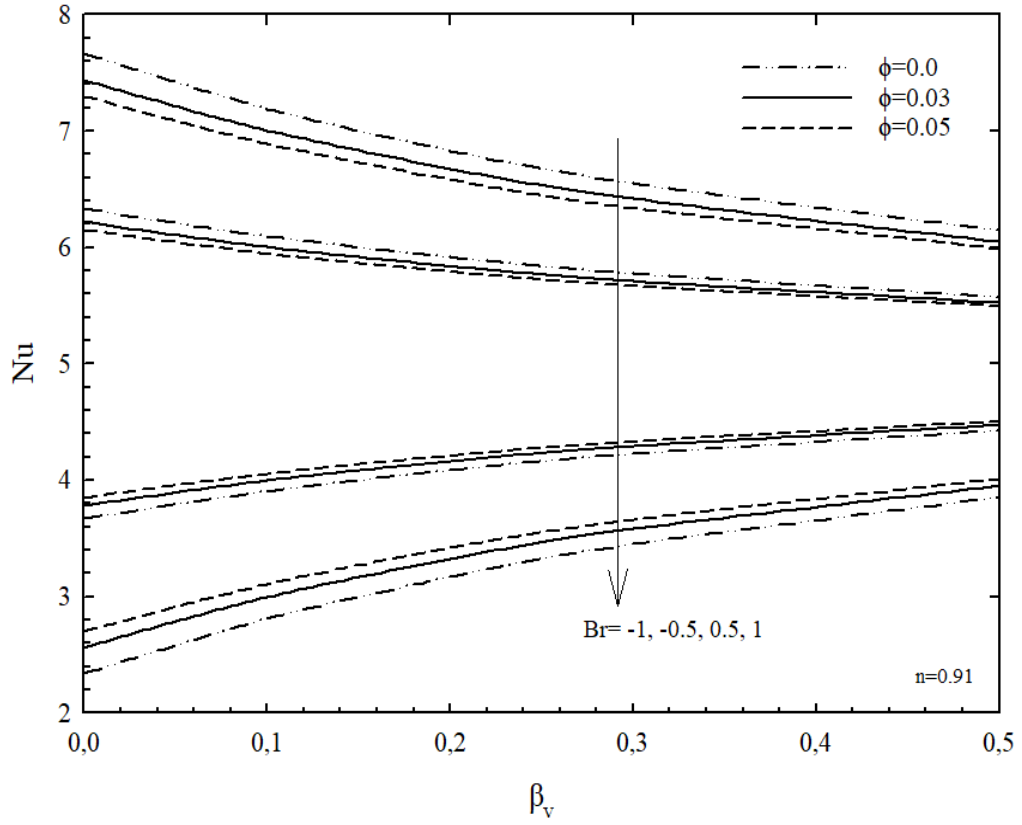
Şekil 4.12 ile 4.14'te sıcaklık profilinin Brinkman sayısı, β_v kayma katsayısı ve nanopartikül hacim fraksiyonuna göre nasıl değiştiğini $n=0.91$, $n=0.8$ ve $n=0.76$ indekslerinde göstermektedir. Brinkman sayısı negatif değerlerden pozitif değerlere doğru değişirken, θ genel olarak artmaktadır. Brinkman sayısı, akışkanın sıcak veya soğuk bir yüzey tarafından ısıtılması veya soğutulması durumlarını temsil eder. Pozitif Br değerleri akışkanın ısıtıldığı, negatif Br değerleri ise soğutulduğu durumları ifade eder. Şekilden görüldüğü gibi, Br sayısının artmasıyla (yani ısıtma etkisinin artmasıyla) sıcaklıkta genel bir artış görülmektedir. Sıcaklık profilinde, Pozitif Brinkman sayılarında β_v artmasıyla %1.1'lik bir azalma gözlemlenirken, Brinkman sayısının negatif değerlerinde β_v artmasıyla %1.2'lik bir artış gözlemlenmiştir. Eva baz akışkanına %3 oranında Al_2O_3 eklendiğinde %1.3 lük, Eva baz akışkanına %5 oranında Al_2O_3 eklendiğinde %3'lük bir artışla sıcaklık profilinin değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. Nusselt sayısının β_v , Br ve ϕ ile değişimi

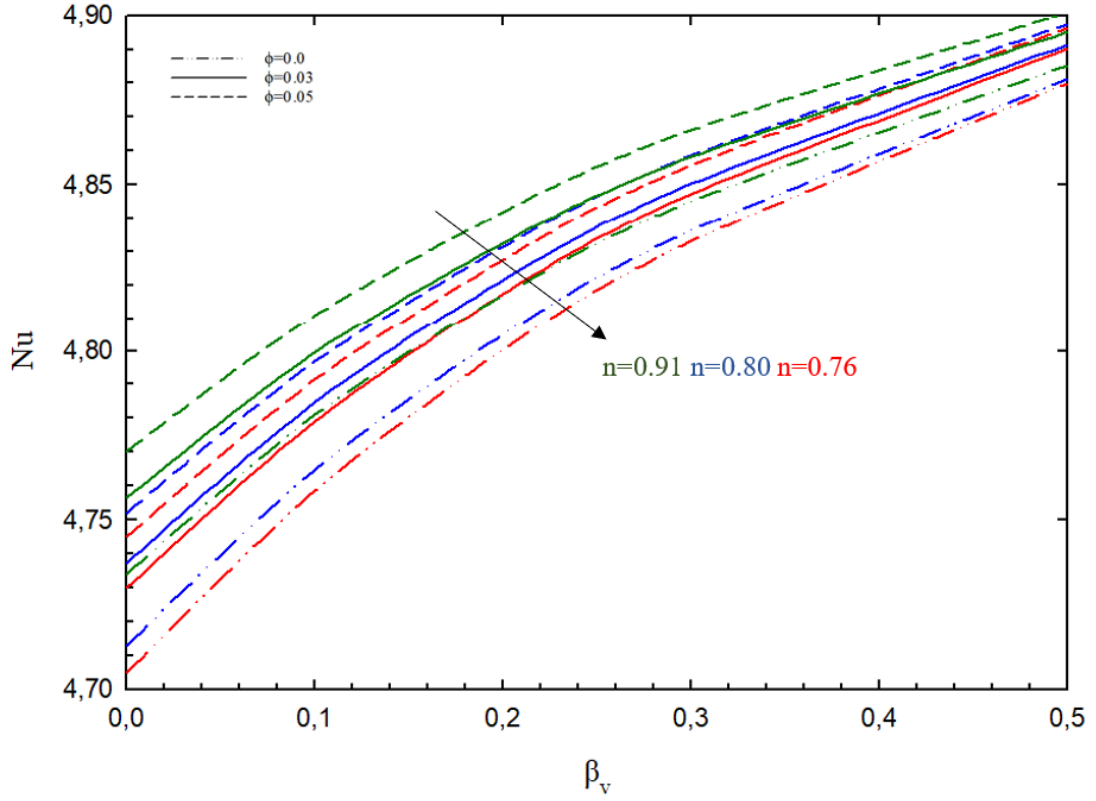


Şekil 4.16. Nusselt sayısının β_v , Br ve ϕ ile değişimi



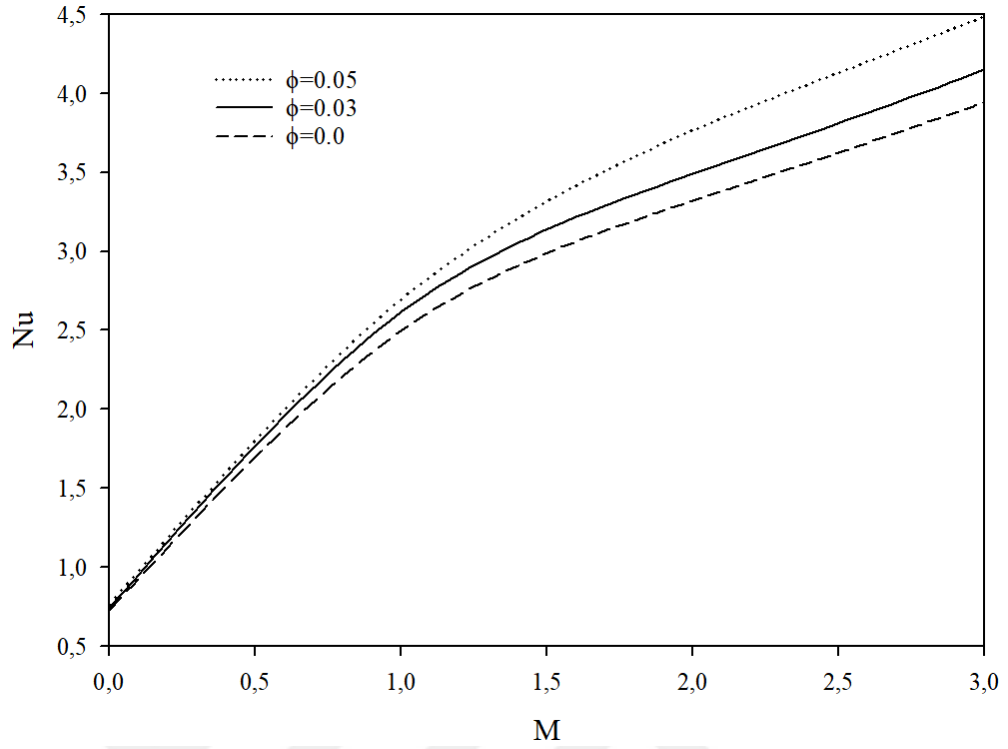
Şekil 4.17. Nusselt sayısının β_v , Br ve ϕ ile değişimi

Şekil 4.15-4.17, Nusselt sayısının kayma hızı katsayısı, Brinkman sayısı ve nanopartikül hacim fraksiyonu ile değişimi gösterilmektedir. Grafikler, $n=0.76$, $n=0.8$, $n=0.91$ ve $M=0$ durumu için çizilmiştir ve ısı transferinin bu parametrelerle nasıl değiştiğini göstermektedir. Nusselt sayısında, pozitif Brinkman sayılarında β_v artmasıyla arttığı gözlemlenirken, Brinkman sayısının negatif değerlerinde β_v artmasıyla azalma eğilimindedir. $n=0.91$ $\phi=0.0$ (baz akışkan) durumunda Nu sayısının en düşük olduğu değerle Nu sayısının en yüksek olduğu değerler karşılaştırıldığında, ϕ 'nin artmasıyla %3 değerinde %9.78 ve %5 değerlerinde %15.72 Nu sayısının da arttığı görülmektedir. Brinkman sayısı, ısı transferinde viskoz dağılımın etkisini temsil eder; yüksek Br değerleri, viskoz dağılımın ısı transferi üzerinde daha baskın olduğu anlamına gelir. $Br=1$ 'de, Nu'nun en düşük olduğu ve bu durumda viskoz dağılımın etkisinin en belirgin olduğu görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi ϕ arttıkça Nu'nun arttığı görülmektedir. Bu, nanopartiküllerin akışkanın termal iletkenliğini artırarak ısı transferini iyileştirdiğini gösterir.



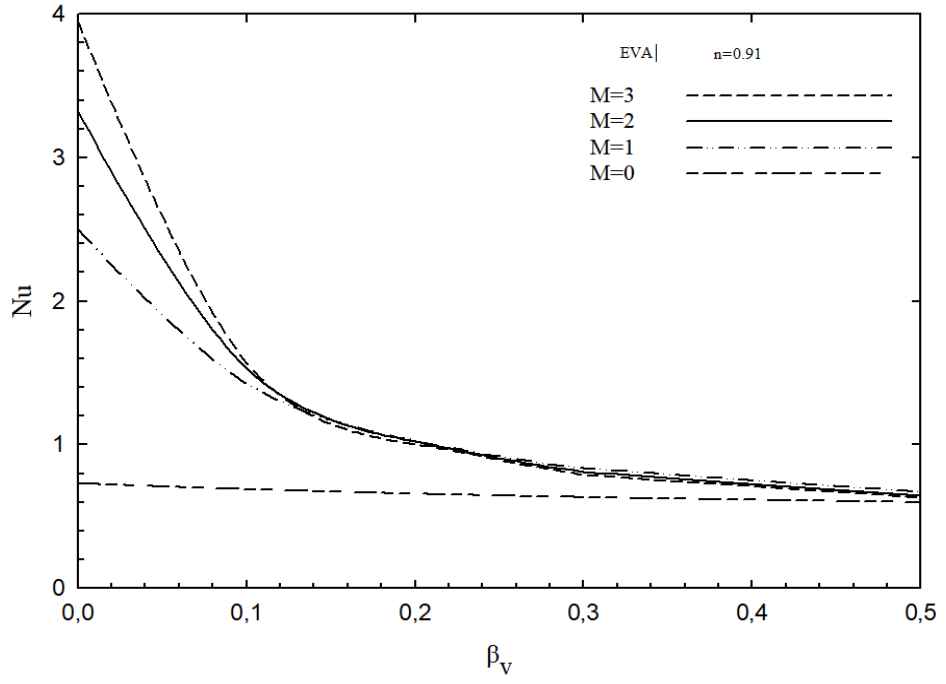
Şekil 4.18. Nusselt sayısının, n , β_v ve ϕ ile değişimi $Br=0.1$ $M=0$

Şekil 4.18, Nusselt sayısı ile kayma katsayısı β_v ve nanopartikül hacim fraksiyonu ϕ arasındaki ilişkiyi farklı davranış indeksi n değerleri için ve Brinkman sayısı $Br=0.1$, manyetik alan parametresi $M=0$ için göstermektedir. Akışkanın davranış indeksi n 'nin 0.76, 0.80 ve 0.91 değerlerine karşılık gelen çizgiler, $Br=0.1$ değerinde Nu sayısının β_v arttıkça arttığı görülmektedir. n değerleri düştükçe (kesme incelmesinin daha fazla olduğu) Nu sayısının artış oranının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. β_v arttıkça; $n=0.76$ için, Nu sayısının artış oranı %3.90. $n=0.80$ için, Nu sayısının artış oranı %3.57. $n=0.91$ için, Nu sayısının artış oranı %3.06. Nanopartiküllerin kullanımının akışkanın davranış indeksi n , arttıkça, Nusselt sayısının arttığı göstermektedir.

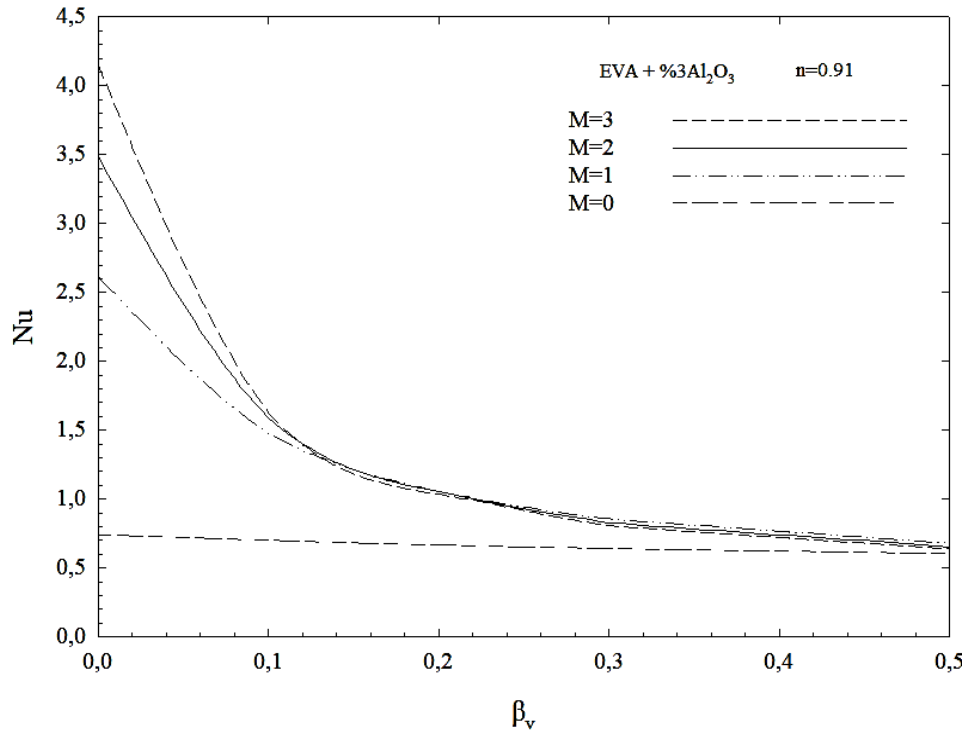


Şekil 4.19. Nusselt sayısının, manyetik parametre M ve nanopartikül hacim fraksiyonu ile değişimi

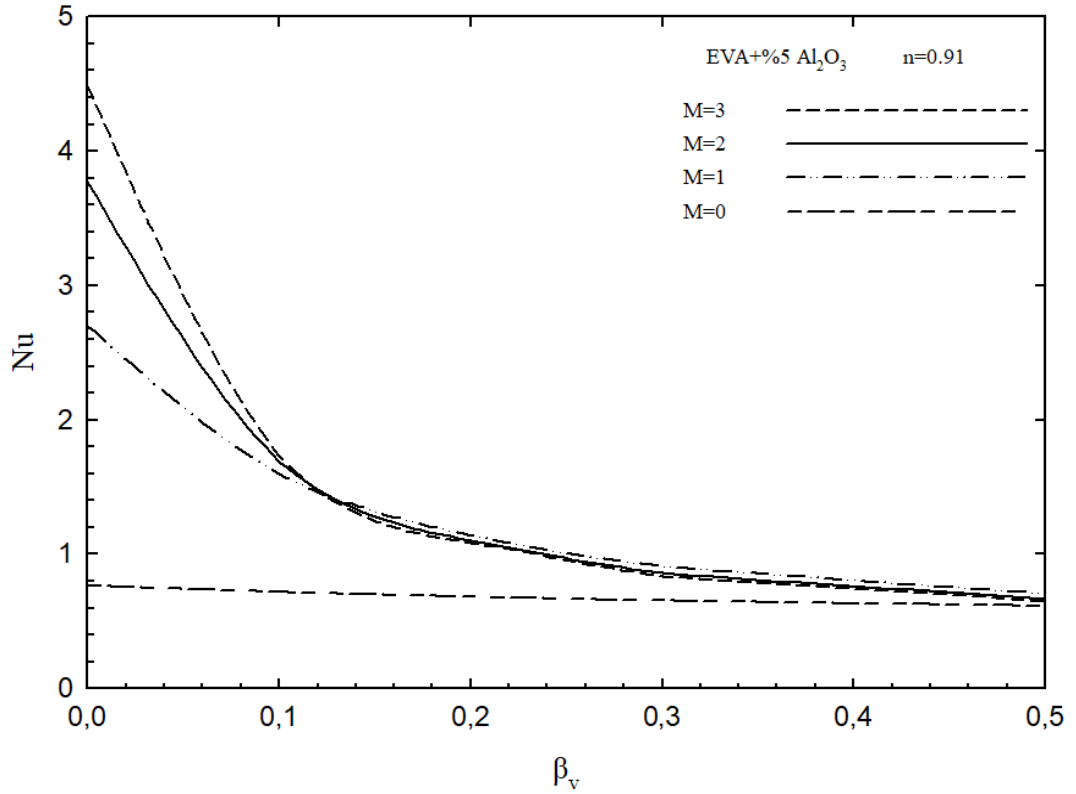
Manyetik alan şiddetinin (M) artışı ile Nusselt sayısı (Nu) arasındaki ilişkiyi farklı nanopartikül hacim fraksiyonu değerlerinde (ϕ) Şekil 4.19’ da gösterilmektedir. $Br=0.1$ ve $\beta v=0.0$ ’da Hacim fraksiyonundaki %3’lük artışın Nusselt sayısını %5.2 oranında arttırdığı, hacim fraksiyonundaki %5’lik artışın Nusselt sayısını %13.77 oranında arttırdığı görülmüştür. Manyetik alanın varlığında, Nusselt sayısının da arttığını göstermektedir. Nanopartikül oranının artmasıyla Nusselt sayısındaki artış oranı da artmaktadır, yani nanopartiküllerin ısı transferine olan katkısı manyetik alan şiddetinin artışıyla birlikte daha belirgin hale gelmektedir. Nanopartikül oranının artışının Nu üzerindeki etkisinin, manyetik alan şiddeti arttıkça daha belirgin hale geldiği görülmektedir.



Şekil 4.20. Nusselt sayısının kayma hızı katsayısı β_v ve manyetik alan parametresi M ile değişimi



Şekil 4.21. Nusselt sayısının kayma hızı katsayısı β_v ve manyetik alan parametresi M ile değişimi



Şekil 4.22. Nusselt sayısının kayma hızı katsayısı β_v ve manyetik alan parametresi M ile değişimi

Şekil 4.20-4.22’de kayma hızı katsayısı β_v ve manyetik alan şiddeti M değişimlerinin Nusselt sayısı (Nu) üzerindeki etkisini göstermektedir. M=0 manyetik alan etkisi yok durumunda, β_v arttıkça Nu azalmaktadır. Bu, kayma hızı katsayısının artmasının termal sınır tabakasını kalınlaştırarak konvektif ısı transferini azalttığını gösterir. Manyetik alan parametresi M arttıkça, Nu sayısının β_v ile azalma eğiliminin azaldığı görülmektedir. M=0 durumunda, nanopartikül eklenmesi (EVA+ %3 Al_2O_3) Nu sayısının β_v ile azalma oranını düşürmüştür. M=0 durumunda, daha yüksek oranda nanopartikül eklenmesi (EVA+ %5 Al_2O_3) Nu sayısını arttırmaktadır. Bu, nanopartiküllerin ısı transferine olan katkısının daha da arttığını gösterir. Manyetik alan parametresi arttıkça, Nu sayısının β_v ile azalma eğilimi daha da düşük olmakta, yani manyetik alan parametresini arttırmak ve nanopartikül eklenmesi, ısı transferini önemli ölçüde artırabilmektedir.

4.1. Değerlendirme

Bu çalışmada, mikro ölçekli sonsuz uzunluktaki paralel plakalar arasında gerçekleşen manyetohidrodinamik (MHD) kayma akış rejiminde, viskoz yayılım etkileri dahil edilerek, Newtonian olmayan nanoakışkanların akış ve ısı transfer özellikleri incelenmiştir. Araştırma, sabit sıcaklıkta, hareketli üst plaka ve hareketsiz alt plaka (Couette akışı) koşulları altında yürütülmüştür. Çalışma, daimi, hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş, laminar akış koşullarına odaklanmış ve birinci mertebeye kayma hızı modelini kullanarak Newtonian olmayan nanoakışkanın hız-sıcaklık dağılımı ve Nusselt sayısı incelenmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, kayma akışında MHD, Newtonian olmayan nanoakışkanın manyetik alan parametresi M , kayma hızı katsayısı β_v , Brinkman sayısı Br , nanopartikül hacim fraksiyonu ϕ ve akışkanın davranış indeksi n gibi parametrelerin akışkanın hız ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerini ve bu parametrelerin Nusselt sayısına nasıl etki ettiğini ayrıntılı bir şekilde incelemektir. Elde edilen sonuçlar, manyetik alan şiddetinin ve nanopartikül hacim fraksiyonunun artışı ile ısı transferinin önemli ölçüde arttığını ortaya koymuştur. Brinkman sayısının artması ile sıcaklık artmıştır. Brinkman sayısının negatif değerlerinde yani Brinkman sayısı azaldığında Nusselt sayısını artış göstermiştir. Brinkman sayısının pozitif değerlerinde Brinkman sayısı arttığında Nusselt sayısını azalış göstermiştir. Akışkanın davranış indeksi n 'in artışı hız profilini azaltırken, sıcaklık profilini ve Nusselt sayısını arttırmıştır. Kayma hızı katsayısı β_v 'nin artışı hız, sıcaklık profillerini ve Nusselt sayısını azaltmıştır. Bu sonuçlar, Newtonian olmayan nanoakışkanların ısı transferi ve akış dinamikleri konusundaki bilgi birikimine katkıda bulunmaktadır ve ilgili mühendislik uygulamalarında bu özelliklerin optimizasyonu için önemlidir.

4.2. Öneriler

Bu çalışmada mikro ölçekli paralel plakalar arasında gerçekleşen, MHD, kayma akış rejiminde, Newtonian olmayan nanoakışkanların akış ve ısı transfer özellikleri incelenmiştir. Sabit sıcaklıkta, üst plakanın hareketli alt plakanın sabit olduğu Couette akış için, tam gelişmiş laminar akış koşullarında sınır şartı olarak lineer Navier kayma

hızı modeli kullanılmıştır. Yapılan çalışmaya ek olarak aşağıda sunulan çalışma konuları da incelenebilir.

- Çalışmada MHD plakaya dik yönde uygulanmıştır. Manyetik alanın yönü, açısı değiştirilerek problem incelenebilir.
- Farklı baz ve nanopartiküller kullanılarak çalışma yapılabilir.
- Düşük basınç ve yüksek basınç etkisi incelenebilir.
- Doğal taşımın için çalışma yapılabilir.
- Gözenekli ortamda Newtonian olmayan nanoakışkanların MHD etkisi altında davranışı incelenebilir.



KAYNAKLAR

Aminossadati, S., Raisi, A., Ghasemi, B., (2011). Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 46, 1373-1382.

Aydin, O., (2005). Effects of Viscous Dissipation on the Heat Transfer in a Forced Pipe. Part 1: Both Hydrodynamically and Thermally Developed Flow. *Energy Conversion and Management*, 46, 757-69.

Aydin, O., (2005). Effects of Viscous Dissipation on the Heat Transfer in a Forced Pipe. Part 2. Thermally Developing Flow. *Energy Conversion and Management*, 46, 3091-3102.

Aydin, O., Avci, M., (2006). Viscous-dissipation Effects on the Heat Transfer in a Poiseuille Flow. *Applied Energy*, 83, 495-512.

Batchelor, G. K. (1977). The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles. *J. Fluidmech*, 83, 97-117.

Bingham, E. C., Green, H. (1919). Plastic Material and not a Viscous Liquid; The Measurement of its Mobility and yield value. *Proc. Amer. Soc. Test Mater.* 20(2), 640-675.

Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N. (2002). *Transport Phenomena, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.*

Borhan, H. K., & Zhou, D. (2011). Direct numerical simulation of micro-Couette flow at low Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1-3), 28-38.

Brinkman, H.C. (1952). The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *J. Chem. Phys.*, Cilt No: 20, Sayfa No: 571–581.

Bruggeman, D.A.G. (1935). Calculation of physical constants from heterogeneous substances. *Annals of Physics*, 24, 636.

Canuto, C., Hussaini, M., Quarteroni, A. and Zang, T. (1993). *Spectral Methods in Fluid Dynamics*. Springer, New York, NY.

Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. Singapur: McGraw-Hill Higher Education.

Chen, Han, Hwang, (2020). Effective Navier-Slip In Non-Newtonian Fluid Flows Over Corrugated Surfaces. *Physics of Fluids*, 32, 113103.

Choi, U. S. (1995). Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, D. A. Siginer and H. P. Wang, eds., FED-Vol. 231/MD-Vol. 66, ASME, New York, 99-105.

Davaa, G., Shigechi, T., Momoki, S. (2000). Plane Couette-Poiseuille flow of power-law non-Newtonian fluids. Reports of the Faculty of Engineering. *Nagasaki University* 30(54).

Davidson, P.A. (2001) An Introduction to Magnetohydrodynamics. *Cambridge University Press, New York, USA*.

Deng, S., Bian, R., Liang, J. (2023). Unsteady Pressure-Driven Electrokinetic Slip Flow and Heat Transfer of Power-Law Fluid through a Microannulus. *Micromachines*;14, 371.

Einstein, A. (1906). A New Determination of the Molecular Dimensions, *Ann. Phys.*, 324, 2, 289-306.

Ellahi, R.,_ Hameed, M. (2012). Numerical analysis of steady non-Newtonian flows with heat transfer analysis, MHD and nonlinear slip effects. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 0961-5539.

Ferrás, L.L., vd. (2012). Analytical solutions for channel flows of Phan-Thien-Tanner and Giesekus fluids under slip. *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, 171–172, 97-105.

Gad-el-Hak, M. (2001). Flow physics in MEMS, *Rev Mec. Ind.* 2., 313–341.

Ghazian, O., Rezvantalab, H. and Ashjaee, M. (2011). Analytical investigation of the effect of viscous dissipation on Couette flow in a channel partially filled with a porous medium. *Transport in Porous Media*, Vol. 89, No. 1, 1-13.

Hamilton, R.L. ve Crosser, O.K. (1962). Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1, 187–191.

Herschel W. H., Bulkley T. (1926). Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions. *Am. Soc. Test Proc.*, 26(2):621–633.

Hughes, D.W., Proctor, M.R.E., Eltayeb, I.A. (2022). Rapidly rotating Maxwell-Cattaneo convection. *Phys Rev Fluids*, 7:093502.

Hwang, S.S. vd. (2012). Morphology, mechanical, and rheological behavior of microcellular injection molded EVA–clay nanocomposites. *Int Commun Heat Mass Transf.*, 39:383–9.

Inman, R. M., (1964). Heat Transfer for Laminar Slip Flow of a Rarefied Gas in a Parallel Plate Channel or a Circular Tube With Uniform Wall Temperature. *NASA TN D-2213*.

Karimipour, A. (2015). New correlation for Nusselt number of nanofluid with Ag/Al₂O₃/Cu nanoparticles in a microchannel considering slip velocity and temperature jump by using lattice Boltzmann method. *Int. J. Therm. Sci.*, 91. 146–156.

Kiyasatfar, M. (2018). Convective heat transfer and entropy generation analysis of non-Newtonian power-law fluid flows in parallel-plate and circular microchannels under slip boundary conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 128, 15-27.

Kleinstreuer C, ve Feng Y. (2011). Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: a review. *Nanoscale Research Letters*, 6, 229.

Knaepen, B., Kassios, S., Carati, D., (2003) MHD Turbulence at Moderate Magnetic Reynolds Number. *Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs*, 449-460.

Küçüksönmez, E., Servantie, J. (2020). Shear thinning and thickening in dispersions of spherical nanoparticles. *Phys. Rev. E.*, 102:12604.

Kumar, P.M., Sanchayan, M. (2012). Viscous dissipation effects on the limiting value of Nusselt numbers for a shear driven flow between two asymmetrically heated parallel plates. *Front Heat Mass Transf*, 3(033004):1–6.

Lin, S.H., (1979). Heat Transfer to Plane Non-Newtonian Couette Flow. *Int. J. Heat Mass Transf*, 22, 1117-1123.

Lin, Y., Zhang L., Zhang X., Ma L., Chen, G. (2015). MHD pseudo-plastic nanofluid unsteady flow and heat transfer on the finite thin film on a stretching surface internal heat generation, *J. Heat Mass Transfer*, 84, 903-911.

Makinde A.N., Onyejekwe O.O. (2011). A numerical study of MHD generalized Couette flow and heat transfer with variable viscosity and electrical conductivity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323,2757–2763.

Maxwell, J.C. (1954). A Treatise on Electricity and Magnetism, third ed, Dover Publications Inc. *New York*. A.B.D.

Mondal P.K. (2014). Entropy analysis for the Couette flow of non-Newtonian fluids between asymmetrically heated parallel plates: effect of applied pressure gradient. *Physica Scripta*, 89-125003.

Nadeem, S., Lee, J., & Kim, J. (2015). Heat transfer characteristics of a micro-Couette flow without axial heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, 226-234.

Nield, D.A.: (2004). Forced convection in a parallel plate channel with asymmetric heating. *Int. J. Heat Mass Transf.* 47, 5609–5612

Ozturk, A. (2013). MHD Slip Flow Between Parallel Plates Heated with a Constant Heat Flux, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 33, 1, 11-20.

Ozturk, A., Kahveci, K. (2016). Slip flow of nanofluids between parallel plates heated with a constant heat flux. *Drseci tok nanofluidov med vzporednima ploscama, ogrevanima s konstantnim toplotnim tokom. Strojnikski Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 62(9), 511.

Pandey, S.K., Tripathi, D. (2010). Unsteady model of transportation of Jeffrey-fluid by peristalsis. *Int. J. Biomath.*, 3(4), 473-491.

Qian, S., Bau H.H., (2009). Magnetohydrodynamics based microfluidics. *Mech. Res. Commun.*, 36, 10-21.

Raisi, A., Ghasemi, B., Aminossadati, S.M. (2011). A numerical study on the forced convection of laminar nanofluid in a microchannel with both slip and no-slip conditions. *Numeric, Heat Transf. Part A*, 59 114–129.

Rashidi, M. M., Farahani, M. R., & Alhuthali, M. S. (2018). Magnetic field effects on the flow and heat transfer of a power-law nanofluid in a micro-Couette flow using Buongiorno's model. *Journal of Molecular Liquids*, 263, 256-266.

Seetharaman, G.R., Sangwai, J.S. (2020). Effect of Nanoparticles on the Performance of Drilling Fluids. *In Nanotechnology for Energy and Environmental Engineering; Sangwai*, 279–297.

Shojaeian, M., Kosar A. (2016). Convective heat transfer of non-Newtonian power-law slip flows and plug flows with variable thermophysical properties in parallel-plate and circular microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, 100-155e168.

Sutton, G.W., Sherman, A., (1965). *Engineering Magnetohydrodynamics*, McGraw-Hill.

Trefethen, L.N. (2000). Spectral Methods in MATLAB. SIAM. Philadelphia, PA.

Tso, Hor, Chen, Kok, (2018) Heat Induction by Viscous Dissipation Subjected to Symmetric and Asymmetric Boundary Conditions on a Small Oscillating Flow in a Microchannel. *Symmetry*, 10(10), 499.

Türk, Ö., ve Tezer-Sezgin, M. (2013). Chebyshev Spectral Collocation Method for Unsteady Mhd Flow and Heat Transfer of a Dusty Fluid Between Parallel Plates. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 64(7), 597–610.

Turkyilmazoglu M. (2012). Dual and triple solutions for MHD slip flow of non-Newtonian fluid over a shrinking surface. *Comp. Fluids*, 70, 53-58.

Xuan, Y. ve Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 21 (1), 58-64.

Xuan, Y., Roetzel, W. (2000). Conceptions For Heat Transfer Correlation of Nanofluids. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 43(19), 3701-3707.

Yu, W., Choi, S. U. S. (2003). The Role of Interfacial Layers in The Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model. *J. Nanopart. Res.* 5, 167-171.

Zhang, Y. vd. (2017). Unsteady flow and heat transfer of power-law nanofluid thin film over a stretching sheet with variable magnetic field and power-law velocity slip effect. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 70. 104–110.

ÖZGEÇMİŞ

2003 yılında Edirne Lisesinden, 2007 yılında Trakya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden mezun olmuştur. 2010 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başlamıştır. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans eğitimini 2013 yılında tamamlamıştır. 2014 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı doktora programında eğitime başlamış olup, halen Trakya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve iki çocuk annesidir.