

**SİLİNDİRİK BORULARDA  
MANYETOHİDRODİNAMİK AKIŞIN DENEYSEL  
OLARAK İNCELENMESİ VE HESAPLAMALI  
AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE SAYISAL ANALİZİ**

**2012  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNE EĞİTİMİ**

**Engin GEDİK**

**SİLİNDİRİK BORULARDA MANYETOHİDRODİNAMİK AKIŞIN  
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR  
DİNAMİĞİ İLE SAYISAL ANALİZİ**

**Engin GEDİK**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Eğitimi Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2012**

Engin GEDİK tarafından hazırlanan “SİLİNDİRİK BORULARDA MANYETOHİDRODİNAMİK AKIŞIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE SAYISAL ANALİZİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hüseyin KURT



Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 28/ 06/ 2012

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Hüseyin KURT (KBÜ)



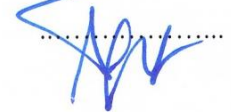
Üye : Doç. Dr. Ziyaddin RECEBLİ (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)



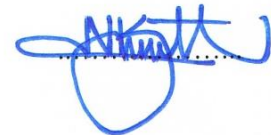
Üye : Yrd. Doç. Dr. Adnan TOPUZ (BEÜ)



...../...../2012

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

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN



Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Engin GEDİK

## ÖZET

Doktora Tezi

### SİLİNDİRİK BORULARDA MANYETOHİDRODİNAMİK AKIŞIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI İLE SAYISAL ANALİZİ

Engin GEDİK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Hüseyin KURT

Haziran 2012, 126 sayfa

Bu çalışmada viskoz, sıkıştırılmaz üç farklı özelliğe sahip manyetik akışkanın (A-B-C) silindirik bir boruda laminer Hidrodinamik (HD) ve Manyetohidrodinamik (MHD) akışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, manyetik alan indüksiyonunu oluşturabilmek için imal edilen bir elektromanyetik cihaz ortamında 10 ve 15 mm çaplarında, 300 mm uzunluğunda iki farklı silindirik boruda manyetik alanın akışkanın laminer akışına etkisi gözlemlenmiştir. Deneyler, manyetik alanın  $B= 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların doğruluğunu gösterebilmek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Analizi kullanılarak nümerik çalışma yapılmıştır. HAD analizinde sonlu hacimler tekniğine dayalı Fluent kodu kullanılmıştır. Fluent kodunda akışa ait genel denklemler, HD ( $B=0$ ) ve MHD ( $B\neq 0$ ) akış modelleri için çözülmüştür. MHD akış

modeli için manyetik indüksiyon denkleminin çözümü metoduna göre nümerik hesaplamalar yapılmıştır. Deneylede akışa uygulanan manyetik alan, akışkanların viskozitesini arttırarak akış hızlarını düşürmüştür. Boru çapının 10 mm olduğu durumda A, B ve C akışkanlarının hız değerleri HD akış modeli için sırasıyla 0.593, 0.749 ve 0.938 m/s olmuştur. Manyetik alanın en büyük değeri olan  $B=0.15$  T’da bu değerlerde sırasıyla %95.27, %90.24 ve %85.6 oranlarında düşüşler meydana gelmiştir. Benzer biçimde, boru çapının 15 mm olduğu durumda A, B ve C akışkanları için 0.301, 0.363 ve 0.445 m/s olan akış hızı değerlerinde sırasıyla %96.87, %95.06 ve %90.76 oranlarında düşüşler meydana gelmiştir. HAD analizlerinde manyetik alanın  $B= 0, 0.05, 0.1$  ve  $0.15$  T değerleri kullanılarak elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Buna göre, boru çapı 10 mm için HD ve MHD akış modellerinde deneysel ve nümerik çalışma arasındaki farklar sırasıyla ortalama %6.1 ve %1.71 olarak bulunmuştur. Boru çapının 15 mm olduğu durumda ise bu fark sırasıyla %2.31 ve %0.89 olmuştur. Sonuç olarak, deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen sonuçların birbirini destekler nitelik ve nicelikte olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler** : Manyetohidrodinamik akış, viskoz akış, sıkıştırılmaz akış, laminer akış, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, sonlu hacimler metodu.

**Bilim Kodu** : 708.1.002

## **ABSTRACT**

**Ph.D. Thesis**

# **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MAGNETOHYDRODYNAMIC FLOW IN CIRCULAR PIPES AND NUMERICAL ANALYSIS WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

**Engin GEDİK**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Education**

**Thesis Advisor:**

**Assoc.Prof. Dr. Hüseyin KURT**

**June 2012, 126 pages**

In this study, laminar Hydrodynamic (HD) and Magnetohydrodynamic (MHD) flow behavior of viscous, incompressible three magnetic fluids (A-B-C) with different physical properties in circular pipes were investigated experimentally and numerically. In the experiments, an electromagnetic device which is manufactured to generate magnetic field induction was used to observe the effect of the magnetic field on laminar flow of the fluids in two different circular pipes with dimensions of 10 mm and 15 mm in diameter and 300 mm in length. The experiments were performed using following magnetic fields  $B= 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  and  $0.15$  T. Numerical study was performed to show the accuracy of the results obtained from experimental study. In numerical analysis, Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis was used. The Fluent code based on the finite volume method was used for the CFD analysis. Governing equations

describing the fluid flow were solved for HD ( $B=0$ ) and MHD ( $B\neq 0$ ) flow models in the Fluent code. For MHD flow model, numerical calculations were done according to the solution of the magnetic induction equation. In the experiments, the applied magnetic field decreased the flow rate of the fluids by increasing viscosity. In case of 10 mm pipe diameter, the flow velocity of the A, B and C fluids were obtained as 0.593, 0.749 and 0.938 m/s respectively according to HD model. When  $B=0.15$  T magnetic field was applied, %95.27, %90.24 and %85.6 reductions in the velocity of A, B and C fluids were obtained, respectively. Similarly, In case of 15 mm pipe diameter, %96.87, %95.06 and %90.76 reductions occurred in the flow velocity of A, B and C fluids having 0.301, 0.363 and 0.445 m/s flow velocity. The results obtained from HAD analysis using  $B=0, 0.05, 0.1$  and  $0.15$  T were compared with experimental results. Therefore, it was found that the differences between the experimental and numerical study were %6.10 and %1.71 for the HD and MHD flow models respectively for 10 mm pipe diameter. In case of 15 mm pipe diameter, the differences were %2.31 and %0.89. As a result, it was found that the results obtained from experimental and numerical study were qualitatively and quantitatively in good agreement.

**Key Words** : Magnetohydrodynamic flow, viscous flow, incompressible flow, laminar flow, computational fluid dynamic, finite volume method.

**Science Code** : 708.1.002



## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli bilgi birikimi ve tecrübesi ile yardım ve katkılarını esirgemeyip beni yönlendiren, kişiliği ile örnek olan değerli Hocam ve Tez Danışmanım Sayın Doç. Dr. Hüseyin KURT'a, kıymetli bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ziyaddin RECEBLİ'ye, tez izleme komitesindeki hocalarım Sayın Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU'na ve Sayın Yrd.Doç.Dr. Adnan TOPUZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmanın yürütülmesinde maddi ve manevi yardımlarını gördüğüm Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK hocama, Yrd. Doç. Dr. Ali KEÇEBAŞ ve Yrd. Doç.Dr. Bahadır ACAR'a akışkanların viskozite ölçümünde yardımlarını esirgemeyen Marmara Üniversitesi öğretim üyesi Yrd.Doç.Dr. Seval GENÇ hanıma, araştırma görevlisi arkadaşlarım Murat AYDIN ve Alper ERGÜN olmak üzere burada adlarını saymadığım bilgi, kaynak ve görüşleriyle her zaman yardımcı olmaya çalışan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi borç bilirim.

Çalışmanın nümerik hesaplama kısmında FLUENT konusunda bana yardımlarını esirgemeyen Politehnica University of Bucharest öğretim üyesi Prof.Dr.Ing. Corneliu BALAN ve Dr. Ing. Tiberiu BARBAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bugünlere gelmemde büyük emekleri olan annem Gülkadın GEDİK ve babam Bilal GEDİK'e, tezimi hazırlarken bana her türlü desteği veren ve sabrı gösteren eşim Rabia Rahşan GEDİK'e ve oğullarım Efe Kerem ile Ege Eren'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu doktora tez çalışması TÜBİTAK tarafından 110M030 numaralı proje ve Karabük Üniversitesi 10D2104301 nolu Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK'a ve Karabük Üniversitesi'ne verdiği destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
BÖLÜM 3 .....	22
GENEL DENKLEMLER .....	22
3.1. MOMENTUM DENKLEMİ.....	22
3.2. ELEKTROMANYETİK DENKLEMLER .....	28
3.3. MHD AKIŞ MODELİNİN OLUŞTURULMASI.....	29
BÖLÜM 4 .....	31
MATERYAL VE YÖNTEM .....	31
4.1. DENEYSEL YÖNTEM .....	31
4.1.1. Deney Düzeneginin Oluşturulması ve Deneylerin Yapılması.....	32
4.1.2. Viskozite Ölçümü .....	42
4.2. NÜMERİK YÖNTEM .....	46
4.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) .....	47

	<u>Sayfa</u>
4.2.2. Sonlu Hacimler Yöntemi .....	49
4.2.3. GAMBIT Programı.....	50
4.2.4. FLUENT Programı .....	51
4.2.5. MHD Model.....	52
4.2.6. Geometri ve Mesh Yapısının Oluşturulması .....	54
4.2.6.1. Boru Çapı 15 mm İçin Mesh Çalışması .....	54
4.2.6.2. Boru Çapı 10 mm İçin Mesh Çalışması .....	57
4.2.7. Çözümlerin Yapılması .....	58
BÖLÜM 5 .....	60
DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMA SONUÇLARI .....	60
5.1. DENEYSEL SONUÇLAR.....	60
5.2. NÜMERİK SONUÇLAR.....	70
5.3. DENEYSEL VE NÜMERİK ÇÖZÜM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ .....	86
BÖLÜM 6 .....	93
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	93
KAYNAKLAR .....	96
EK AÇIKLAMALAR A. FLUENT KODUNDA MHD MODEL.....	104
ÖZGEÇMİŞ .....	106

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Fiziksel model ve koordinat sistemi .....	5
Şekil 2.2. Probleme ait koordinat sistemi.....	6
Şekil 2.3. Problem geometrisi ve koordinat sistemi.....	8
Şekil 2.4. Sıvı tabaka üzerine düşen damlacığın şematik modeli .....	8
Şekil 2.5. Deney düzeneği a) Eksenel manyetik alan oluşturmak için, frekans dönüştürücü ile bobin düzeneği b) Bobin sisteminin şematik gösterimi .....	10
Şekil 2.6. Değişik Re sayıları için $M=15$ de akım çizgileri .....	11
Şekil 2.7. Problem geometrisi .....	14
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik resmi .....	32
Şekil 4.2. PIV kamera ve lazer düzeneği.....	33
Şekil 4.3. PIV cihazında boru içindeki akış görüntüsü .....	33
Şekil 4.4. Hızlı kamera ile akış görüntüleme deney düzeneği .....	34
Şekil 4.5. Hızlı kamera ile akış görüntüleme sonucunda elde edilen akış görüntüsü.....	34
Şekil 4.6. Deney düzeneğinin teknik resim detayları a) ön görünüş b) yan görünüş c) üst görünüş .....	35
Şekil 4.7. Deney düzeneğinin katı model resmi a) dimetrik görünüş b) ön görünüş c) yan görünüş .....	36
Şekil 4.8. Deney düzeneğinin önden fotoğraf görüntüsü .....	37
Şekil 4.9. Deney düzeneğinin yandan fotoğraf görüntüsü .....	37
Şekil 4.10. F.W.BELL 5180 Gaussmetre.....	38
Şekil 4.11. Hassas dijital terazi .....	38
Şekil 4.12. Deney düzeneğine bağlanmış fark basınç transmitterleri .....	38
Şekil 4.13. Deneysel verilerinin bilgisayara aktarılması .....	38
Şekil 4.14. Manyetik alan indüksiyonu ölçümünün fotoğraf görüntüsü .....	39
Şekil 4.15. Deney düzeneğinde depo ve pompaların fotoğraf görüntüsü .....	39
Şekil 4.16. Deney düzeneği güç ünitesi .....	39
Şekil 4.17. Akışkan numuneleri .....	42
Şekil 4.18. Reometre .....	42
Şekil 4.19. Viskozite ölçüm sonuçları (Akışkan:A).....	43

Şekil 4.20. Viskozite ölçüm sonuçları (Akışkan:B).....	43
Şekil 4.21. Viskozite ölçüm sonuçları (Akışkan:C).....	44
Şekil 4.22. Akışkanların manyetik alana bağlı viskozite değişimi (D:15 mm).....	45
Şekil 4.23. Akışkanların manyetik alana bağlı viskozite değişimi (D:10 mm).....	46
Şekil 4.24. Boru geometrisinin şematik resmi .....	55
Şekil 4.25. Boru geometrisinin katı modeli a) izometrik b) ön görünüş .....	55
Şekil 4.26. Mesh çalışması (d:15 mm).....	56
Şekil 4.27. Uygun sayısal mesh yapısı (d:15 mm).....	56
Şekil 4.28. Mesh çalışması (d:10 mm).....	57
Şekil 4.29. Uygun sayısal mesh yapısı (d:10 mm).....	58
Şekil 4.30. Çözüm şartları ve MHD model.....	59
Şekil 5.1. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı olarak deneysel hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: A) .....	60
Şekil 5.2. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: B).....	61
Şekil 5.3 Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: C).....	62
Şekil 5.4 Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: A).....	63
Şekil 5.5 Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: B).....	64
Şekil 5.6. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: C).....	65
Şekil 5.7. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı olarak kütleli debi değişimi (d: 15 mm, Akışkan: A-B-C).....	65
Şekil 5.8. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı olarak kütleli debi değişimi (d: 10 mm, Akışkan: A-B-C).....	66
Şekil 5.9. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı olarak basınç ve boru merkezindeki hız değişimleri (d:15 mm).....	67
Şekil 5.10. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı olarak basınç ve boru merkezindeki hız değişimleri (d:10 mm).....	67
Şekil 5.11. Manyetik alan indüksiyonuna ve çapa bağlı olarak hız değişimlerinin mesh görünümü (d: 15 mm, Akışkan: A-B-C) .....	68
Şekil 5.12. Manyetik alan indüksiyonuna ve çapa bağlı olarak hız değişimlerinin mesh görünümü (d: 10 mm, Akışkan: A-B-C) .....	69
Şekil 5.13. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: A).....	70

Şekil 5.14. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: B).....	71
Şekil 5.15. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: C).....	72
Şekil 5.16. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: A).....	73
Şekil 5.17. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: B).....	73
Şekil 5.18. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: C).....	74
Şekil 5.19. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: A, x=0, y=0, z=0-0.3 m).....	75
Şekil 5.20. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: B, x=0, y=0, z=0-0.3 m).....	75
Şekil 5.21. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: C, x=0, y=0, z=0-0.3 m).....	76
Şekil 5.22. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: A, x=0, y=0, z=0-0.3 m).....	77
Şekil 5.23. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: B, x=0, y=0, z=0-0.3 m).....	77
Şekil 5.24. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: C, x=0, y=0, z=0-0.3 m).....	78
Şekil 5.25. Farklı manyetik alan değerlerinde nümerik hız vektörleri (D: 15 mm, Akışkan: A).....	79
Şekil 5.26. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik hız vektörleri (d: 15 mm, Akışkan: B).....	79
Şekil 5.27. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik hız vektörleri (d: 15 mm, Akışkan: C).....	80
Şekil 5.28. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik hız vektörleri (d: 10 mm, Akışkan: A).....	80
Şekil 5.29. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik hız vektörleri (d: 10 mm, Akışkan: B).....	81
Şekil 5.30. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik hız vektörleri (d: 10 mm, Akışkan: C).....	81
Şekil 5.31. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik akım çizgileri (d: 15 mm, Akışkan: A).....	82
Şekil 5.32. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik akım çizgileri (d: 10 mm, Akışkan: A).....	82

Şekil 5.33. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d: 15 mm, Akışkan: A, $x=0, y=0, z=0-0.3$ m).....	83
Şekil 5.34. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d: 15 mm, Akışkan: B, $x=0, y=0, z=0-0.3$ m).....	83
Şekil 5.35. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d: 15 mm, Akışkan: C, $x=0, y=0, z=0-0.3$ m).....	84
Şekil 5.36. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d: 10 mm, Akışkan: A, $x=0, y=0, z=0-0.3$ m).....	85
Şekil 5.37. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d: 10 mm, Akışkan: B, $x=0, y=0, z=0-0.3$ m).....	85
Şekil 5.38. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d: 10 mm, Akışkan: C, $x=0, y=0, z=0-0.3$ m).....	86
Şekil 5.39. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d: 15 mm, Akışkan: A).....	87
Şekil 5.40. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d: 15 mm, Akışkan: B).....	88
Şekil 5.41. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d: 15 mm, Akışkan: C).....	88
Şekil 5.42. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d: 10 mm, Akışkan: A).....	89
Şekil 5.43. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d: 10 mm, Akışkan: B).....	90
Şekil 5.44. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d: 10 mm, Akışkan: C).....	91
Şekil 5.45. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde boru merkezinde deneysel ve nümerik hız değişimleri (d: 15 mm).....	92
Şekil 5.46. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde boru merkezinde deneysel ve nümerik hız değişimleri (d: 10 mm).....	92

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 4.1. Akışkanların fiziksel özellikleri .....	35
Çizelge 4.2. Mesh bilgileri (d:15 mm). .....	56
Çizelge 4.3. Mesh bilgileri (d:10 mm). .....	58



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

<b>A</b>	: Alan
<b>A</b>	: Yüzey alanı vektörü
<b>a</b>	: İvme
<b>A<sub>1</sub></b>	: Rivlin Ericksen tensörü
<b>B</b>	: Manyetik alan indüksiyonu vektörü
<b>B<sub>0</sub></b>	: Dışarıdan uygulanan manyetik alan indüksiyonu
<b>b</b>	: İndüklenen manyetik alan
<b>c</b>	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
<b>D</b>	: Türev operatörü
<b>d</b>	: Çap
<b>div</b>	: Diverjans operatörü
<b>dV</b>	: Diferansiyel hacim
<b>E</b>	: Toplam enerji
<b>E</b>	: Elektrik alan şiddeti vektörü
<b>E<sub>0</sub></b>	: Elektrik alan şiddeti
<b>f</b>	: Dış kuvvetler vektörü
<b>F<sub>EM</sub></b>	: Elektromanyetik kuvvet vektörü
<b>F<sub>net</sub></b>	: Net kuvvet
<b>GaInSn</b>	: Galinstan sıvı-metal
<b>grad</b>	: Gradyan operatörü
<b>H</b>	: Kontrol hacmi
<b>Ha</b>	: Hartmann sayısı
<b>I</b>	: Birim tensör
<b>J</b>	: Elektrik akım yoğunluğu vektörü
<b>L</b>	: Hız vektörünün gradyanı
<b>Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub></b>	: Filibe akışkanı

$M$	: Hartman sayısı
$m$	: Kütle
$\dot{m}$	: Kütlesel debi
$N$	: Basınç gradyanı
$NaK$	: Sodyum potasyum alaşımı
$Nu$	: Nusselt sayısı
$n$	: Güç parametresi
$n^-$	: Elektron sayısı
$n^+$	: İyon sayısı
$Pr$	: Prandtl sayısı
$\mathbf{p}$	: Basınç vektörü
$p^*$	: Yük yoğunluğu
$Q$	: Isı
$\mathbf{q}$	: Isı akısı vektörü
$R$	: Yarıçap
$Re$	: Reynolds sayısı
$Ra_I$	: İç Rayleigh sayısı
$Ra_E$	: Dış Rayleigh sayısı
$r$	: Yarıçap boyunca adım
$S$	: Koruma parametresi
$Sc$	: Schmidt sayısı
$S_\Phi$	: Her bir kontrol hacmi için $\Phi$ 'nin kaynağı
$\mathbf{T}$	: Gerilme tensörü
$T$	: Transpoze
$t$	: Zaman
$U_{max.}$	: Maksimum hız
$U_{ort.}$	: Ortalama hız
$u, v, w$	: Hız bileşenleri
$x, y, z$	: Mekan koordinatları
$\mathbf{V}, \mathbf{v}$	: Hız vektörü
$v_r, v_\theta, v_z$	: Radyal, açısıl, aksenal yöndeki hız bileşenleri
$\omega$	: Hızın rotasyonu
$\rho$	: Yoğunluk

$\mu$	: Dinamik viskozite
$\mu$	: Manyetik geçirgenlik
$\sigma$	: Elektriksel iletkenlik
$\nabla$	: Gradyan operatörü
$\Delta$	: Laplasyen
$\Gamma_{\Phi}$	: $\Phi$ için difüzyon katsayısı
$\tau_{ij}$	: Kayma gerilmesi
$m$	: Hall parametresi
$\gamma$	: Eğim açısı

## KISALTMALAR

DNS	: Direkt Nümerik Simülasyon
HAD	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
HD	: Hidrodinamik
MHD	: Manyetohidrodinamik
ODE	: Adi Diferansiyel Denklem
PDE	: Kısmi Diferansiyel Denklem
PIV	: Parçacık Görüntüleme Hız ölçer
SIMPLE	: Basınç İlişkili Denklemler için Yarı Implicit (Kapalı) Metodlar
UDF	: Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon
UDS	: Kullanıcı Tanımlı Sayısal

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Akışkanlar mekaniği, durgun ve hareket halindeki sıvı ve gazlar ile bunların yakın çevresine (katı yüzeyler ya da diğer sıvılar üzerine) olan etkilerini inceleyen mühendisliğin temel araştırma konularını esas alan bir bilim dalıdır ( Umur, 2009).

Son yıllarda gelişen teknoloji ve bilgi birikimi ile akışkanlar mekaniğinin önemi de giderek artmıştır. İnsandaki kan dolaşımından roketlere kadar çok çeşitli alanlarla doğrudan doğruya ilgili olan akışkanlar mekaniği, bütün mühendislik alanlarında ve bilim dallarında kaçınılmaz bir bilgi kaynağı durumuna gelmiştir. Akışkan, gündelik yaşamda her ne kadar konulduğu kabın şeklini alan maddeler olarak tanımlansa da bugün teknik bilimde en küçük bir kayma gerilmesi uygulandığında sürekli deforme olan madde olarak ifade edilmektedir. Yüzyıllar boyunca; akışkan özellikleri, mekaniğin ve termodinamiğin temel kanunlarının uygulanması ve deneysel çalışmalarla son dört yüzyılda bugünkü anlamda akışkanlar mekaniği temelleri atılmış, matematiksel formülasyonu yapılmıştır. Özellikle sınır tabakası yaklaşımının geliştirilmesi ile beraber Navier-Stokes denklemlerinin daha basit bir forma sokularak çözülmesi mümkün olmuştur.

Yapılan çalışmalar sonucunda birçok gerçek akışkanın, özellikle düşük moleküler ağırlığa sahip olanların mekanik davranışları Navier-Stokes teorisi tarafından doğru olarak belirlenmektedir. Bu teorinin uygulanabildiği akışkanlar Newtonyen akışkanlar olarak adlandırılmaktadır. Kararlı bir halde akan akışkanda, hız değişimi ile uygulanan kayma gerilimi arasındaki ilişki lineer olan akışkanlar Newtonyen akışkanlar olarak da tanımlanabilir. Newtonyen olmayan akışkanlarda ise hız değişimi ile uygulanan kayma gerilimi arasındaki ilişki lineer değildir. Aldığımız nefes, hava, su, süt ve benzin Newtonyen akışkanlara örnek verilebilir. Bunun yanında Newtonyen olmayan akışkanlar da günlük hayatta oldukça fazla

karşılaştığımız akışkanlardır. Örnek olarak bal, hamur, sulandırılmış nişasta, yumurta akı, bitkisel yağlar bu gruba girerler. Her yerde kullanılan boya ve günlük hayatta oldukça sık rastladığımız asfalt, zift, tutkal gibi maddeler de Newtonyen olmayan akışkanlardır (Keçebaş, 2011).

Elektromanyetik alan içerisinde kalan akışkanlar bu alandan etkilenmektedirler. Elektriksel iletkenliğine ve manyetikleşme özelliğine bağlı olarak akışkanların debi ve akış hızları manyetik alanın etkisiyle değişmektedir. Elektromanyetik alan içerisinde kalan akışlar genel olarak Manyetohidrodinamik (MHD) akış olarak tanımlanır. MHD, manyetik alan altında elektriksel iletkenliği olan akışkanların hareketlerini inceleyen bir bilim dalıdır şeklinde de tanımlanabilmektedir. Hartman (1937) manyetik alan altında iki paralel plaka arasındaki viskoz sıkıştırılmaz, elektriksel iletkenliği olan akışkanın MHD akışını ilk kez incelemiştir. MHD jeneratörler, pompalar, hızlandırıcılar ve debimetreler gibi önemli uygulamalara sahip olması, Hartman'dan sonra birçok araştırmacı kanal ve dairesel kesitlerde elektriksel iletkenliği olan akışkanların akışını manyetik alan altında incelemişlerdir. Günümüze kadar manyetohidrodinamik akışların incelenmesine yönelik birçok çalışma yapılmış olup, manyetik alanın akış hareketlerine etkisi farklı geometrilere birçok araştırmacı tarafından incelenerek Navier-Stokes ve Maxwell denklemleri belirli kabuller altında deneysel, analitik, analitik olarak çözümü mümkün olmayan problemler de sonlu farklar, sonlu elemanlar gibi nümerik yöntemlerle incelenmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÇALIŞMASI

MHD, manyetik alan altında manyetiklenebilen akışkanları inceleyen disiplinler arası bir bilim dalıdır. MHD viskoz akışlar; endüstriyel ve teknolojik alanda yüksek sıcaklık plazmaları, nükleer reaktörlerde soğutma, sıvı-metal akışkanlar ve jeneratörler, pompalar ve debimetreler gibi geniş ölçüde uygulama alanı bulan mühendislik sistemlerin tasarımı üzerinde çalışılması gereken önemli bir konudur.

Hartmann (1937), ilk kez iki plaka arasındaki sıkıştırılmaz, elektriksel iletkenliği olan viskoz akışkanın MHD akışını incelemiştir. Hartman'dan sonra Shercliff (1953), manyetik alan varlığında duvarları iletken olmayan kanallar boyunca sıkıştırılmaz, viskoz kararlı akış hareketlerini incelemiştir. Chopra (1961) çalışmasında; silindirik bir boruda manyetiklenebilen bir akışkanın, akış yönüne uygulanan manyetik alan altındaki akışını incelemiştir. Akışkana manyetik alan uygulandığında akışkanın hız profiline kendiliğinden parabolik görünümünden düz bir görünüme geçtiğini görmüştür. Elde ettiği bulguların daha önce Hartmann tarafından verilen sonuçları desteklediğini ve çalışmasının silindirik borularda HD akış akım çizgilerinin temel iyileştirilmesini verdiğini ifade etmiştir. Üçgen geometrilere sahip borularda MHD aksel akış Singh and Lal, (1978) tarafından çalışılmış ve daha sonra aynı araştırmacılar çalışmalarında, manyetik alan altındaki kanallarda, elektriksel iletkenliği olan akışkanın tam gelişmiş, kararlı, MHD akış probleminin çözümünde sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır (Singh and Lal, 1982; 1984). Günümüze kadar MHD akışların incelenmesine yönelik birçok çalışma (Takhar et al. 1991; Tezer, 1994; Gardner and Gardner 1995; Watanabe et al. 1995; Helmy 1998; Hossain et al. 2001; Attia et al. 2001; Singh and Rakesh 2001; Xiang and Bau 2003; Chamkha, 2004; Abbasbandy and Hayat 2009; Helzel et al. 2011; Viré et al. 2011) yapılmış olup, manyetik alanın akış

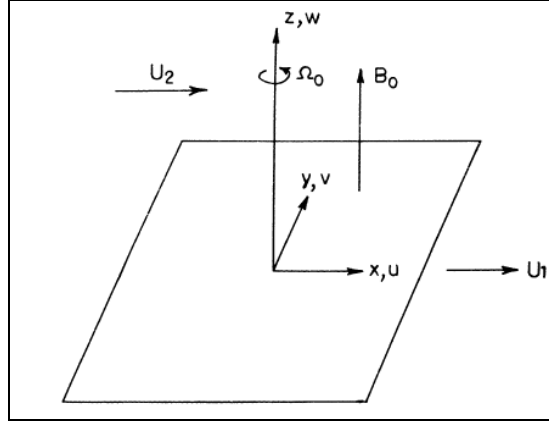
hareketlerine etkisi farklı geometrilerde birçok araştırmacı tarafından incelenerek Navier-Stokes ve Maxwell denklemleri belirli kabuller altında deneysel ve teorik olarak incelenmiş ve incelenmektedir. Literatürdeki bu çalışmaların bazıları aşağıda verilmeye çalışılmıştır.

Chamkha (2000) kanallar ve dairesel borular içinde kararsız, laminar, hidromanyetik partikül akışı ve ısı transferini incelemiştir. Çalışmada, manyetik alana maruz kanallar ve dairesel borular boyunca kararsız laminar akış ve ısı transferi problemi, iki fazlı süreklilik modelini kullanarak nümerik olarak çözmüştür. Elde edilen sonuçlarda, Hartmann sayısı, parçacık yükü, viskozite ve Stokes sayısının akış üzerindeki etkilerini göstermiştir.

Frank et al. (2001) sıvı-metal bir akışkanın iki boyutlu akış kinematikini görüntülemek için deneysel olarak yaptıkları çalışmada, akış yönüne dik olarak uygulanan güçlü bir manyetik alanın hız gradyenini düşüreceğini belirterek dairesel bir silindir arkasındaki akışı  $Re$  sayısının  $Re=10000$ 'e kadarki değerlerinde incelemişlerdir. Çalışmada; akış desenlerinin görüntülenmesi, analizi ve vorteks davranışlarının incelenmesinde matrix probe kullanılmıştır. Akış görüntüleme bilinen Hidrodinamik (HD) akıştan önemli ölçüde farklı yeni ve beklenmedik vorteks desenlerin görüldüğu çalışma sonunda belirtilmiştir.

Takhar et al. (2002) çalışmalarında, hareketli bir yüzey üzerinde dönen viskoz, sıkıştırılmaz akışkanın sınır tabaka akışını, manyetik alan altında Hall etkisi ve serbest akım hızlarını incelemişlerdir. Parabolik genel kısmi diferansiyel denklemleri sonlu farklar yöntemi kullanarak nümerik olarak çözmüşlerdir. Birincil akışkan için yüzey sürtünme katsayısı, manyetik alan ile birlikte artarken, ikincil akışkan için azaldığı ve ayrıca birincil ve ikincil akışlar için yerel yüzey sürtünme katsayısının Hall etkisinden dolayı azaldığını belirtmişlerdir. Problemin fiziksel modeli ve koordinat sistemi Şekil 2.1' de verilmiştir. Burada  $x, y, z$  Kartezyen koordinatlar ve  $u, v, w$  ise koordinatların hız bileşenlerini ifade etmektedir. Çalışmada; manyetik alanın ( $B$ ),  $z$  yönünde uygulandığını ve akışkanın tüm fiziksel özelliklerinin sabit kabul edildiğini ifade etmişlerdir.



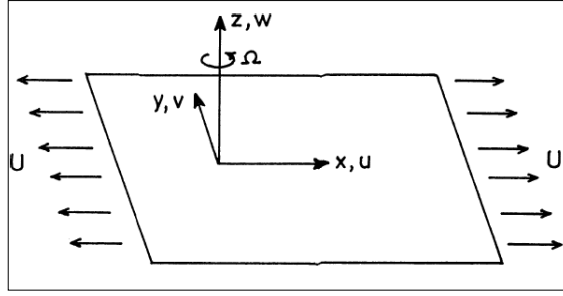


Şekil 2.1. Fiziksel model ve koordinat sistemi (Takhar et al., 2002).

Racabovadiloğlu (2002) çalışmasında, manyetikleşme özelliği olmayan bir malzemedan yapılan silindirik bir boruya dik manyetik alanın tek fazlı laminer MHD akışa etkisini teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Teorik çalışmada, Slezkin Targ yöntemini kullanarak HD kuvvetleri ortalama değerlerine indirgemiş, akışkanın zamana ve konuma bağlı hız ve debi ifadelerini elde ederek, yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırmıştır.

Zaloğlu ve Yalçınkaya (2003) paralel iki levha arasında viskoz bir akışkanın, levhalara dik yönde üniform bir manyetik alan uygulanması sonucu oluşan MHD radyal akışı incelemiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, Hartmann sayısının artmasıyla radyal hızlarda azalmaların meydana geldiğini gözlemişlerdir.

Takhar et al. (2003) çalışmalarında; manyetik alan varlığında dönen bir akışkan içinde gergin bir yüzey üzerindeki (Şekil 2.2) akış ve ısı transferini incelemek için bir analiz geliştirmişlerdir. Genel diferansiyel denklemleri, fark diferansiyel metodu ve kapalı (implicit) sonlu farklar metodunu kullanarak nümerik olarak çözmüşlerdir. Manyetik alanın, x yönündeki yüzey sürtünme katsayısını arttırırken y yönündekini azalttığı ve Nu sayısını düşürdüğü bulunmuştur. Diğer taraftan genellikle dönme parametresi ile birlikte x ve y yönündeki yüzey sürtünme katsayısının arttığı fakat Nu sayısının azaldığını ifade etmişler ve ayrıca Nu sayısının Pr sayısı ile birlikte arttığını çalışma sonunda belirtmişlerdir.



Şekil 2.2 Probleme ait koordinat sistemi (Takhar et al., 2003).

Attia and Ahmed (2004) gözenekli iki paralel plaka ile sınırlandırılmış viskoz, sıkıştırılmaz, Newtonyen olmayan Bingham akışkanın kararsız MHD akışı ve ısı transferini incelemiştir. Çalışmada, akışa dik yönde dışarıdan bir manyetik alan uygulamışlardır. Alt plakanın sabit, üst plakanın ise belirli bir hızla hareket ettirilerek her iki plakanın sabit sıcaklıkta tutulduğunu ifade etmişlerdir. Genel momentum ve enerji denklemlerini nümerik olarak çözmüşlerdir.

Li and Serizawa (2004) yaptıkları çalışmada, dikey bir kare kanal içerisinde metal sodyum-potasyum (NaK) alaşımının düşen bir sıvı filminin, manyetik alan altındaki karakteristik özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Uygulanan manyetik alan şiddetinin 0.7 T'ya kadar ve Reynolds sayısının  $8 \times 10^3$  ile  $3 \times 10^4$  arasında olduğunu belirtmişlerdir. Düşen film tabakasının serbest yüzeyini, hem paslanmaz çelik hem de akrilik reçine kanalda izleyebilmişlerdir. Film sıvısının anlık film kalınlığını ultrasonik transmisyon tekniği ile ölçmüşlerdir. Film akışının özelliklerine, MHD etkisi, görüntüleme ve ölçülen film kalınlığının istatistiksel analizi ile araştırmalarını derinleştirmişlerdir. Güçlü bir manyetik alan ile birlikte düşen sıvı NaK filminin kalınlaştığını ve kayda değer bir biçimde stabilize olduğunu bulmuşlardır. İkiye ayrılan film sıvısının uygulanan manyetik alan ile birlikte düzeltildiğini (birleştirildiğini) ve akıştaki türbülansın yeteri kadar önlendiğini ifade etmişlerdir.

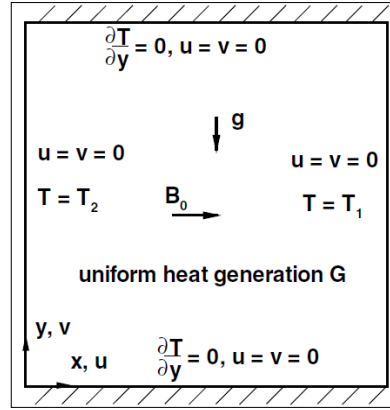
Asghar et al. (2005) çalışmalarında, zamana bağlı kısmi diferansiyel denklemlerin bazı tam çözümlerini Oldroyd-B akışkan akışları için ele almışlardır. İncelemede buldukları akışkan elektriksel olarak geçirgen ve sıkıştırılmazdır. Akış, bir sınıra itme hareketi veya sabit bir basınç gradyeni uygulanarak hareket ettirilmiştir. Yazarlar, tam çözümleri elde etmek için Laplace dönüşüm metodunu

uygulamışlardır. Analizde, Oldroyd-B akışkanındaki kararlı akış için bünye diferansiyel eşitliğin, viskoz akışkanınki ile özdeş olduğunu gözlemlemişler ve ilgi çeken birkaç sonucun ise sunulan analizin özel durumları olarak elde edildiklerini ifade etmişlerdir.

Attia (2005) çalışmasında; iletken olmayan iki paralel poroz plaka ile sınırlandırılmış elektriksel iletkenliği olan viskoz, sıkıştırılmaz, kararsız Couette akışı, Hall etkisini de dikkate alarak ısı transferi ile birlikte incelemiştir. Plakalar arası akışkan üstel olarak azalan bir basınç düşüşüyle hareket ederken uniform bir manyetik alan ve uniform emme ve enjeksiyonu plakalara dik olarak uygulamıştır. Joule ve viskoz yitimleri enerji denklemine dâhil etmiş iki plakayı farklı fakat sabit sıcaklıklarda tutmuştur. İyon kayması (ion slip) ve uniform emme ve enjeksiyonun hız ve sıcaklık dağılımlarının her ikisinin üzerindeki etkisi çalışma sonucunda incelenen parametreler olmuştur.

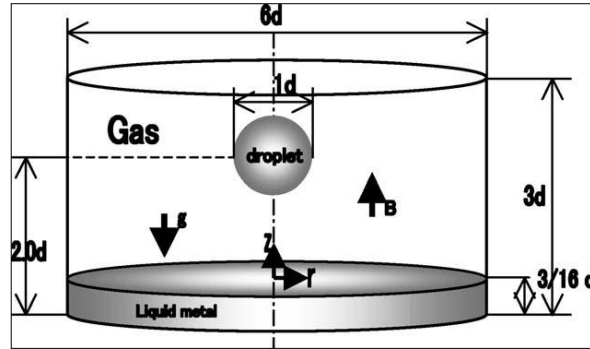
Kharicha et al. (2005) yaptıkları çalışmada, su veya civa ile doldurulan silindirik bir boşluk üzerinde dönen bir disk tarafından gerçekleşen laminer MHD akışı deneysel olarak incelemiştir. Hız dağılımlarını, ultrasound hız ölçüm tekniği (Ultrasound Velocity Propagation) kullanarak analiz etmişlerdir. Uniform ve sabit uygulanan manyetik alan boşluk eksenini boyunca yönlendirilmiştir. Ölçüm sonuçlarını Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programına dayalı nümerik sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Çalışmayı, farklı  $Re \leq 30000$  ve  $M \leq 260$  sayıları için yapmışlardır. Nümerik sonuçların, ultrasound ölçümler ve literatürdeki diğer deneysel ve nümerik çalışmalar ile uyum içerisinde olduğu yazarlar tarafından belirtilmiştir.

Sarris et al. (2005) çalışmalarında, problem geometrisi ve koordinat sistemi Şekil 2.3'teki gibi olan, manyetik alan etkisi altında yandan ve hacimsel olarak ısıtılan kare boşluk içindeki elektriksel iletkenliğe sahip bir akışkanın kararsız iki boyutlu doğal taşınımını nümerik olarak incelemiştir. Akışı, yan duvarların sıcaklık farkından belirlenen dış Rayleigh sayısı ( $Ra_E$ ), hacimsel ısı oranından belirlenen iç Rayleigh sayısı ( $Ra_I$ ), ve manyetik alan şiddeti tarafından belirlenen Hartmann sayısını ( $Ha$ ) kullanarak karakterize etmişlerdir.



Şekil 2.3 Problem geometrisi ve koordinat sistemi (Sarris et al., 2005).

Tagawa (2006) manyetik alan etkisindeki iki fazlı, birbirine karışmayan, sıkıştırılmaz akışa ait boyutsuz denklemleri nümerik olarak sonlu farklar metoduyla çözmüştür. Araştırmacı, Şekil 2.4'te şematik modeli gösterilen çalışmada; yatay bir sıvı-metal tabaka üzerine düşen damlacığın ve manyetik alana maruz bırakılan su içerisinde yükselen hava kabarcığının hareketlerini incelemiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, Lorentz kuvvetinin elektriksel iletkenlik gösteren akış hareketlerini azalttığı ve Hartman sayısının arttığını göstermiştir.



Şekil 2.4. Sıvı tabaka üzerine düşen damlacığın şematik modeli (Tagawa, 2006).

Sezgin ve Aydın (2006) çalışmalarında; kanallarda MHD akış için sınır eleman çözümü yöntemini uygulamışlardır. Uniform bir manyetik alanı, akış yönüne dik uygulamışlar, birleşik hız ve manyetik alan denklemlerini ayrık homojen olmayan konveksiyon-difüzyon tipi denklemlere dönüştürmüşlerdir. Belirli çözümleri tanımladıktan sonra sadece homojen denklemleri sınır eleman yöntemiyle çözmüşlerdir. Ayrık denklemlerin temel çözümleri, Hartman sayısını ( $M$ ), üstel ve

düzeltilmiş Bessel fonksiyonlarını içerdiğinden, sadece basit daimi sınır elemanlarının kullanılmasıyla  $M$ 'nin ( $M < 300$ ) büyük değerleri için sonuçlar elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Hartman sayısının artmasıyla sınır tabaka oluşumunun duvarların yakın bölgelerinde başladığını ve hem hız hem de manyetik alan için yassılaşıma eğiliminde olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca hızın kanal merkezinde uniform hale geldiğini ifade etmişlerdir. Çalışma sonunda yazarlar, farklı Hartman değerleri ve farklı kanal geometrileri için hız ve uygulanan manyetik alan konturlarını grafiksel olarak göstermişlerdir.

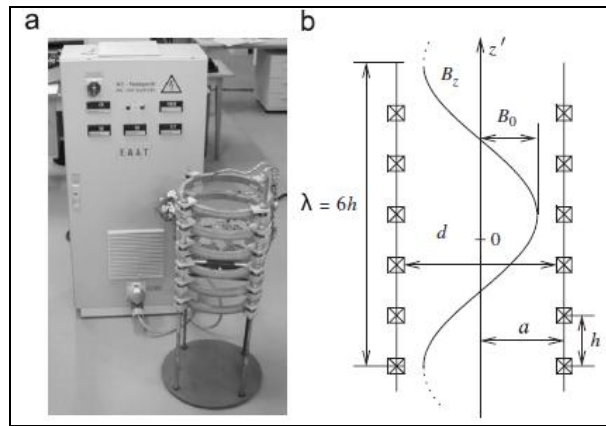
Attia (2006) dairesel bir borudaki parçacık içeren, viskoz, sıkıştırılmaz, elektriksel iletkenliği olan Newtonyen olmayan Bingham akışkanın akışını, Hall etkisini de dikkate alarak incelemiştir. Çalışmada, eksenal yönde daimi basınç gradyeni ve akış yönüne dik yönde üniform bir manyetik alan uygulandığını belirtmiştir. Parçacık fazını viskoz akışkan olarak kabul etmiştir. Genel lineer olmayan denklemleri sonlu farklar yöntemini kullanarak nümerik olarak çözmüştür. Sonuç olarak, manyetik alanın, akışkan ve parçacık hızlarını düşürdüğünü, bununla birlikte Hall parametresinin her iki fazdaki (akışkan ve parçacık) ortalama hızları, çeperdeki debiyi ve hız gradyenini arttırdığını gözlemlemiştir.

Recebli ve Atik (2006) sıvı-katı iki fazlı karışımın silindirik borudaki akışının kararsız hareketlerini incelemiştir. Hareketi ifade eden diferansiyel denklem sistemini analitik ve nümerik olarak çözmüşlerdir. Analitik çözümde akışkan hareketi ile ilgili problemlerin çözümünde kullanılan Slezkin-Targ yöntemi kullanılmış, nümerik çözümde ise sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Çözümlerden elde edilen sonuçlar farklı yarıçaplar için hız-zaman grafikleri çizilerek incelenmiştir. Her iki çözümdeki hız profillerinin çok yakın olması ve kararlı duruma geldiğinde aynı sınır hız değerlerine ulaşılmasıyla Slezkin-Targ yönteminin iki fazlı akış problemlerine uygulanabileceğini ifade etmişlerdir.

Damseh et al. (2006) çalışmalarında; gözenekli tabakadan emme veya enjeksiyon durumunda, iletken akışkan ile manyetik alan varlığında ışınli yüzeylerden MHD zorlanmış konveksiyon ısı transferini incelemiştir. Lineer olmayan denklemlerin çözümlerini, Keller Box metodunu kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada,

manyetik etki sayısının artışı, hem hız sınır tabaka kalınlığını hem de gözenekli tabakadan ısı transfer oranını düşürdüğü ayrıca radyasyon iletim parametresinin artmasına ve Eckert sayısı, boyutsuz sıcaklık oranı ve ısı transfer oranının düşmesine neden olduğu belirtilmiştir. Farklı hız ve sıcaklık profillerini, yerel sürtünme katsayısını ve yerel Nu sayısını farklı boyutsuz gruplar için çizmişlerdir.

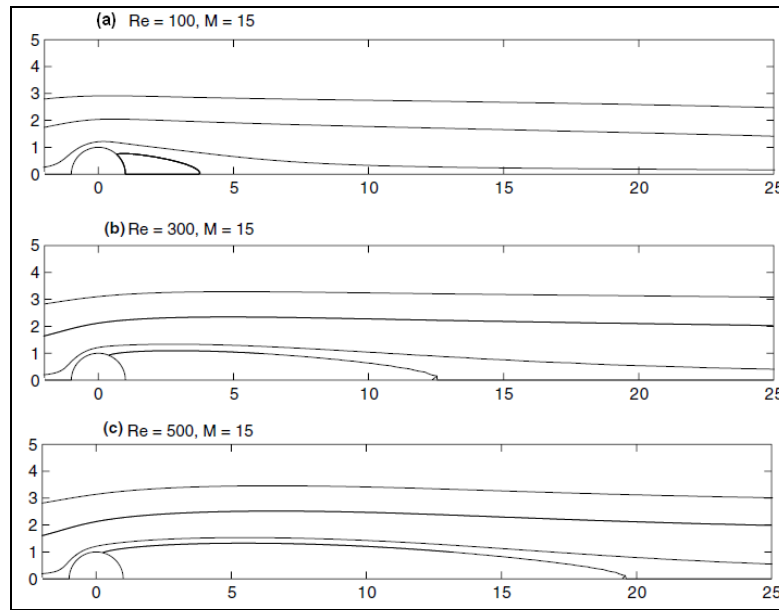
Lantzsch et al. (2007) akışa uygulanan manyetik alan ve akışın laminar durumdan zamana bağlı duruma geçişini, Ultrasonik Dopler Velocimeter ve nümerik simülasyon yardımıyla incelemişlerdir. Silindirik bir boşluk içerisinde GaInSn (Galinstan) akışkanı içeren ve manyetik alan oluşturmak için altı paralel bobinden oluşturulan deney düzeneğini Şekil 2.5'te gösterildiği gibi oluşturmuşlardır. Manyetik alandan dolayı eriyik içinde meridyen şekillerine neden olan Lorentz kuvveti indüklenmiştir. Yazarlar, nümerik çözüm için Opera/Fidap ticari kodları ile spektral kod kullanmışlardır. Çalışmada boyutsuz "S" koruma parametresine bağlı olarak temel aksisimetrik akış incelenmiş,  $S > 10$  değeri için akış hızının önemli ölçüde düştüğü not edilmiştir. Kritik Re sayısı 300–450 arasında bulunmuş ve çalışma sonucunda nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyumun olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Deney düzeneği a) Eksenel manyetik alan oluşturmak için, frekans dönüştürücü ile bobin düzeneği b) Bobin sisteminin şematik gösterimi (Lantzsch et al., 2007).

Sekhar et al. (2007) çalışmalarında; kararlı, viskoz, sıkıştırılmaz ve çok az iletkenliği olan akışkanın dairesel bir silindir etrafındaki akışına, Hartman sayısı

kullanılarak  $Re$  sayısının  $100 < Re < 500$  değerleri için manyetik alanın etkisini araştırmışlardır. Çalışmada; lineer olmayan Navier Stokes deklemlerinin doğru çözümünü yapabilmek için hata düzeltme tekniğini de içeren Multigrid metodunu kullanmışlardır. Manyetik  $Re$  sayısı çok düşük kabul edilmiştir. Akış üzerindeki manyetik alan etkisi, akım çizgileri ile vorteks oluşumu kontur grafiklerle (şekil 2.6), yüzey basınçları ve vorticity grafiklerini x-y plot çizimleri ile yorumlamışlardır. Hartman sayısı artarken direnç katsayısının arttığı ve ayrıca yukarı akımdaki basınç çok az artarken aşağı akımdaki basının azaldığını çalışma sonucunda belirtmişlerdir.



şekil 2.6. Değişik  $Re$  sayıları için  $M=15$  de akım çizgileri (Sekhar et al., 2007).

Ni et al. (2007a) düşük manyetik  $Re$  sayılarında MHD akışların simülasyonu için yaptıkları çalışmayı, (Ni et al. 2007b) nümerik olarak bir kod geliştirip, iki boyutlu analitik olarak çözümü mevcut ve elde edilebilir deneysel veriler kullanarak doğrulama çalışması yapmışlardır. Çalışmada iki ve üç boyutlu MHD akış simülasyonları yapılmıştır. Doğrulama alışmalarında  $Ha$  sayısının 100 ile  $10^4$  arasında değerler aldığını ve çözüm için dikdörtgensel gridlerin kullanıldığını belirtmişlerdir.

Attia (2007) alışmasında; dönen bir disk üzerindeki elektriksel iletkenliği olan bir akışkanın hidromanyetik akışını, emme veya enjeksiyon varlığında Hall etkisini

ihmal etmeksizin ısı transferi ile birlikte incelemiştir. Genel momentum ve enerji denklemlerini sonlu farklar metodunu kullanarak nümerik olarak çözmüştür. Çalışma sonucunda, Hall akımının, emme veya enjeksiyon ile birlikte dahil edilmesinin, hız ve sıcaklık alanlarında önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

Sadeghy et al. (2007) yaptıkları çalışmada, Jeffrey-Hamel viskoelastik akışkanlar akışlarında hidrodinamik ayrılmayı kontrol etmek için manyetik alanların uygulanabilirliğini teoriksel olarak incelemiştir. Teorik inceleme için akışın simetrik ve sadece radyal olduğunu kabul eden bünye denklemleri ile ikinci derece modeline uyan viskoelastik bir akışkanın laminer, iki boyutlu akışı için yerel bir benzerlik çözümü bulmuşlardır. Yapılan kabuller altında daralan/genişleyen kanal boyunca akışkanın MHD akışı için üçüncü dereceden lineer olmayan adi diferansiyel denklem (ODE) seçilmiştir. Mevcut üç fiziksel sınır şartları ile bu adi diferansiyel denklemin nümerik olarak çözülmesinde Chebyshev nokta sıralama yöntemini kullanmışlardır. Sonuçlar Reynold sayısı, Weissenberg sayısı, kanal yarım açısı ve manyetik sayı gibi parametreler yoluyla sunulmuştur. Tüm bu parametrelerin Jeffrey-Hamel akışlarının hız profilleri üzerinde çok büyük bir etkisinin olduğu yazarlar tarafından bulunmuştur. Manyetik alan etkisi, daralan kanallarda merkez hattı hızını geçtiği için duvar yakınındaki akışkan elemanlarını zorladığı ve genişleyen kanallarda ayrılmanın ortadan kalktığı öngörüldüğünden daha dikkat çekici olduğu bulunmuştur. İlginç bir biçimde akışkan ayrılmasını geciktiren manyetik alan etkisi, ne kadar belirgin ise akışkanın esnekliğinin o kadar yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Abbasov et al. (2007) elektriksel iletkenliği olan sıvıların, manyetik alan etkisinde bulunan iki paralel disk arasındaki akış özelliklerini ve ısı transfer özelliklerini teorik olarak incelemiştir. Sabit dış gerilim kaynağından beslenen iletken levhalar arasında oluşan akımın indüklediği manyetik alanın, Ohm ısınmasının ve sıvıdaki ısı dönüşümünün özelliklerini analitik çözüm sonuçlarına göre belirlemiştir.

Özcan et al. (2007) yaptıkları hesaplamalı çalışmanın, iki boyutlu pürüzsüz yüzeylere sahip mikro kanallarda sıkıştırılmaz Newtonyen akışa, dışarıdan uygulanan manyetik alan etkisindeki akışın ve bireysel demir parçacıklarının dinamiği üzerine odaklandığını belirtmişlerdir. Parçacık dinamiğinin Matlab kodu kullanılarak ayırık



faz, akışkanın ise Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Fluent programı kullanılarak devamlı (taşıyıcı) faz olarak simüle edildiğini ifade etmişlerdir. Çalışmada, parçacık ve akışkan faz arasındaki etkileşim, akışkan fazı simülasyonundan tahmin edilen HD kuvvetler olarak ilave edildiğini ve uniform olmayan manyetik alan altında parçacık fazı çözümünden belirlenen parçacık yerlerinin güncellendiğini açıklamışlardır. Uniform olmayan manyetik alan kuvvetleri parçacıkları magnet bölgesine taşımış ve parçacıkların burada toplanmaları ile sonuçlanmıştır. Manyetik alan altında demir parçacıklarının ve taşıyıcı akışkan akışının tahmin edilen dinamiği yazarların önceki çalışması ile uyum içerisinde olduğu çalışmada belirtilmiştir. Sonuç olarak mikro kanallarda dışarıdan uygulanan manyetik alanın parçacık yerlerini ve akışkan akışının kontrol edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Nakaharai et al. (2007) çalışmalarında, yüksek Pr sayılı elektriksel iletkenliği olan bir akışkanın türbülanslı akışının yerel ve ortalama ısı transferine enine manyetik alanın etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Türbülanslı akış alanı için elde edilebilir nümerik simülasyon dataları yardımıyla manyetik alandan dolayı ısı transfer mekanizmasını dikkate almışlardır. Enine manyetik alanın ısı transferi üzerindeki etkisinin, sıcaklık dalgalanmalarını bastırdığını ve manyetik alana paralel yönde duvara yakın bölgelerde ortalama sıcaklık düşüşünün yükselmeye başladığını belirtmişlerdir. Manyetik alana dik yönde ortalama sıcaklık düşüşünü, sıcaklık dalgalanması ile karşılaştırdıklarında herhangi bir etkinin olmadığını görmüşlerdir.

Wan and Turek (2007) çalışmalarında; büyük miktarlarda hareketli parçacıklar içeren iki fazlı katı-sıvı akışkan akışının detaylı simülasyonu için çoklu-grid sonlu elemanlar metodunu sunmuşlardır. Akış ve parçacık fazı arasındaki etkileşim için parçacık şekli, boyutu ve sayısı bağımsız olarak seçilebilen, tüm hesaplama alanını kaplayan sonlu elemanlar metoduna dayalı açık hayali sınır metodunu kullanmışlardır.

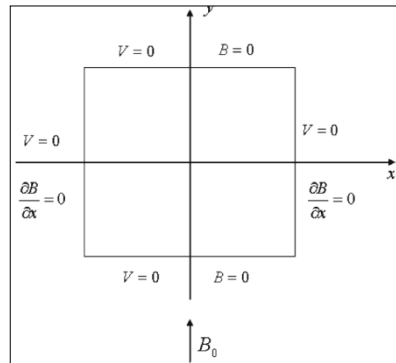
Khan et al. (2008) çalışmalarında, gözenekli ortam boyunca MHD Sisko akışkanın akışı için bir analitik çözüm sunmuşlardır. Gözenekli ortamdaki lineer olmayan akış problemini, gözenekli ortamda Sisko akışkan akışını değerlendirmek için modifiye

etmiş, Darcy kanunlarını tanıtarak, formüle etmişlerdir. Analitik sonuçları, Homotopy analiz metodunu kullanarak elde etmişlerdir. Elde edilen analitik çözümleri tekrar ilişkileri ile kapalı olarak tanımlamış ve çalışılan akışkanın malzeme parametrelerinin kabul edilebilir değerleri için sonuçların verilebileceğini ifade etmişlerdir.

Takeuchi et al. (2008) çalışmalarında, Filibe ( $\text{Li}_2\text{BeF}_4$ ) akışkanına MHD etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, makalede PIV (Particle Image Velocimeter) ölçme tekniğini kullanarak, manyetik alan altındaki potasyum hidroksit sulu çözeltisinin türbülanslı boru akışına ait deneysel sonuçları vermişlerdir. Deneysel sonuçlar ile direkt nümerik simulasyon (DNS) verilerini karşılaştırmışlardır. PIV ölçümlerini  $\text{Re}=11300$  değerinde ve değişik Hartman sayılarında yapmışlardır. Çalışmada, boru merkezindeki düz hız profili ve çeper yakınındaki hız düşüşü tipik MHD akış özelliklerini göstermiştir.  $\text{Ha}=10$ 'a kadar PIV ve DNS sonuçlarının uyumluluk gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Hayat et al. (2008) dördüncü dereceli akışkanların dairesel bir borudaki MHD sıkıştırılmaz akışın analitik çözümü üzerine yaptıkları çalışmada, genel lineer olmayan denklemlerin çözümü için Homotopy analiz metodunu kullanmışlardır.

Sezgin ve Bozkaya (2008) yaptıkları çalışmada; problem geometrisi Şekil 2.7'deki gibi tanımlanan, manyetik alan altında biri iletken diğeri yalıtılmış karşılıklı bir çift duvara ve iletken paralel duvarlara sahip dikdörtgensel bir kanal içindeki sıkıştırılmaz akışkanın MHD akışını incelemişlerdir.



Şekil 2.7. Problem geometrisi (Sezgin ve Bozkaya, 2008).

MHD denklemlerin çözümü için sınır eleman metodu kullanılmış olup Ha sayısının 300 değerine kadar çözümler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, kanallarda iyi bilenen MHD akış karakteristiklerini, hız ve indüklenen manyetik alan konturlarını Hartmann sayısının farklı değerleri için sunmuşlardır.

Duwairi and Abdullah (2008) çalışmalarında; MHD mikro pampalarda akışkan akışını incelemek için 2 boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Zamana bağlı, lamier, sıkıştırılmaz akış denklemlerini sonlu farklar metodu ve SIMPLE algoritması kullanarak nümerik olarak çözmüşlerdir. Mikro pampa, uygulanan elektrik alanı ve dik manyetik alan arasındaki etkileşim sonucu oluşan Lorentz kuvveti ile tahrik edildiğini belirtmişlerdir. Zamana bağlı hız profiline, Hartmann sayısının etkisini ve giriş bölgesinin uzunluğunu incelemişlerdir. Çalışmada; elektriksel iletkenlik ve manyetik akı yoğunluğunun kontrolünün, giriş bölgesinin uzunluğunun kontrolüne imkân vereceğini bulmuşlardır.

Chaudhary and Jain (2008) çalışmalarında, zamana bağlı, hidromanyetik ve gözenekli bir ortam içerisine yerleştirilmiş dikey bir plakadan, doğal taşınım akışının ısıl davranışını analitik olarak incelemişlerdir. Genel denklemleri kapalı formda Laplace dönüşüm tekniğini kullanarak çözmüşlerdir. Sonuçları, hız, sıcaklık, etki mesafesi, Nu sayısı ve yüzey sürtünmesi için elde etmişlerdir. Çeşitli parametrelerin akış değişkenleri üzerindeki etkisini tartışmışlar ve grafik olarak sunmuşlardır.

Balan et al. (2008) yaptıkları çalışmanın, ferro akışkan ilave dilmiş su tabanlı ham petrol emülsiyon akışkanların manyetik ve elektrik alan içinde reolojik özelliklerini ve deneysel araştırması üzerinde odaklandığını belirtmişlerdir. Deneyselde asfaltik ve parafanik olmak üzere iki tip ham petrol kullanmışlardır. Numuneler manyetik alan varlığında zayıf bir şekilde etkilenmiş ve elektrik alan içinde neredeyse izolatör (yalıtıcı) gibi davrandıklarını belirtmişlerdir. Çalışmanın esas amacının, elektrik ve manyetik alan altında karmaşık akışkanların, hangi ölçüde reometrenin, numunelerin iç yapısı hakkında değerli bilgiler verebileceğinin belirlenmesi olduğunu ifade etmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda karmaşık akışkanların anormal reolojik davranışlar sergilediklerini bulmuşlardır.

Ghotbi (2009) lineer olmayan bir tabaka üzerindeki MHD akış modelinin çözümü için Homotopy analiz metodunu kullanmıştır. Çalışmada, sıkıştırılmaz viskoz bir akışkanın sınır tabaka problemini inceleyerek, lineer olmayan diferansiyel denklemlerin çözümünü elde etmek için Homotopy analiz metodunu uygulamıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Homotopy analiz metodunun lineer olmayan diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanımının kolay ve uygulanabilir bir teknik olduğunu göstermiştir.

Hayat et al. (2009) farklı manyetik alan değerleri altında viskoz akışkanın kararlı akışını, Adomian analiz metodu ve Pade yaklaşımıyla incelemiştir. Yapılan teorik çalışmada, lineer olmayan denklemlerin seri çözümlerini geliştirmişler ve bulunan sonuçları mevcut sonuçlarla karşılaştırdıklarında aralarında mükemmel bir uyumun olduğunu bulmuşlardır.

Denghan and Mirzaei (2009) çalışmalarında; isteğe bağlı iletken duvarlara sahip dikdörtgen kesitli boru boyunca kararsız MHD akış için hız ve manyetik alan denklemlerinin nümerik çözümünü elde etmede Meshless Local Petrov-Galerkin metodunu kullanmışlardır. Hesaplamaları farklı Hartmann sayıları ve değişik zaman dilimlerindeki duvar iletkenlikleri için yapmışlardır. Metodun, yerel zayıf forma (local weak form) ve hareketli en küçük kareler yaklaşımına dayalı olduğunu belirterek, çalışma sonunda; hız ve indüklenen manyetik alan davranışlarını gösteren sonuçları sunmuşlardır.

Prasad et al. (2009) çalışmalarında; yarı-sonsuz, eş sıcaklıkta olmayan, gergin bir levha üzerinde iç ısı üretimi ile birlikte Newtonyen olmayan Power-law akışkanın MHD akışı için bir nümerik çözüm sunmuşlardır. Isıl iletkenliğin sıcaklıkla lineer olarak değiştiğini kabul etmişlerdir. Momentum ve enerji denklemlerinden türetilen kısmi diferansiyel denklemleri uygun sınır şartları altında klasik benzerlik dönüşümlerini kullanarak adi diferansiyel denklemlere dönüştürmüşlerdir. Problemin çözümünde Keller-box metodunu kullanmışlardır. Momentum ve ısı sınır tabaka kalınlıklarının değişik ısı iletkenlik varlığında/yokluğunda artan power-law indeksiyle birlikte düştüğünü ifade etmişlerdir. Sonuç olarak Power-law indeksi ve

manyetik parametrelerinin akış hız profillerini düşürmede ve sınır tabaka kalınlığını azaltmada etkisi olduğunu çalışmada belirtmişlerdir.

Abdelkhalek (2009) yaptığı çalışmada; hareketli geçirgen dikey bir yüzeydeki hidromanyetik akışa, ısı ve kütle transferinin etkisi için nümerik sonuçlar sunmuştur. Hareketli geçirgen bir yüzey üzerinde MHD doğal konveksiyon akışının momentum, ısı ve kütle transferi karakteristiklerini incelemek için bir analiz yapmıştır. Yüzeyin lineer sıcaklıkta tutulduğunu belirtmiştir. Lineer olmayan birleşik sınır tabaka denklemlerini adi diferansiyel denkleme dönüştürmüş ve pertürbasyon tekniği ile çözmüştür. Çözümün, manyetik alan şiddeti parametresi, Pr sayısı, Sc sayısı, kaldırma kuvveti oranı ve emme/üfleme parametresi gibi birçok yönetici parametreye bağlı olduğunu bulmuştur. Çalışma sonunda, parametrelerin değişik kombinasyonlarında, boyutsuz hız profili, sıcaklık profili, derişiklik oranı, yerel sürtünme katsayısı ve yerel Nu sayısı için nümerik sonuçları sunmuştur.

Grosan et al. (2009) çalışmalarında, gözenekli ortam ile doldurulmuş iç ısı üretimi olan dikdörtgensel boşluk içinde kararlı MHD doğal taşınım akışını nümerik olarak incelemişlerdir. Yatay düzleme  $\gamma$  açısı ile eğimli uniform bir manyetik alanı dışarıdan uygulamışlardır. Yönetici parametre değerlerini, eğim açısı;  $\gamma=0, \pi/0, \pi/4, \pi/2$  Hartman sayısı;  $Ha=0,1,5,10$  ve  $50$ , Rayleigh sayısı;  $Ra=10, 100, 103, 105$  ve en boy oranı;  $a=0.01, 0.2, 0.5$  ve  $1$  olarak almışlardır. Çekirdek konveksiyon şiddetinin, kabul edilen parametrelerden oldukça etkilendiğini belirtmişlerdir. Boşluğun alt duvarında  $\gamma$  artarken yerel Nu sayısının düştüğü üst duvarda ise tam tersi bir durum olduğunu bulmuşlardır. Sunulan sonuçların daha önce yayınlanmış literatürdeki çalışmalarla uyum içerisinde olduğunu ifade etmişlerdir.

Khan et al. (2009) çalışmalarında; dairesel bir borudaki MHD Sisko akışkanın kararsız akışını nümerik olarak incelemişlerdir. Sisko akışkanın temel ilişkisine dayalı, lineer olmayan denklemleri başlangıçta modellemiş ve sonra nümerik olarak çözmüşlerdir. Akış karakteristikleri üzerine çeşitli parametrelerin etkisini, özellikle  $n$  güç indeksi,  $b$  Newtonyen olmayan akışkanın malzeme parametresi ve  $B$  manyetik parametreyi sayısal olarak incelemiş ve çeşitli grafikler ile çalışma sonunda sunmuşlardır.

Shakeri and Dehghan (2011) dikdörtgensel bir kesitteki boru boyunca MHD kararsız akış için birleşik hız ve manyetik alan denklemlerini, Hermit interpolasyon yolu ile geliştirilen spectral element tekniği ve sonlu hacimler metodunu kullanarak çözmüşlerdir. Çalışmalarında hız ve indüklenen manyetik alanı, değişik Hartmann sayıları, duvar iletkenliği ve uygulanan manyetik alan oryantasyonu için çalışmışlardır. Nümerik sonuçları benzer problemlerin analitik çözümleri ile karşılaştırdıklarında çok iyi sonuçlar bulmuşlardır.

Türkyılmazoğlu (2011) çalışmasında, sabit bir açısal hız ile dönen bir disk tarafından hareket ettirilen sıkıştırılmaz, Newtonyen, elektriksel iletkenliği olan bir akışkan için, kararlı Navier-Stokes denklemlerinin tam çözümünü yapmıştır. Uniform bir manyetik alanı disk düzlemine dik olarak uygulamıştır.

Gupta et al. (2011) çalışmalarında, enine uniform bir manyetik alan varlığında sonsuz gözenekli bir plaka üzerinde viskoz sıkıştırılmaz elektriksel iletkenliği olan bir akışkanın kararlı akış durumuna Hall parametresinin ( $m$ ) etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, birincil akış hızının artan  $m$  ile birlikte düştüğünü, çapraz akış hızının ise başlangıçta arttığını ve sonra düştüğünü ifade etmişlerdir. Benzer sonuçları da indüklenen manyetik alan değişimleri için elde etmişlerdir.

Xiaomei et al. (2011) çalışmalarında iki boyutlu MHD kanal akışı ve Hall etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Hesaplama modelinin, elektrik ve manyetik alan kaynak terimleri, Maxwell denklemleri ve genelleştirilmiş Ohm kanunu ile bütünlük Navier-Stokes denklemlerini içerdiğini belirtmişlerdir. Hall etkisini de dikkate alarak elektrik potansiyel denklemi için sınır şartlarını belirlemişler ve MHD kanal akışını nümerik olarak simüle etmişlerdir.

Dritselis et al. (2011) çalışmalarında, manyetiklenebilen akışkanların türbülanslı kanal akışları için doğrudan nümerik simülasyon yöntemini kullanarak Lorentz kuvvetinin, parçacık taşınması ve çökmesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Düşük manyetik Re sayılarında akışkan akışı için MHD denklemleri elde etmişler, parçacık hareketinin, sürüklenme, kütle ve basınç gradyeni kuvvetleri ile belirlendiğini ifade etmişlerdir.

Manyetik alanın akış hareketlerine olan etkisi, literatürde MHD akış olarak yer almış ve yukarıda geçen çalışmalardan da görülebileceği gibi Hartmann'dan (1937) sonra bir çok araştırmacının dikkatini çekerek üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı ve yapılmakta olduğu bir konu haline gelmiştir. MHD akış çalışmalarında, incelenecek olan akışkan tek fazlı olabileceği gibi, katı-sıvı, sıvı-gaz gibi iki fazlı da olabilmektedir.

Katı-sıvı iki fazlı akışa, madencilik, tarım, kimya, gıda gibi birçok alanlarda rastlanmaktadır. Bu akışlarda sıvının hızı ve debisi ile katı madde miktarının bilinmesi oldukça önemlidir. Katı-sıvı iki fazlı karışımlar üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış, kararlı ve kararsız akış hareketlerinin incelenebilmesi için farklı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Dağlı ve Kaleli (2000) katı-sıvı iki fazlı akış için Moddy diyagramının uygulanabilirliğini incelemiştir. Öztürk vd (2001) su taşkınlarıyla taşınan katı madde miktarları bulmak için eldeki verileri kullanarak debi ile katı madde miktarı arasında bir bağıntı geliştirmiştir. Zhang et al. (2004) katı-sıvı bir boyutlu akışta deneysel verilerle simülasyon ve nümerik hesaplama yaparak bunları karşılaştırmıştır. Badr et al (2005) katı-sıvı iki fazlı akışta, ani çap değişimi olan dikey bir boruda katı madde miktarı ve sıvı hızını, üç boyutlu matematik model kurarak, farklı parçacık çapları ve farklı hızlar için katı madde miktarını bulmuşlardır. Çok fazlı akışkanların (karışımların) kararsız hareketlerinin incelenebilmesine imkan sağlayan modellerden birisi de Rahmatulin (1956) tarafından verilen, (Latipov, 1963; Fayzullayev, 1966) ve diğer bilim adamları tarafından daha da geliştirilmiş olan fazların karşılıklı etkileşim halinde hareketi modelidir. Bu model Racabov (Recebli), (1990) tarafından kullanılmış olup, çalışmasında akışa dik yönde uygulanan sabit şiddetli homojen bir manyetik alanın tek fazlı akışkanların ve iki fazlı karışımların (demir tozu ve ham petrol) iki paralel levha arasındaki ve silindirik borudaki sabit basınç değişimi altındaki kararlı ve kararsız hareketlerine etkilerini incelemiştir. Problemin çözümünde tek ve çift fazlı akışkanlar için yazılan MHD denklemleri ve akışın sürekliliği denklemlerini kullanarak, denklem sistemlerinin analitik çözümlerinde Laplace ve Loran dönüşümlerinden, D'alambert ve Slezkin-Targ yöntemlerinden, sayısal hesaplamalarda ise Sonlu Farklar metodundan yararlanmıştır. Analitik çözümler sonucunda bir ve iki fazlı akışkanların fazlarının yerel hızları ve debilerinin fazların

fiziksel özelliklerine, uygulanan manyetik alan şiddetine (indüksiyonuna), boru boyutlarına, basınç değişimine, fazlar arasındaki karşılıklı etkileşim katsayısına bağlı olan ifadeleri elde etmiştir. Yapılan hesaplamalarda tek fazlı akışkanların akış hızlarının manyetik alan etkisinden azaldıklarını göstermiştir. Elektriksel iletkenliği olan ve olmayan fazlardan oluşan iki fazlı karışımlarda ise manyetik alan etkisinden iletken fazın yerel hızlarının doğrudan, yalıtkan fazının ise fazlar arasındaki karşılıklı etkileşim katsayısından dolayı dolaylı olarak azaldıklarını tespit etmiştir.

Bu tez çalışması konusuna, Kurt ve Recebli (2008)'de yaptıkları çalışma öncülük etmiş ve konunun bu noktalara gelmesindeki önemi büyük olmuştur. Yazarlar çalışmalarında, iki fazlı akışkanların silindirik cam borudaki akışına, elektrik ve manyetik alan etkilerini incelemişlerdir. Akışkanın birinci fazı olarak mikron boyutlarında demir tozu, ikinci fazı olarak da saf suyu seçmişlerdir. Akış modelinin, karşılıklı etkileşim halindeki hareket modeli olup, manyetikleşebilen faz için yazılan hareket denkleminde elektromanyetiksel kuvvetin etkisini ifade eden bir terim eklenmek suretiyle oluşturulduğunu belirtmişlerdir. Modelden elde edilen denklemleri, Laplace ve D'Alambert yöntemlerini kullanarak analitik olarak çözmüşlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, elektrik ve manyetik alanın, direkt olarak etkilediği iletken fazı aracılığı ile karşılıklı etkileşim halinde bulunan iletken olmayan fazı da etkileyerek akış hız ve debilerinde değişimlerin meydana geldiğini bulmuşlardır.

Aynı problem, silindirik bir boruda sıkıştırılamaz, laminer kararsız akış durumu için incelenmiş olup Gedik vd. (2012a) çalışmalarında yer almıştır. Burada akışa ve birbirine dik olarak yöneltilen elektrik ve manyetik alan etkisi altında kalan iki-fazlı (katı-sıvı) akışkana ait MHD denklemler elde edilmiştir. Katı ve sıvı faz için elde edilen bu 1 boyutlu parabolik tip kısmi diferansiyel denklemler MATLAB programında Pdex4 fonksiyonu kullanılarak nümerik olarak çözülmüş ve akışın kararlı hale geldiği durum Kurt ve Recebli (2008)'nin çalışmalarındaki analitik çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak analitik ve nümerik çözüm sonuçlarının birbiri ile uyum içinde olduğu bulunmuştur. Aynı konu, farklı bir çalışmada Gedik vd. (2011) kararlı akış durumu için incelenmiş olup sonuçlar uluslararası bir sempozyumda sunulmuştur.



Yukarıdaki çalışmalar, 1 boyutlu çözümler içermekte olup benzer bir konu manyetik alan etkisi altında kalan sabit iki paralel plaka arası iki boyutlu akış problemi Gedik vd. (2012b) çalışmalarında incelenmiştir. Benzer bir biçimde manyetik alan etkisi altında kalan silindirik bir borudaki  $\text{Na}^{22}\text{K}^{78}$  ve GaInSn (Galinstan) sıvı-metal akışkanların akışı sırasıyla (Gedik vd. 2012c; 2012d) çalışmalarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizi ile 3 boyutlu nümerik olarak incelenmiş ve uluslararası sempozyumlarda sunulmuştur. Ayrıca manyetik ve elektrik alanın silindirik bir borudaki manyetik akışkanın akış hareketlerine etkisinin birlikte incelendiği, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile analizlerin yapıldığı farklı bir çalışma Gedik vd. (2012e) tarafından yapılmıştır.

Bu çalışmada ise viskoz, sıkıştırılmaz üç farklı özelliğe sahip manyetik akışkanın (A-B-C) silindirik bir boruda laminer Hidrodinamik (HD) ve Manyetohidrodinamik (MHD) akışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, manyetik alan indüksiyonunu oluşturabilmek için imal edilen bir elektromanyetik cihaz ortamında 10 ve 15 mm çaplarında, 300 mm uzunluğunda iki farklı silindirik boruda manyetik alanın akışkanın laminer akışına etkisi gözlemlenmiştir. Deneyler, manyetik alanın  $B= 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların doğruluğunu gösterebilmek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Analizi kullanılarak nümerik çalışma yapılmıştır. HAD analizinde sonlu hacimler tekniğine dayalı Fluent kodu kullanılmıştır. Fluent kodunda akışa ait genel denklemler, HD ( $B=0$ ) ve MHD ( $B\neq 0$ ) akış modelleri için çözülmüştür.

## BÖLÜM 3

### GENEL DENKLEMLER

Akışkanların hareketi ve dış kuvvetlerle olan etkileşimleri kütle, momentum ve enerji korunumlarını ifade eden ve birim deformasyon tensörü tanımını açıklayan denklemler ile tanımlanır. Bu denklemler, onları türeten C.L.M.H. NAVIER (1785-1836) ve Sir George Gabriel STOKES (1819-1903)'a atfen, Navier-Stokes denklemleri olarak bilinirler.

MHD, manyetiklenebilen akışkanların manyetik alan altındaki davranışlarını inceleyen bir bilim dalı olduğu önceki bölümlerde belirtmişti. Bu nedenle elektromanyetik alan etkisinde bulunan silindirik bir boruda HD ve MHD denklemlerinin oluşturulmasında korunum, momentum ve elektromanyetik denklemlerin elde edilmesi gerekmektedir. Aşağıda bu denklemler ayrıntılı olarak türetilmiştir.

#### 3.1. MOMENTUM DENKLEMİ

Kütlesi  $m$  olan ve  $\mathbf{F}_{\text{net}}$  kuvvetine maruz bir sistem için Newton'un ikinci yasası;

$$\Sigma \mathbf{F} = m\mathbf{a} = m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{V})}{dt} \quad (3.1)$$

Eşitlikte;  $m\mathbf{V}$  sistemin doğrusal momentumudur. Sistemin içinde yoğunluğun ve de hızın bir noktadan diğerine değişebileceği için Newton'un ikinci yasası daha genel olarak;

$$\Sigma \mathbf{F} = \frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{V} dV \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Eşitlikte;  $m = \rho dV$ ,  $dV$  diferansiyel hacim elemanının kütlesi,  $\rho \mathbf{V} dV$  ise onun momentumudur. Böylece Newton'un ikinci yasası sonsuz küçük sabit bir kontrol hacmine uygulandığında sistemin doğal momentumun zamana bağlı olarak değişiminin kontrol hacmine etki eden dış kuvvetlerin toplamına eşittir şeklinde de ifade etmek mümkün olur ve momentum denklemi genel olarak aşağıdaki şeklini alır.

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \text{div}\mathbf{T} + \rho \mathbf{f} \quad (3.3)$$

Eşitlikte,  $\mathbf{T}$  gerilme tensörünü ve  $\mathbf{f}$  dış kuvvetleri ifade etmektedir. Akış modelinin oluşturulmasına öncelikle momentum denkleminin türetilmesi ile başlanılmıştır. Newtonyen akışkanlara ait bünye denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + \mu \mathbf{A}_1 \quad (3.4)$$

Eşitlikte,  $p$ ; basınç,  $\mu$ ; viskozite,  $\mathbf{A}_1$ ; Rivlin-Ericksen tensörünü göstermektedir. Bu tensör şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{L} + \mathbf{L}^T \quad (3.5)$$

Eşitlikte,  $\mathbf{L} = \text{grad}\mathbf{v}$  dir. Buna göre, lineer momentum denklemi aşağıdaki şekilde yazılır. Eşitlik 3.3'teki  $\rho \mathbf{f}$ , dış kuvvetler MHD model denklemlerinin oluşturulmasında anlatılacaktır.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \text{div}\mathbf{T} \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.4) ve (3.5), eşitlik (3.6)'da yerine yazılır ve gerekli işlemler yapılırsa,

$$\rho \left( \frac{1}{2} \text{grad}|\mathbf{v}|^2 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} \right) = -\text{grad}p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlikte,  $\boldsymbol{\omega} = \text{rot}(\mathbf{v})$  olup, hız ve gradyen operatörü aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\mathbf{v} = v_r(r, \theta, z)\mathbf{i}_r + v_\theta(r, \theta, z)\mathbf{i}_\theta + v_z(r, \theta, z)\mathbf{i}_z \quad (3.8)$$

$$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (3.9)$$

Hız operatöründeki  $v_r$ ; r yönündeki hızı,  $v_\theta$ ;  $\theta$  yönündeki hızı,  $v_z$ ; z yönündeki hızı ifade etmektedir. Süreklilik denklemi de açık bir şekilde ifade edildiğinde eşitlik (3.10) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3.10)$$

Akış modelinin oluşturulabilmesi için, eşitlik (3.7)'deki vektörel terimlerin hesaplanması gerekmektedir ve  $|\mathbf{v}|^2$  teriminden başlanarak bütün terimler tek tek hesaplanır. Buna göre,  $|\mathbf{v}|^2$  terimi aşağıdaki şekilde yazılır:

$$|\mathbf{v}|^2 = v_r^2 + v_\theta^2 + v_z^2 \quad (3.11)$$

Yukarıda yazılan eşitliğin aşağıdaki gibi gradyeni alınıp ikiye bölünürse,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \text{grad}|\mathbf{v}|^2 = & \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_\theta \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \mathbf{i}_r + \left( \frac{v_r}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_z}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right) \mathbf{i}_\theta \\ & + \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial z} + v_\theta \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \mathbf{i}_z \end{aligned} \quad (3.12)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (3.7)'deki  $\boldsymbol{\omega}$  terimi ise aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\boldsymbol{\omega} = \text{rot}(\mathbf{v}) = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \mathbf{i}_r & r\mathbf{i}_\theta & \mathbf{i}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ v_r & rv_\theta & v_z \end{vmatrix} \quad (3.13)$$

Eşitlik (3.13)'ün determinantı alınır,  $\boldsymbol{\omega}$  terimi aşağıdaki şekilde hesaplanmış olur:

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{\partial}{\partial z} (rv_\theta) \right) \mathbf{i}_r + \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \mathbf{i}_\theta + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta) - \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) \mathbf{i}_z \quad (3.14)$$

Eşitlikte,  $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$  ifadesi, eşitlik (3.13) ve (3.8)'in vektörel çarpımıdır. Bu iki eşitliğin çarpımı sonucunda ise,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} = & \left[ v_z \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) - \frac{v_\theta}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta) - \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) \right] \mathbf{i}_r \\ & + \left[ \frac{v_r}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta) - \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) - \frac{v_z}{r} \left( \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{\partial}{\partial z} (rv_\theta) \right) \right] \mathbf{i}_\theta \\ & + \left[ \frac{v_\theta}{r} \left( \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{\partial}{\partial z} (rv_\theta) \right) - v_r \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] \mathbf{i}_z \end{aligned} \quad (3.15)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (3.12) ile eşitlik (3.15) toplanır,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \text{grad}|\mathbf{v}|^2 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} = & \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \mathbf{i}_r \\ & + \left( v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \mathbf{i}_\theta + \left( v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \mathbf{i}_z \end{aligned} \quad (3.16)$$

eşitliği elde edilir. Bu denklem hız bileşenleri cinsinden yazılırsa,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \text{grad}|\mathbf{v}|^2 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} = & \left( u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \mathbf{i}_r \\ & + \left( u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \mathbf{i}_\theta + \left( u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \mathbf{i}_z \end{aligned} \quad (3.17)$$

eşitliği elde edilir. Böylece eşitlik (3.7)'in sol tarafındaki ifadelerin tamamının hesaplanması tamamlanmış olur. Bundan sonrasında ise, eşitlik (3.7)'in sağ tarafındaki terimlerin hesaplanmasına geçilir, burada basınç gradyanı,

$$\text{grad } p = \frac{\partial p}{\partial r} \mathbf{i}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \mathbf{i}_\theta + \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{i}_z \quad (3.18)$$

şeklinde yazılır. Akış sıkıştırılmaz olduğu için hız vektörünün laplasiyeni şu şekilde hesaplanabilir.

$$\nabla^2 \mathbf{v} = -\text{rot}(\text{rot } \mathbf{v}) \quad (3.19)$$

Eşitlik (3.19) açık bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\text{rotrot}(\mathbf{v}) = -\frac{1}{r} \begin{vmatrix} \mathbf{i}_r & r\mathbf{i}_\theta & \mathbf{i}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1}{r} \left( \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{\partial}{\partial z} (rv_\theta) \right) & r \left( \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) & \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta) - \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) \end{vmatrix} \quad (3.20)$$

Eşitlik (3.20)'in determinanı alındığında,  $\text{rotrot}(\mathbf{v})$  aşağıdaki hale gelir.

$$\begin{aligned} \text{rotrot}(\mathbf{v}) &= \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r \partial \theta} - \frac{\partial^2 v_z}{\partial r \partial z} \right) \mathbf{i}_r \\ &+ \left( \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta \partial z} \right) \mathbf{i}_\theta \\ &+ \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} - \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta \partial z} \right) \mathbf{i}_z \end{aligned} \quad (3.21)$$

Eşitlikte,  $\text{rotrot}(\mathbf{v})$  ifadesini daha sade gösterebilmek için süreklilik denklemini kullanılırsa, eşitlik (3.10)'daki süreklilik denkleminin gradyanı alınır ve aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} &\left( \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right) \mathbf{i}_r + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right) \mathbf{i}_\theta \\ &+ \left( \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right) \mathbf{i}_z = 0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

Bu eşitlikte gerekli düzenlemeler yapıldığında;

$$\begin{aligned}
& \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_z}{\partial r \partial z} \right) \mathbf{i}_r \\
& + \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta \partial z} \right) \mathbf{i}_\theta \\
& + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta \partial z} \right) \mathbf{i}_z = 0
\end{aligned} \tag{3.23}$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (3.21), elde edilen bu eşitlik ile birlikte düzenlenirse,

$$\begin{aligned}
\nabla^2 \mathbf{v} = & \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \mathbf{i}_r \\
& + \left( \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right) \mathbf{i}_\theta \\
& + \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \mathbf{i}_z
\end{aligned} \tag{3.24}$$

eşitliği elde edilir. Böylece ivme terimlerinin hesaplanması tamamlanmış olur ve momentum denklemi için bileşenler yazılabilir duruma gelmiştir. Eşitlik (3.16), (3.18) ve (3.24) birlikte düzenlenirse, silindirik koordinatlarda HD akış için momentum denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur:

r bileşeni:

$$\begin{aligned}
\rho \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} \\
+ \mu \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right)
\end{aligned} \tag{3.25}$$

$\theta$  bileşeni:

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (3.26)$$

z bileşeni:

$$\rho \left( v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3.27)$$

### 3.2. ELEKTROMANYETİK DENKLEMLER

Elektromanyetik denklemler, MKS birim sisteminde verilmiş olup, manyetik alan genellikle Gauss terimiyle ifade edilmektedir (1 Tesla=  $10^4$  Gauss). Maxwell'in 1. kanun ifadesine göre elektrik alanın zamana göre değişimi manyetik alanı oluşturur. Buna göre, Maxwell'in 1. kanun ifadesi,

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.28)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.29)$$

şeklinde yazılır. Eşitlik (3.28)'in sağ tarafındaki son terim, deplasman akımı olarak tanımlanmaktadır. Maxwell'in 2. kanununa göre, manyetik alanın zamana göre değişimi elektrik alan oluşturur. Buna göre, Maxwell'in 2. kanun ifadesi,

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.30)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{c} p^* \quad (3.31)$$



şeklinde yazılır. Eşitliklerde,  $\mathbf{B}$  manyetik alan indüksiyonu (T),  $\mathbf{E}$  elektrik alan şiddeti (V/m),  $\mu$  manyetik geçirgenliği,  $c$  boşluğun elektriksel geçirgenliğini,  $p^*$  yük yoğunluğunu göstermekte olup,  $p^* = c(n^+ - n^-)$  değerine eşittir. Burada  $n^+$  iyonların sayısı,  $n^-$  ise elektronların sayısıdır.

Elektromanyetik alanın oluşturduğu kuvvet ise,

$$\mathbf{F}_{EM} = \eta(\mathbf{J} \times \mathbf{H}) = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (3.32)$$

eşitliği ifade edilir. Eşitlikte,  $\mathbf{J}$  elektrik akım yoğunluğunu göstermektedir. Elektrik akım yoğunluğu, Ohm kanununa göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (3.33)$$

Eşitlikte,  $\sigma$  akışkanın elektriksel iletkenliğini,  $\mathbf{V}$  ortalama akış hız vektörünü göstermektedir.

### 3.3. MHD AKIŞ MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Tek fazlı sıkıştırılmaz akışkanların kararsız akış hareketleri aşağıda verilen diferansiyel denklem sistemi ile ifade edilebilmektedir.

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\mathbf{N} + \mu \Delta \mathbf{V} \quad (3.34)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3.35)$$

Eşitlikte,  $N$  basınç gradyeni ( $\partial P / \partial z$ ) (Pa/m),  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesini ( $\text{kg/ms}$ ) göstermektedir.

Eşitlik (3.34) HD akış modeline ait denklem olup, bu denkleme elektromanyetik kuvveti ifade eden terimin (Eşitlik (3.32)) eklenmesiyle tek fazlı akış için MHD akış modeli denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -N + \mu \Delta \mathbf{V} + \mathbf{F}_{EM} \quad (3.36)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3.37)$$

Böylece, tek fazlı akışkanın akışa dik yönde uygulanan manyetik alandan nasıl etkilenebileceklerini inceleyebilmek için MHD akış modeli vektörel formda elde edilmiş olur. Eşitlik 3.36'da HD akışa ait olan ifadeler silindirik koordinatlarda açık bir biçimde Eşitlik 3.25-3.27'de yazılmıştı. Bu denklemler MHD akış modeli için tekrar düzenlenirse tek fazlı akış için aşağıdaki denklem sistemi elde edilir. Denklemlerde  $B=0$  yazıldığında HD akış modeli için denklemler elde edilmiş olunur.

r bileşeni:

$$\begin{aligned} \rho \left( v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial r} \\ + \mu \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) &+ \sigma(E_0 - B_0 v_r) B_0 \end{aligned} \quad (3.38)$$

$\theta$  bileşeni:

$$\begin{aligned} \rho \left( v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \\ + \mu \left( \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right) &+ \sigma(E_0 - B_0 v_\theta) B_0 \end{aligned} \quad (3.39)$$

z bileşeni:

$$\begin{aligned} \rho \left( v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} \\ + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) &+ \sigma(E_0 - B_0 v_z) B_0 \end{aligned} \quad (3.40)$$

## BÖLÜM 4

### MATERYAL METOD

Bu çalışmada ise viskoz, sıkıştırılmaz üç farklı özelliğe sahip manyetik akışkanın (A-B-C) silindirik bir boruda laminer Hidrodinamik (HD) ve Manyetohidrodinamik (MHD) akışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, manyetik alan indüksiyonunu oluşturabilmek için imal edilen bir elektromanyetik cihaz ortamında 10 ve 15 mm çaplarında, 300 mm uzunluğunda iki farklı silindirik boruda manyetik alanın akışkanın laminer akışına etkisi gözlemlenmiştir. Deneyler, manyetik alanın  $B= 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların doğruluğunu gösterebilmek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Analizi kullanılarak nümerik çalışma yapılmıştır. HAD analizinde sonlu hacimler tekniğine dayalı Fluent kodu kullanılmıştır. Fluent kodunda akışa ait genel denklemler, HD ( $B=0$ ) ve MHD ( $B\neq 0$ ) akış modelleri için çözülmüştür.

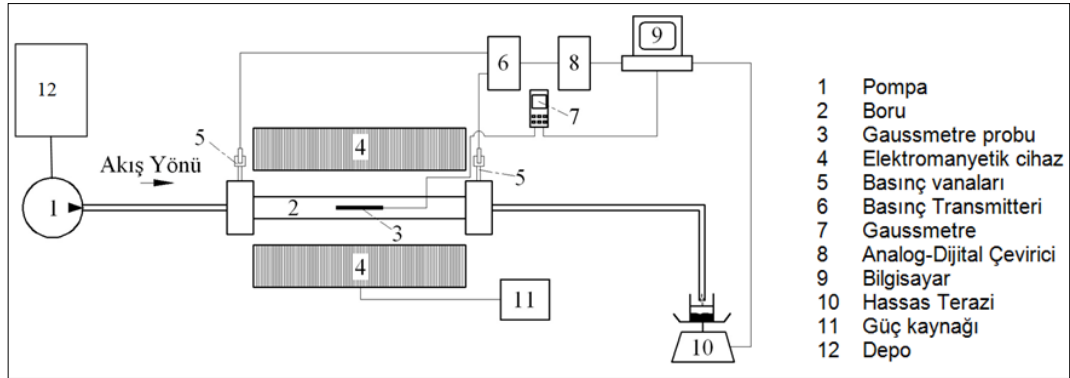
#### 4.1. DENEYSEL YÖNTEM

Deneysel çalışmada; 10-15 mm çap ve 300 mm uzunluğa sahip iki farklı silindirik boru ve üç farklı akışkan kullanılmıştır. Akışkanların fiziksel özelliklerinin, boru boyutlarının ve basınç gradyanının sabit kaldıkları durumda manyetik alan indüksiyonu  $B= 0-0.15$  T arasında 0.01 T aralıklarla değiştirilmiştir. Deneylerde akışkanlara uygulanan sabit manyetik alan indüksiyonunu oluşturabilmek için deney düzeneğinde bir elektromıknatis tasarlanıp imal edilmiştir. Maksimum 0.3 T manyetik alan değerine çıkabilen elektromanyetik cihazda istenilen manyetik alan değerlerinin oluşturulabilmesi için sargılara verilmesi gereken akım sisteme bağlanan ayarlanabilen bir güç kaynağı ile sağlanmıştır. Deneyler iki farklı akış modeli için gerçekleştirilmiş olup bunlar manyetik alanın uygulanmadığı ( $B=0$  T) HD akış modeli ve manyetik alanın uygulandığı ( $B\neq 0$ ) MHD akış modelidir. Her iki akış

modeli için manyetik alan bölgesindeki borunun giriş ve çıkış kısımlarına basınç transmitterleri bağlanarak fark basınç değerleri analog dijital dönüştürücü vasıtasıyla bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir. Borunun giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkları okunmuştur. Manyetik alan bölgesine yerleştirilen Gaussmetre probu ile manyetik alan indüksiyonu değerleri, aynı şekilde bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir. Ayrıca deney tesisatında bulunan dijital hassas terazi üzerindeki boşaltma kabında biriken akışkanın kütlesi ölçülerek yazılan bir program ile bilgisayara kütleli debi olarak kaydedilmiştir. Deneylerde kütleli debi, basınç ve manyetik alan indüksiyonu değerleri ölçülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Ölçülen kütleli debi değerleri ile akış yerel hızları hesaplanmış ve bu hesaplamalara göre hız profillerine ait grafikler oluşturulmuştur.

#### 4.1.1. Deney Düzenineğinin Oluşturulması ve Deneylerin Yapılması

Silindirik borularda üç farklı fiziksel özelliğe sahip manyetiklenebilen akışkanların, manyetik alan altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemek için Şekil 4.1'de şematik resmi verilen deney düzenineği tasarlanarak imal edilmiştir.

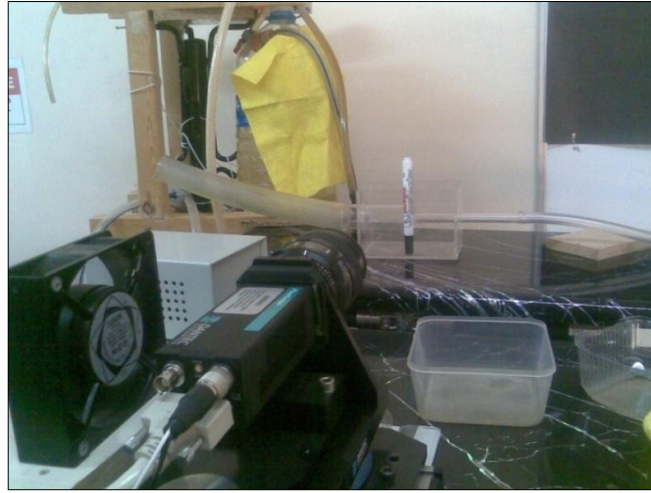


Şekil 4.1. Deney düzenineğinin şematik resmi.

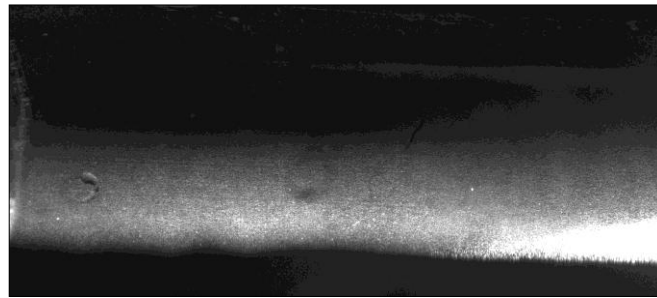
Şekil 4.1'de depoya doldurulan akışkan pompa aracılığı ile elektromanyetik cihazın kutupları arasına yerleştirilen borudan geçirilerek hassas terazi üzerinde bulunan boşaltma kabına aktarılmıştır. Manyetik alan bölgesindeki borunun giriş ve çıkış kısımlarına basınç transmitterleri bağlanarak basınç değerleri analog dijital dönüştürücü vasıtasıyla bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir. Manyetik alan

bölgesine yerleştirilen Gaussmetre probu ile manyetik alan indüksiyonu değerleri, aynı şekilde bilgisayara aktararak kaydedilmiştir. Ayrıca hassas terazi üzerindeki boşaltma kabında biriken akışkanın kütlesi ölçülerek yazılan bir program ile bilgisayara kütleli debi olarak kaydedilmiştir. Elektromanyetik cihazda istenilen manyetik alan değerlerinin oluşturulabilmesi için sargılara verilmesi gereken akım sisteme bağlanan ayarlanabilen güç kaynağı ile sağlanmıştır.

Deneysel çalışmada TÜBİTAK 110M030 nolu proje kapsamında akış hız ölçümleri için PIV (Particle Image Velocimeter) cihazı kullanılacağı öngörülmüştü. Bu doğrultuda akışkanlardan numune alınarak Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de görüldüğü gibi PIV cihazında denemeler yapılmış fakat akışkanın opak (saydam olmayan, ışığı geçirmeyen) bir yapıya sahip olması nedeniyle hız ölçümleri gerçekleştirilememiştir. Akışkan ile ilgili benzer durum Motozawa et al. tarafından ifade edilmiştir (<http://www.istp-22.org/proceedings/proceedings/documents/97.pdf>, 2011).



Şekil 4.2. PIV kamera ve lazer düzeneği.

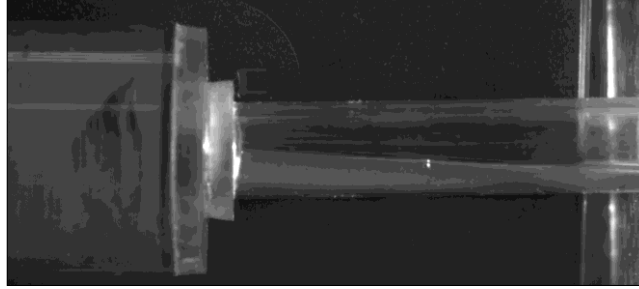


Şekil 4.3. PIV cihazında boru içindeki akış görüntüsü.

Benzer bir biçimde Şekil 4.4’de görülen hızlı kamera sistemi ile boru içi akış hızı görüntüleme işlemleri yapılmak istenmiş fakat bunda da başarılı olunamamıştır. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi hızlı kamera ile çekilmiş akışkanın boru içi akış görüntüsü elde edilmiş, fakat boru içi akış hız profilleri alınamamıştır.



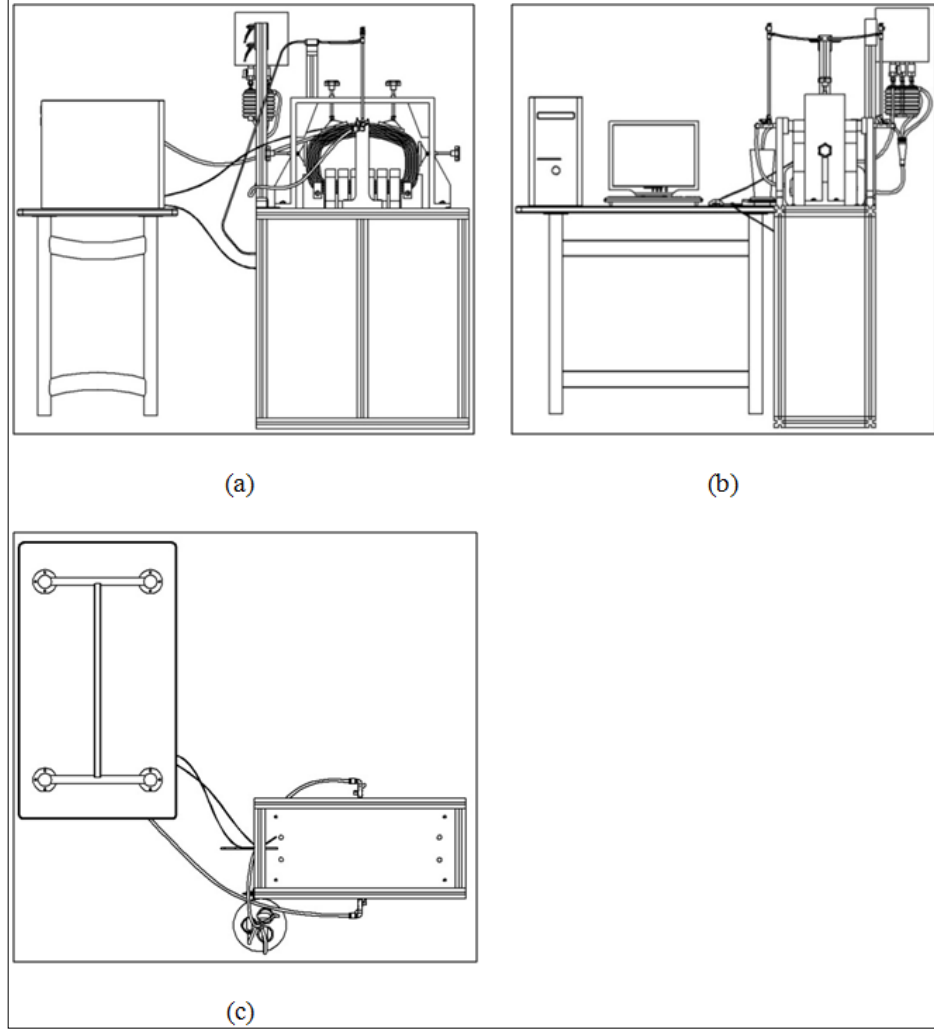
Şekil 4.4. Hızlı kamera ile akış görüntüleme deney düzeneği.



Şekil 4.5. Hızlı kamera ile akış görüntüleme sonucunda elde edilen akış görüntüsü.

Akışkanın hız ölçümleri, PIV cihazı ve hızlı kamera ile yapılamadığından deney düzeneğine ultrasonik flowmetre bağlanmış, ölçülen debi değerlerine göre hız ölçümleri elde edilme yoluna gidilmiştir. Ultrasonik flowmetre ile de PIV’de olduğu gibi akışkanın opak yapısından dolayı debi değerleri ölçülememiştir. Bu nedenle akışkanların hız ölçümleri, Nishiyama et. al (2011)’de olduğu gibi kütleli debi ölçümünden elde edilecek ortalama akış hızının belirlenmesi yöntemine göre yazılan bir programla bilgisayara bağlantısı yapılmış hassas terazi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de şematik resmi görülen deney tesisatı deneyler için hazırlanmış ve deneylerin yapım aşamasına geçilmiştir. Deneylerde Çizelge 4.1’de verilen fiziksel

özellikleri farklı Almanya BASF firmasından satın alınan üç farklı tür akışkan kullanılmıştır.

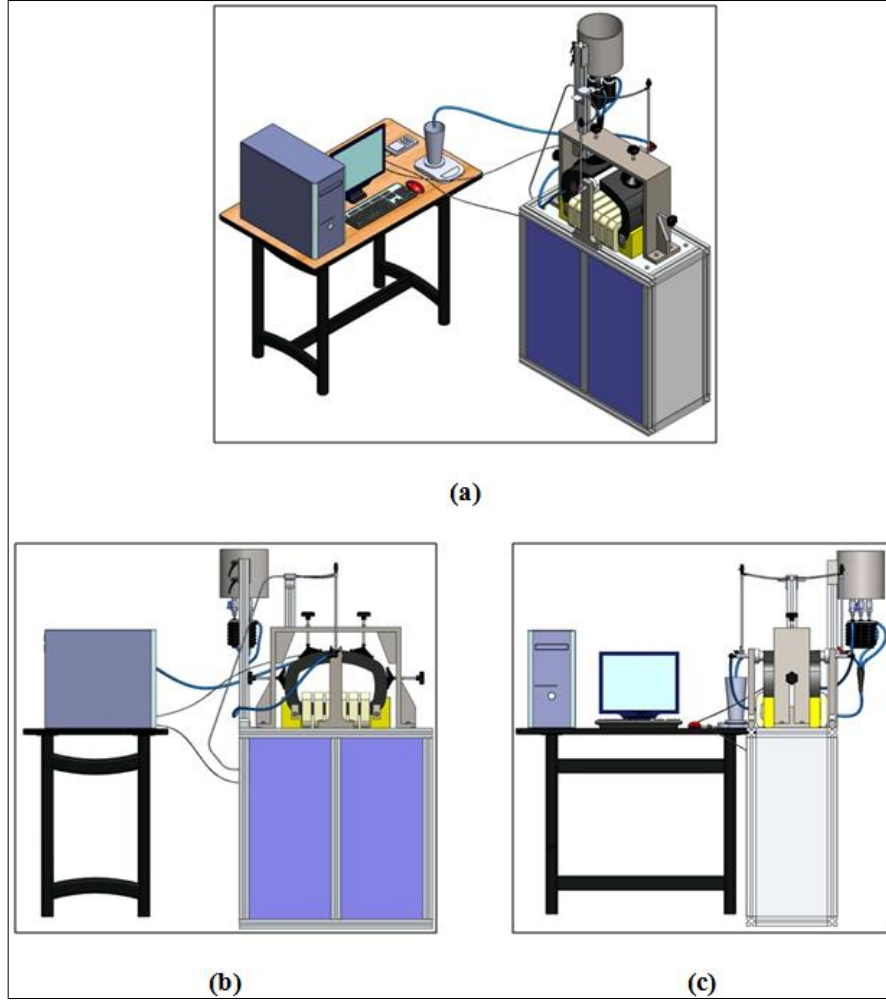


Şekil 4.6. Deney düzeneğinin teknik resim detayları, a) ön görünüş b) yan görünüş c) üst görünüş.

Çizelge 4.1. Akışkanların fiziksel özellikleri.

<b>Fiziksel özellikler</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	1805	1531.3	1300
Dinamik Viskozite (Pa.s)	0.9097	0.710	0.710
Taşıyıcı akışkan		Poly- $\alpha$ -olefin	
Katı faz		Demir tozu	

Akışkanın manyetik alan altındaki davranışını incelemek için kurulmuş olan deney tesisatının teknik resim çizimleri ve farklı açılardan çekilmiş fotoğrafları ile deneylerde kullanılan ölçü aletlerinin resimleri Şekil 4.6-4.16’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Deney düzeneğinin katı model resmi, a) dimetrik görünüş b) ön görünüş c) yan görünüş.





Şekil 4.8. Deney düzeneğinin önden fotoğraf görüntüsü.



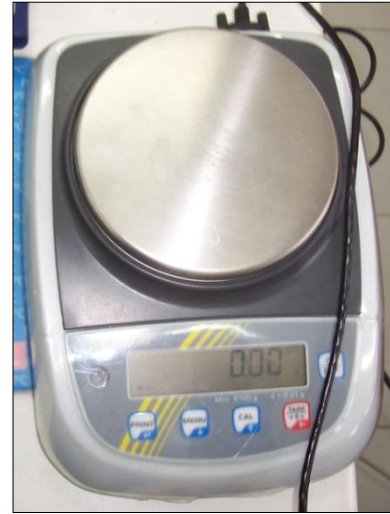
Şekil 4.9. Deney düzeneğinin yandan fotoğraf görüntüsü.

Deneyleerde, elektromanyetik cihazda oluşan manyetik alan indüksiyonu değeri ölçümleri, F.W.BELL 5180 Gauss/Tesla Meter model, 0-3 T (0-30000 Gauss) ölçüm aralığı, 0.01 ölçüm hassasiyeti ve bilgisayara USB bağlantı özelliği olan Şekil 4.10'da görülen Gaussmetre ile yapılmıştır. Kütlelel debi ölçümleri, KERN PLE 3100-2N model maksimum 3100 g, minimum 50 mg ölçme kapasitesine,  $\pm 0.02$  g ölçüm hassasiyetine,  $\pm 9$  V ve 1000 mA çalışma aralığı özelliklerine sahip Şekil 4.11'de görülen dijital hassas terazi ile yapılmıştır.

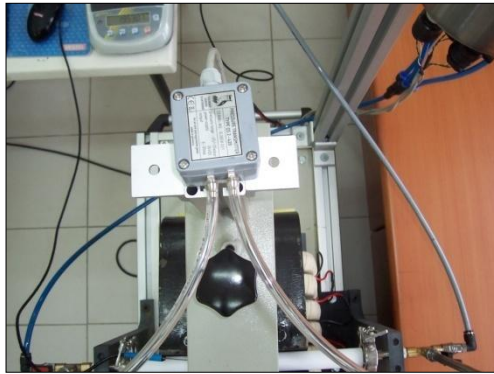
Manyetik alan bölgesindeki boru giriş ve çıkış kısımlarında ise TYPE DS 2-420 model basınç ölçüm aralığı  $\pm 100$  ve  $\pm 500$  mbar, ölçüm hassasiyeti  $\pm 0.01$ , 24 V DC gerilim ve çıkış akımı 4-20 mA özellikleri olan Şekil 4.12'de görülen iki farklı fark basınç transmitterleri kullanılmıştır. Deneysel sırasında ölçülen manyetik alan indüksiyon değeri, kütsel debi değeri, basınç değeri, güç kaynağına verilen akım değeri Şekil 4.13'de görüldüğü gibi bir bilgisayar programı yazılarak program üzerinde kaydedilmiş ve gerekli olan deneysel veriler alınmıştır.



Şekil 4.10. F.W.BELL 5180 Gaussmetre.



Şekil 4.11. Hassas dijital terazi.



Şekil 4.12. Deney düzeneğine bağlanmış fark basınç transmitterleri.



Şekil 4.13. Deneyel verilerin bilgisayara aktarılması.



Şekil 4.14. Manyetik alan indüksiyonu ölçümünün fotoğraf görüntüsü.



Şekil 4.15. Deney düzeneğinde depo ve pompaların fotoğraf görüntüsü.



Şekil 4.16. Deney düzeneği güç ünitesi.

Deney düzeneğinde oluşturulacak sabit manyetik alan değerleri için sargılara verilmesi gereken akım miktarını gösterir ayar panosu, sistemi açma kapama şalteri ve sigorta devre elemanları deney düzeneğinin ön panelinde olup Şekil 4.16'da görülmektedir. Deneyler, manyetik alan indüksiyonunun  $B= 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde üç farklı akışkan (A, B, C) ve 10-15 mm çaplara sahip iki farklı boru geometrisi için yapılmıştır. Her bir manyetik alan değerinde deneyler tekrarlanmış, sistem temizlenerek yeni deney için hazır hale getirilmiştir.

Boru çapı boyunca akış hız değerleri, deneysel çalışmada ölçülen kütleli debilere göre aşağıdaki yapılan hesaplamalar neticesinde Eşitlik 4.14 ve 4.15'e göre yapılmıştır. Lagrange interpolasyon polinomu yöntemine göre bilinen üç noktaya ikinci dereceden bir polinom uydurulabilmektedir. Bu polinomun genel ifadesi:

$$u(r) = ar^2 + br + c \quad (4.1)$$

şeklindedir ve a, b, c sabitlerinin değerlerini bulmak için aşağıdaki sınır şartları kullanılabilir. Buna göre;

$$r = r_0; \quad u = u_0$$

$$r = r_{+R}; \quad u = u_{+R} \quad (4.2)$$

$$r = r_{-R}; \quad u = u_{-R}$$

4.2 nolu sınır şartları kullanıldığında:

$$u_0 = ar_0^2 + br_0 + c \quad (4.3)$$

$$u_{+R} = ar_{+R}^2 + br_{+R} + c \quad (4.4)$$

$$u_{-R} = ar_{-R}^2 + br_{-R} + c \quad (4.5)$$

eşitlikleri elde edilir. Eşitlik 4.3-4.5 denklem sistemi halinde çözülür ve a, b, c sabitlerinin elde edilen ifadeleri Eşitlik 4.1 de yerlerine yazılıp düzenlenirse;

$$u(r) = \frac{(r - r_{-R}) \times (r - r_{+R})}{(r_0 - r_{-R}) \times (r_0 - r_{+R})} \times u_0 + \frac{(r - r_0) \times (r - r_{+R})}{(r_{-R} - r_0) \times (r_{-R} - r_{+R})} \times u_{-R} \\ + \frac{(r - r_0) \times (r - r_{-R})}{(r_{+R} - r_0) \times (r_{+R} - r_{-R})} \times u_{+R} \quad (4.6)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik 4.6'da aşağıdaki işaretlemler yapılır ve Eşitlik 4.6 tekrar düzenlenirse;

$$r_0 = 0; \quad u_0 = U_{\max}$$

$$r_{-R} = -R; \quad u_{-R} = 0 \quad (4.7)$$

$$r_{+R} = R; \quad u_{+R} = 0$$

$$u(r) = \frac{(r+R) \times (r-R)}{(r_0+R) \times (r_0-R)} \times U_{\max} + \frac{(r-r_0) \times (r-R)}{(-R-r_0) \times (-R-R)} \times 0$$

$$+ \frac{(r-r_0) \times (r+R)}{(R-r_0) \times (R+R)} \times 0 \quad (4.8)$$

$$u(r) = \frac{(r+R) \times (r-R)}{(0+R) \times (0-R)} \times U_{\max} \quad (4.9)$$

$$u(r) = \left( \frac{R^2 - r^2}{R^2} \right) \times U_{\max} \quad (4.10)$$

Laminer akış durumu için Eşitlik 4.10'daki  $U_{\max}$ :

$$U_{\max} = 2 \times U_{\text{ort.}} = 2 \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (4.11)$$

ifadesi ile bulunur. Eşitlik 4.10'u tekrar düzenlersek;

$$u(r) = \left( \frac{R^2 - r^2}{R^2} \right) \times 2 \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (4.12)$$

$$u(r) = \frac{2}{\pi R^2} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \times \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (4.13)$$

Eşitlik 4.13, deneylerde kullanılan 10 ve 15 mm boru çapları için sırasıyla Eşitlik 4.14 ve 4.15'deki gibi son halini alır:

$$u(r) = \frac{2}{\pi (5 \times 10^{-3})^2} \left( 1 - \frac{1}{(5 \times 10^{-3})^2} r^2 \right) \times \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (4.14)$$

$$u(r) = \frac{2}{\pi(7.5 \times 10^{-3})^2} \left(1 - \frac{1}{(7.5 \times 10^{-3})^2} r^2\right) \times \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (4.15)$$

Denklemlerde,  $\rho$  akışkanın yoğunluğu,  $\dot{m}$  deneyler sırasında akışkanın ölçülen kütleli debi değeri olup, akışkanın hız değerleri R yarıçapa bağlı olarak hesaplanmıştır.

#### 4.1.2. Viskozite Ölçümü

Deneysel çalışmada kullanılan akışkanların manyetik alanın etkilemediği durumdaki viskozite ölçümleri için, Şekil 4.17 de görülen ölçü kaplarına her üç akışkan numunelerinden alınarak Şekil.4.18'de görülen MALVERN/BOHLIN GEMINI 2 MODEL reometre cihazı kullanılmıştır.

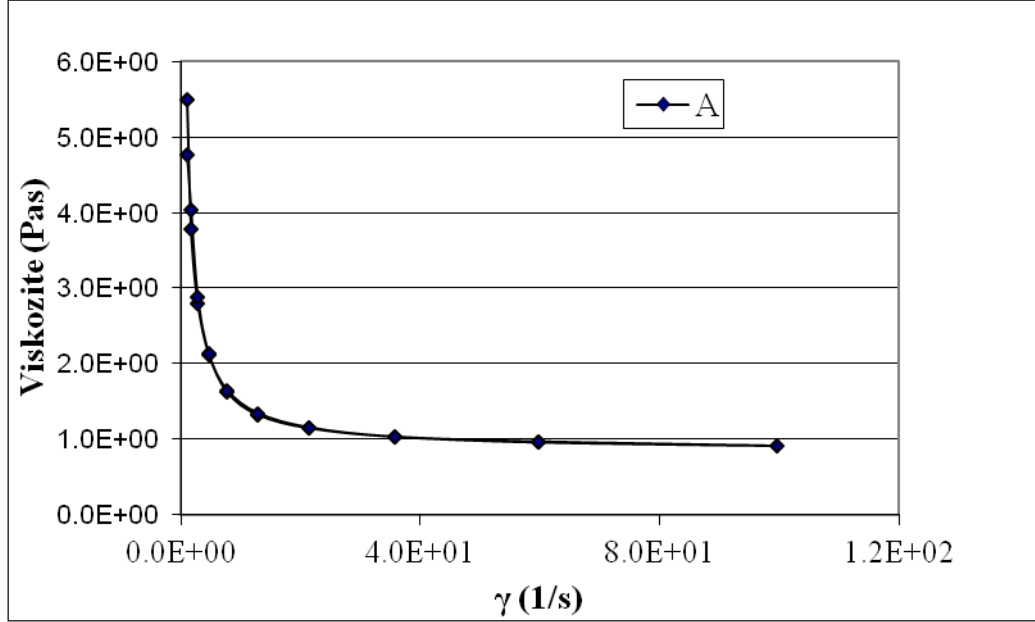


Şekil 4.17. Akışkan numuneleri.

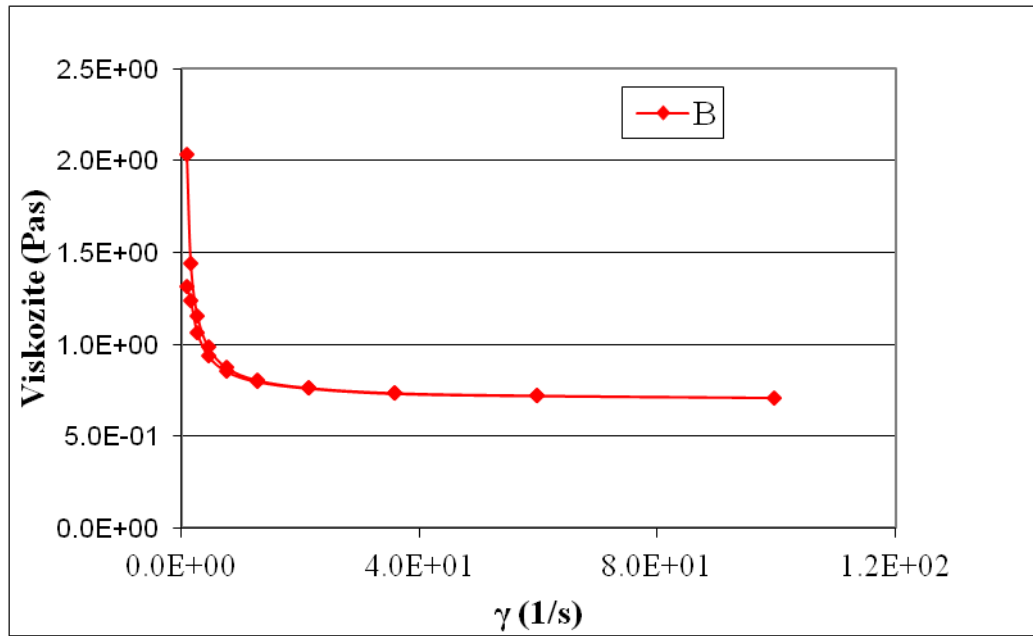


Şekil 4.18. Reometre.

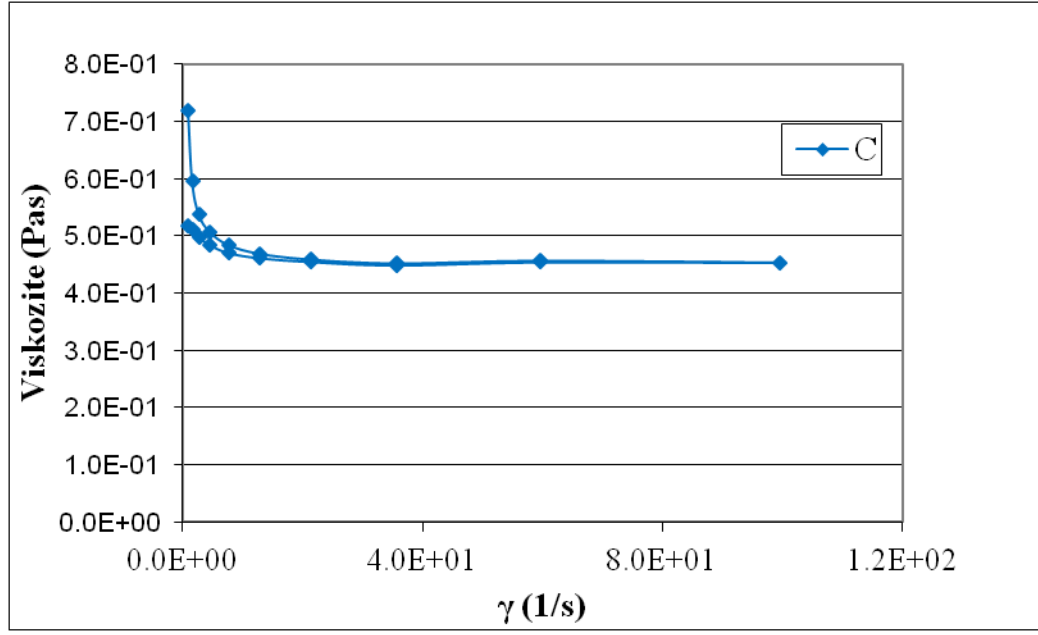
Her üç akışkan için ölçülen viskozite değerlerine ait grafikler aşağıda Şekil4.19-4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.19. Viskozite ölçüm sonuçları (Akışkan:A).



Şekil 4.20. Viskozite ölçüm sonuçları (Akışkan:B).



Şekil 4.21. Viskozite ölçüm sonuçları (Akışkan:C).

Yapılan ölçümler neticesinde manyetik alan yokluğunda A, B ve C akışkanların viskozitesi  $\gamma=99.55$  1/s kayma geriliminde sırasıyla 0.909, 0.710 ve 0.454 Pas olarak ölçülmüştür.

Manyetik alan varlığında akışkanların viskozitesi belirlenebilmesi için deneylerde ölçülen basınç farkları kullanılarak laminer akış için geçerli olan Eşitlik 4.16'da ifade edilen debi formülü ile belirlenmiştir.

$$Q = U_{\text{ort.}} \times \pi R^2 \quad (4.16)$$

Eşitlik 4.16'da

$$U_{\text{ort.}} = \frac{\Delta P \times D^2}{32\eta L} = \frac{\Delta P \times 4R^2}{32\eta L} = \frac{\Delta P \times R^2}{8\eta L} \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buna göre Eşitlik 4.16 açık bir biçimde yazılırsa;

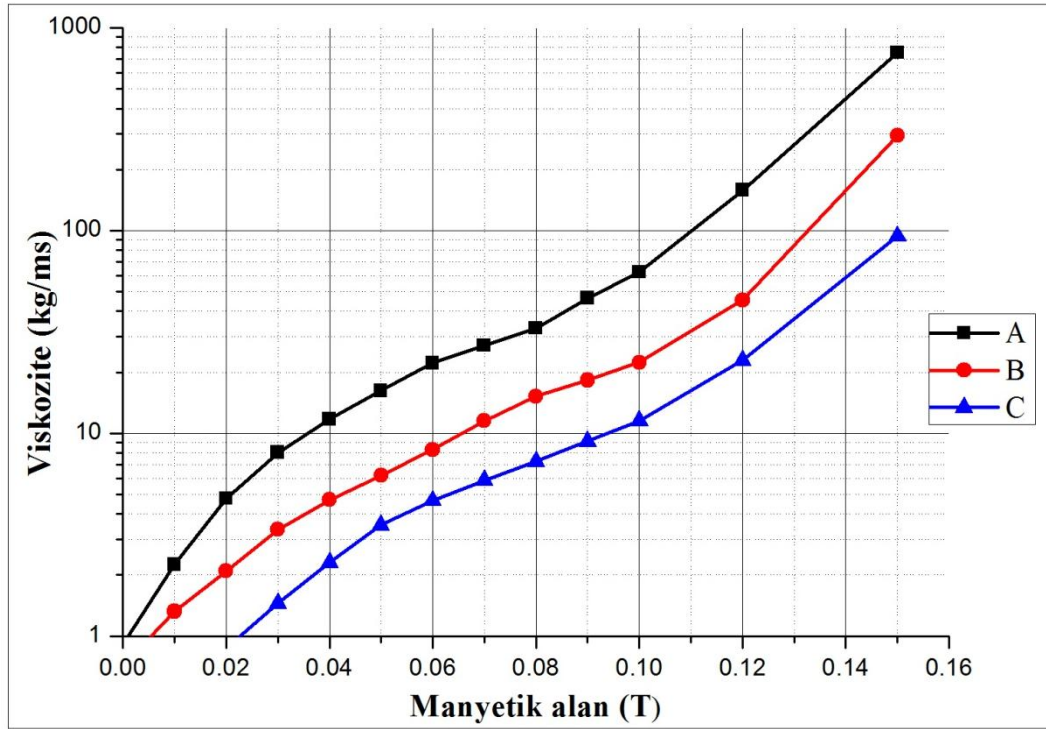
$$Q = \frac{\Delta P \times R^2}{8\eta L} \times \pi R^2 = \frac{\pi \Delta P R^4}{8\eta L} \quad (4.18)$$



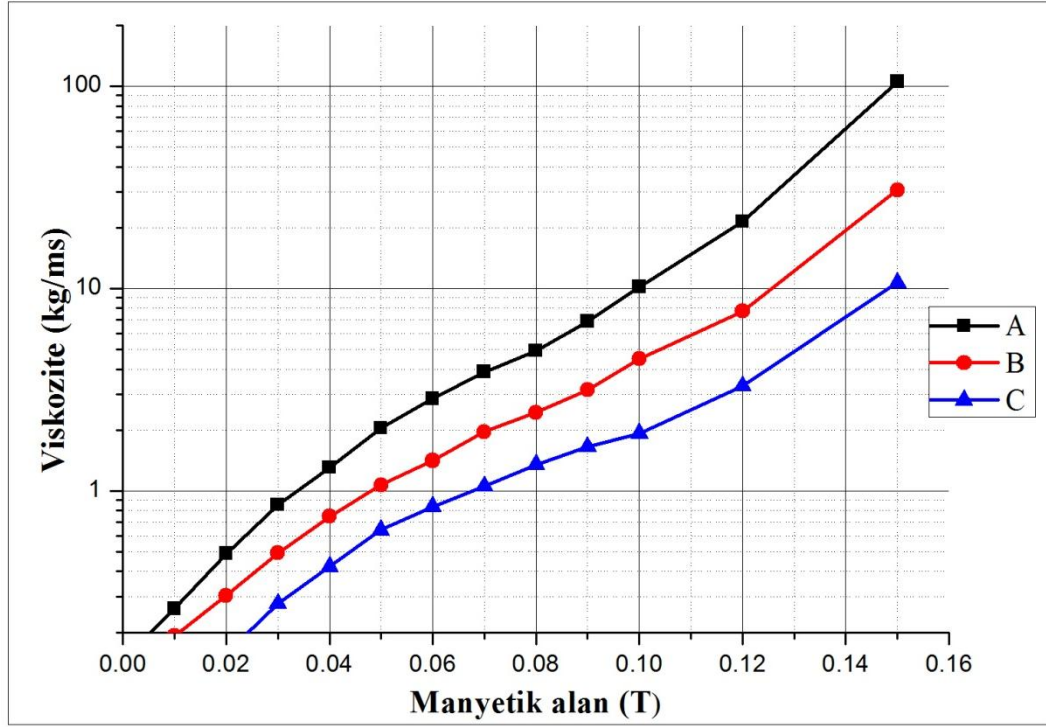
ifadesi elde edilir. Eşitlik 4.18'den (Çengel, 2008; Olabi and Grundwall, 2008) viskozite ifadesi, Eşitlik 4.19'daki gibi elde edilir.

$$\eta = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L Q} \quad (4.19)$$

Deneysel olarak kullanılan boru boyutları sabit olup, basınç farkı ve debi değerleri manyetik alana bağlı olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla Eşitlik 4.19'dan deneylerde kullanılan her bir manyetik alan değeri için viskozite değerleri hesaplanmış ve üç farklı akışkan için Şekil 4.22 ve 4.23 oluşturulmuştur.



Şekil 4.22. Akışkanların manyetik alana bağlı viskozite değişimi (d: 15mm).



Şekil 4.23. Akışkanların manyetik alana bağlı viskozite değişimi (d: 10mm).

## 4.2. NÜMERİK YÖNTEM

Nümerik veya sayısal yöntemler, mühendislik problemlerinde, fiziksel sistemlerin matematik modellerini ifade eden denklemlerin analitik olarak çözülemediği ya da analitik çözümün zor olduğu durumlarda bilgisayar yardımıyla çözmek için kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerin en büyük avantajı analitik çözümü olmayan problemlerin bile çözümlenebilmesi ve bilgisayar simülasyonlarının yapılabilmesidir. Analitik yöntemler genel olarak matematiksel ifadeler şeklinde çözümlenirler ve genel çözüm ifadeleri belirli değerler için sayısal sonuç verirler.

Nümerik çözümlerde sonuçlar daima sayısaldir ve istenilen hassasiyette yaklaşık çözüm üretirler. Hassasiyet artırıldıkça işlem adımları artmakta, çözümü ele alınan fiziksel modele ait problem tipine göre güçlü ve daha hızlı bilgisayarlara ihtiyaç duyulabilmektedir. Günümüzde sürekli gelişme gösteren bilgisayar teknolojisi ile birlikte sayısal analiz yöntemleri de artmış daha karmaşık problemlerin bile modellenip çözülmesinde etkili bir çözüm yöntemi haline gelmiştir.

Bu çalışmada, nümerik yöntem olarak sonlu hacimler tekniğine dayalı Fluent kodu kullanılmıştır. Nümerik çalışmada, deneysel çalışmada kullanılan her iki boru geometrisi GAMBIT 2.3.16 paket programında oluşturularak uygun sayısal ağın belirlenebilmesi için mesh çalışması yapılmıştır. Uygun sayısal ağın belirlenmesinde 15 mm çapa sahip boru geometrisi için 1 mm mesh boyutu ve 65178 adet hexahedra tip hücre kullanılırken 10 mm çapa sahip boru geometrisinde 0.5 mm mesh boyutu ve 232180 adet hexahedra tip hücre kullanılmıştır. Uygun sayısal ağ yapısı sonlu hacimler metoduna dayalı Fluent koduna aktarılarak HAD analizleri yapılmış ve bu hesaplamalara göre akış hız profillerine ait çeşitli grafikler oluşturulmuştur.

#### **4.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği**

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) akışkan hareketini ifade eden temel kütle, momentum ve enerji denklemlerinin bilgisayar aracılığı ile çözülmesi ilkesine dayanan sayısal bir yöntemdir. HAD kısmi diferansiyel denklemleri bilgisayarlarda çözümlenebilen bir takım cebri eşitliklere dönüştürerek akışkan dinamiği üzerinde hızlı ve pratik çalışma imkânı vermektedir. Akışı ifade eden kısmi diferansiyel denklemler sayısal olarak çözümlenerek akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve bu parametrelere bağlı olarak birçok alt veriye kolaylıkla ulaşılabilmektedir. HAD yöntemi ile, ilgili fiziksel probleme ait bir model oluşturulabilmekte, akışkan ve akış ile ilgili temel fiziksel ve kimyasal ilkeler oluşturulan bu modelde tanımlanarak, kullanılan bilgisayar yazılımı sayesinde akışkan dinamiği ile, ilgili fiziksel problemin gerçek davranışları hakkında bilgiler alınabilmektedir. Probleme ait geometrinin kolaylıkla oluşturulup analiz edilmesine imkân vermesinin yanında, deneysel çalışmalara nispeten zamandan ve ekonomik açıdan fayda sağlaması HAD' ni ön plana çıkarmıştır.

HAD metodu, taşıt aerodinamik yapısı, gemi hidrodinamiği, turbo makineler, içten yanmalı motorlar ve gaz türbinlerindeki yanma, kimyasal reaksiyon olayları, pompalar, türbinler, boru içi akışlar, meteoroloji uygulamaları, kılcal ve ana damarlardaki kan akışı v.b gibi endüstriyel ve akademik uygulama alanlarında güçlü ve geniş bir perspektife sahiptir. Bilgisayar teknolojisinin giderek gelişmesi ve kapasitelerinin artması, deney ve test düzeneklerinin yüksek maliyetli oluşu ve deney

sürecinin uzun zaman alması HAD analizlerini çekici kılmakta olup mevcut tüm ticari HAD yazılımları temel olarak üç temel araç içermektedir.

- Ön işlemci (Pre-Processor)
- Çözümleyici (Solver)
- Son İşlemci (Post-processor)

Fiziksel modele ait geometrinin ve ağ (mesh) yapısının oluşturulması sınır şartlarının tanımlanması ön işlemci kısmında, sonlu fark, sonlu hacimler, sonlu elemanlar ve spektral metot gibi çözüm tekniklerinin belirlenmesi çözümleyici kısmında çözüm sonuçlarının alınması ve değerlendirilmesi son işlemci kısmında yapılan başlıca işlemlerdir.

Fiziksel problemin önemli özellikleri belirlendikten sonra HAD analizi için temel olarak yapılacak işlemler sırasıyla aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Bunlar;

- İlgili fiziksel problemin modellenmesi ve geometrinin oluşturulması,
- Uygun sayısal ağ (mesh) yapısının oluşturulması,
- Sayısal ağın kontrolü,
- Çözümleyicinin belirlenmesi,
- Çözüm modellerinin seçimi: laminar veya türbülanslı akış, kimyasal bileşenler veya reaksiyonlar, ısı geçiş modelleri, ilave modellerin tanımlanması (MHD gibi)
- Malzeme özelliklerinin tanımlanması,
- Başlangıç ve sınır şartlarının belirlenmesi,
- Çözüm kontrollerinin ayarlanması,
- Çözümlemenin yapılması,
- Sonuçların alınması, analizi ve kaydedilmesi,

#### 4.2.2. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu Hacimler Yönteminde (SHY), çözümü gerçekleştirilecek olan geometri sonlu elemanlar yöntemindeki gibi parçalara bölünür ve her bir parça için çözüm işlemi yapılır ve çözümleri yapılan bu parçalar birleştirilerek problemin genel çözümü bulunmuş olur. SHY, temel olarak sonlu farklar metodu esas alınmasına rağmen sonlu farklar metoduna kıyasla daha hassas çözümler üretebilmektedir. Sonlu elemanlardan farklı olarak bu yöntem, akış denklemlerini sayısal olarak çözülebilecek bir dizi cebirsel eşitliklere dönüştürmek için kontrol hacmi yaklaşımını kullanır. Kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal bir yöntem olan sonlu hacimler yöntemi HAD kodlarında en çok kullanılan yöntemdir. Bu metotta denklemler her bir kontrol hacmi için ayrıştırılarak iteratif olarak çözülür.

Bu denklemleri daha iyi analiz etmek için  $\Phi$  gibi bir parametre tanımlanırsa, kararlı rejim için  $\mathbf{V}$  gibi herhangi bir kontrol hacmindeki akışı veren bağıntı Eşitlik 4.20'deki gibi tanımlanabilir. Bu denklem akışkanlar mekaniğinde transport denklemi olarak bilinir ve süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin yerini alabilir. Eşitlik 4.20'de  $\Phi$  değeri 1 olursa süreklilik denklemine, hız ( $\mathbf{V}$ ) olursa momentum denklemine ve sıcaklık ( $T$ ) olursa enerji denklemine dönüşür. Bu denklemlerin diferansiyel biçimi Navier-Stokes denklemleri olarak bilinir ve yaygın olarak kullanımı Eşitlik 4.21-4.23'de verilmiştir (Atlı, 2006).

$$\oint \rho \mathbf{V} d\mathbf{A} = \oint \Gamma_{\Phi} \nabla \Phi d\mathbf{A} + \int_H S_{\Phi} dH \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (4.21)$$

$$\frac{\rho}{\partial t} (\rho \mathbf{V}) + \mathbf{V}(\nabla \rho \mathbf{V}) + \rho \mathbf{V} \nabla \mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \tau_{ij} + \rho \mathbf{f} \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla E \mathbf{V} = \rho \mathbf{f} \mathbf{V} + \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla \mathbf{q} - \nabla(\rho \mathbf{V}) + \nabla(\tau_{ij} \mathbf{V}) \quad (4.23)$$

Denklemlerde  $\rho$  yoğunluk;  $\mathbf{V}$  hız vektörü;  $\mathbf{A}$  yüzey alanı vektörü;  $\Gamma_{\Phi}$ ,  $\Phi$  için difüzyon katsayısı;  $S_{\Phi}$  her bir kontrol hacmi için  $\Phi$ 'nin kaynağı;  $H$  kontrol hacmi;  $p$

basınç;  $\tau_{ij}$  kayma gerilmesi;  $\mathbf{f}$  dış kuvvetler vektörü; E toplam enerji, Q ısı ve  $\mathbf{q}$  ısı akısı vektörüdür.

#### 4.2.3. GAMBIT Programı

GAMBIT, FLUENT programında kullanılacak geometrinin ve çözüm ağının oluşturulmasında kullanılan genel amaçlı bir ön işlemcidir. GAMBIT programı sayesinde herhangi bir çizim programına gerek olmadan iki boyutlu çizim yapılabileceği gibi, üç boyutlu geometriler oluşturmak da mümkün olmaktadır.

GAMBIT programında öncelikle sistemin fiziksel yapısına uygun çözücü seçilir. Her çözücü programı ile ayrı çözüm ağı tipi oluşturmak mümkün olmaktadır. Ayrıca her çözücü program farklı fizikleri tanımlayan denklemler içermektedir. Bu nedenle piyasada bu çözücü programların kullanıldığı alanlar da birbirinden farklı olmaktadır. Çözücü seçildikten sonra, çözüm yapılacak sistemin geometrisi oluşturulur. Bu geometri iki boyutlu bir çizim olabileceği gibi, üç boyutlu cisimlerden de oluşabilir. Geometrinin oluşturulmasından sonra çözücü programa ve geometriye uygun çözüm ağı oluşturulur. GAMBIT programı ile tri-tetrahedral, quad-hexahedral ve hybrid gibi birçok çözüm ağı çeşidi oluşturulabilir. Bu çözüm ağı tipleri isimlerini oluştukları kenar sayısından almaktadırlar. Bazı durumlarda çözülecek sistemin geometrisine göre bu çözüm ağı tipleri birlikte kullanılmaktadır. Çözüm ağı oluşturulurken göz önüne alınması gereken iki farklı durum vardır. Bunlar:

- Elde edilmek istenen sonuç ne kadar hassas olmalıdır,
- Kullanılan bilgisayar kapasitesi problemin çözümü için yeterli olacak mıdır?

Bu iki madde, çözüm ve sonuçlar üstünde çok önemli rol oynamaktadır. Sonuçların gerçeğe ne kadar yakın olması isteniyorsa, çözüm ağı boyutları da o kadar küçültülmeli ve çözüm ağı sayısı mümkün olduğunca arttırılmalıdır. Ancak çözüm ağı sayısında ve boyutunda yapılan her değişiklik, daha çok sayıda işlem ve veriye neden olmaktadır. Böyle durumlarda ise kullanılan bilgisayarın kapasitesi ve hızı yetersiz kalabilmektedir. Geometri hazırlandıktan sonra başlangıç ve bitiş

yüzeylerindeki sınır koşulları fiziksel olarak tanımlanır. Bu sınır koşullarından bazıları; basınç giriş veya çıkışı, hız giriş veya çıkışı, ısı transfer akısı, duvar olarak verilebilir. Sınır koşullarının tanımlanmasından sonra, yapılan çizim FLUENT programında kullanılmak üzere programın biçimiyle kaydedilir (Sevindir, 2007).

#### **4.2.4. FLUENT Programı**

FLUENT, HAD analizlerinde kullanılan paket programlarından birisidir. FLUENT programı, geometri oluşturulmasından sonuçların analizine kadar modelleme işleminin tamamını kapsamaktadır. Problemin bilgisayar modeli, sistemin tanımıyla başlayıp, çabuk ve kolay bir şekilde oluşturulabilmektedir. Probleme en uygun çözücü tipini kullanarak akış davranışını tahmin eder ve tasarım için gerekli bilgileri verir. FLUENT programı, akışkan akımı ile uğraşan araştırmacılar, analizciler, tasarımcılar ve mühendisler tarafından birçok alanda kullanılmaktadır. HAD hesaplamaları, çok sayıda lineer olmayan denklem çözümlerini kapsamaktadır. Çözüm metodu problemin fiziğine uysa bile, bu denklemleri elle çözmek oldukça zordur. Bu nedenle HAD hesaplamaları bilgisayar yardımı ile yapılır. Ancak bu da büyük bilgisayar kapasitesi ve hafızası gerektirmektedir. Günümüzde bilgisayar donanım teknolojisindeki gelişmelerden dolayı çok hızlı ve yüksek kapasitede bilgisayarlar kullanılabilir. Fakat bu hızlı bilgisayarlar bile bazı programların çözümünde yetersiz kalmakta ve çözüm süreci çok uzun zaman almaktadır. FLUENT programı, akışkanlarla ilgili problemlerin sayısal çözümü için birçok teori ve modelleri kapsamaktadır. Laminer akış, türbülans modelleri, radyasyon modelleri, kimyasal karışım modelleri, manyetohidrodinamik model, faz değişim modelleri, çok fazlı akım modelleri ve hareketli akım alanları modelleri buna örnek gösterilebilir. FLUENT programı ile çalışırken öncelikle programın kendi bünyesindeki çizim programlarından (GAMBIT, WORKBENCH) biriyle geometri oluşturulmaktadır. Oluşturulan geometri FLUENT programına alındıktan sonra kullanılacak akışkan ve bu akışkanın kimyasal ve fiziksel özellikleri belirlenmektedir. Bu aşamadan sonra; çözüm için en uygun sayısal model seçilir (açık-kapalı, bileşik-ayrık, birinci derece-ikinci derece, vb.). Sayısal model seçiminden sonra akım özellikleri belirtilmelidir (laminer veya türbülanslı akış). Bu adımdan sonra çözüm için sınır koşulları belirlenir. Yukarıda GAMBIT'te tanımlanan fiziksel sınır şartlarına göre sayısal

büyüklikler (hız, basınç, sıcaklık, enerji gibi) FLUENT programına girilmektedir. Seçilen hata toleransına göre başlangıç şartları ve işlem yönü belirtilerek çözüme başlanmaktadır. İstenilen hata toleransına ulaşıncaya kadar çözüm yinelenir. Eğer akış kararsız ise zamana bağımlı çözüm yapılmaktadır. FLUENT programı ile elde edilen sonuçlar değişik şekillerde görselleştirilerek sunulmaktadır. Bu sunular renkli diyagramlar ile olabileceği gibi, animasyon da yapılabilmektedir. Problemin çözümü ile basınç, hız, yoğunluk, türbülans etkileri, viskozite, ısı transferi, gerilmeler, karışım oranları gibi birçok fiziksel büyüklük istenilen anda ve istenilen noktada kullanıcıya sunulmuştur (Sevindir, 2007).

#### 4.2.5. MHD Model

Manyetik alan ile akışkan hareketi arasındaki bağlantı, manyetik alan altında iletken malzemenin hareketinden dolayı oluşan elektrik akımı indüksiyonu ve elektrik akımı ile manyetik alan etkileşiminden kaynaklanan Lorentz kuvveti olmak üzere iki temel etki tarafından anlaşılır. Akışkan hareketi ile manyetik alan arasındaki etkileşimde Eşitlik 3.33'de verilen  $\mathbf{J}$  akım yoğunluğunu bilmek gerekir. Genel olarak akım yoğunluğunu belirlemek için iki yaklaşım kullanılır. Bunlardan birincisi manyetik indüksiyon denkleminin çözümü metodu diğeri ise elektrik potansiyel denkleminin çözümü metodudur (ANSYS FLUENT Costumer portal, <https://www1.ansys.com/customer/default.asp> ).

Manyetik indüksiyon metodu, Ohm kanunu ve Maxwell denklemlerinden türetilmiştir. Denklem bize akışkan hareketi ile manyetik alan arasındaki ilişkiyi verir. Genel olarak Ohm kanunu Eşitlik 4.24' de verilen akım yoğunluğu ile tarif edilir.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4.24)$$

Eşitlikte  $\sigma$  ortamın elektriksel iletkenliğidir.  $\mathbf{B}$  manyetik alan altındaki  $\mathbf{V}$  akışkan hızı için Ohm Kanunu;

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (4.25)$$



şeklinde ifade edilir. Ohm kanunu ve Maxwell denkleminde manyetik indüksiyon denklemini Eşitlik 4.26' deki gibi türetilir.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{V} \quad (4.26)$$

Manyetik alan  $\mathbf{B}$ 'nin çözülmesi ile akım yoğunluğu  $\mathbf{J}$  aşağıdaki Amper eşitliğinden hesaplanabilir.

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{B} \quad (4.27)$$

Genel olarak bir MHD probleminde manyetik alan  $\mathbf{B}$ , dışarıdan uygulanan alan  $B_0$  ve akışkan hareketinden dolayı oluşan indüklenen alan  $b$  şeklinde ayrışabilir. Yani kısacası manyetik alan  $\mathbf{B}$ , akışa dışarıdan uygulanan manyetik alan  $B_0$  ile indüklenen manyetik alan  $b$ 'nin toplamıdır. MHD problemlerinde genel olarak Denklem 4.28'de verilen manyetik Reynolds sayısı ifadesi 1 den küçük olduğunda indüklenen manyetik alan dışarıdan uygulanan manyetik alanın yanında çok küçük kalacağı için ihmal edilmekte ve düşük manyetik Reynolds sayısı yaklaşımı şeklinde literatürde yer almaktadır (Takhar et al. 2002; Attia and Ahmed 2004; Hayat et al. 2004; Tagawa, 2006; Sekhar et al. 2007; Hayat et al. 2008; Ghotbi, 2009; Türkyılmazoğlu, 2010; Xiaomei et al. 2011; Gedik vd. 2012a).

$$R_m = \mu_0 V L \ll 1 \quad (4.28)$$

Eşitlikte;  $\mu_0$  malzemenin veya akışkanın manyetik geçirgenlik katsayısı,  $V$  hız ve  $L$  karakteristik uzunluktur.

Yapılan bu çalışmada da MHD modelde manyetik indüksiyon denkleminin çözümü yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca problem düşük manyetik Reynolds sayısı yaklaşımına göre çözülerek,  $b$  indüklenen manyetik alan ihmal edilmiş ve dışarıdan uygulanan manyetik alan olarak toplam manyetik alan  $B$  ifadesi kullanılmıştır. MHD model, Ansys Fluent kodunda add-on modülü olarak kullanıcı tanımlı fonksiyonları (UDF) kullanarak yerine getirilir. Eşitlik 4.26'da verilen manyetik indüksiyon denklemini

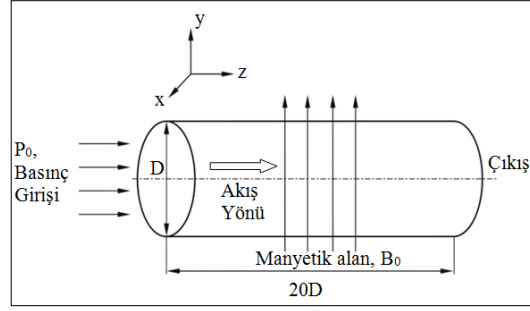
User-defined scalars (UDS) transport denklemleri aracılığı ile çözülür. Fluent kodunda MHD modelin aktif hale gelebilmesi için gerekli olan işlemler Ek Açıklamalar A'da verilmiştir.

#### **4.2.6. Geometri ve Mesh Yapısının Oluşturulması**

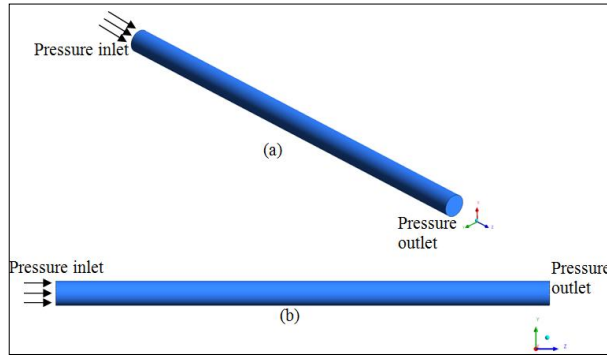
Yapılan bu tez çalışmasında,  $d=15$  ve  $10$  mm çap ve  $300$  mm uzunluğa sahip iki farklı boru geometrisi manyetiklenme özelliği olmayan plastik malzemedan imal edilerek deneylerde kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan bu boru geometrileri nümerik çalışma için ayrı ayrı modellenerek GAMBIT 2.3.16 paket programında uygun sayısal ağ yapısı tespit edilmiş ve her iki boru geometrisi için mesh çalışması yapılmıştır.

##### **4.2.6.1. Boru Çapı 15 mm İçin Mesh Çalışması**

Boru çapı  $15$  mm ve  $300$  mm uzunluktaki Şekil 4.24'de şematik resmi görülen boru geometrisi HAD analizleri için katı modeli oluşturularak uygun mesh yapısının belirlenmesi işlemleri yapılmıştır. Oluşturulan boru geometrisinin katı modeli ve HAD analizi için kullanılan mesh yapısı Şekil 4.25 ve Şekil.4.27'de verilmiştir. Çözümlemek üzere ele alınan boru geometrisinin akış giriş kesiti pressure-inlet, çıkış kesiti ise pressure-outlet sınır şartları ile tanımlanmıştır. Akış hücresi yüzeyleri wall (duvar) sınır şartı ile modedllenmiş, hücrenin iç yapısında kalan kesitler interior (iç yapı) olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan model HAD programı Ansys Fluent 14.0 koduna okutulmuştur. Case dosyasının yapılanması için modeller, çözüm yöntemi, malzeme ve sınır şartları tanımlanmıştır. Çözümlenmeler için HPZ800 iş istasyonu kullanılmıştır. Problemi çözmek için pressure-based solver kullanılmış olup, viskoz model olarak laminer seçilmiştir. Dışarıdan uygulanan manyetik alanın akışa etkisini belirleyebilmek için MHD akış modeli addon modüllerinden MHD model kullanılarak elde edilmiştir.

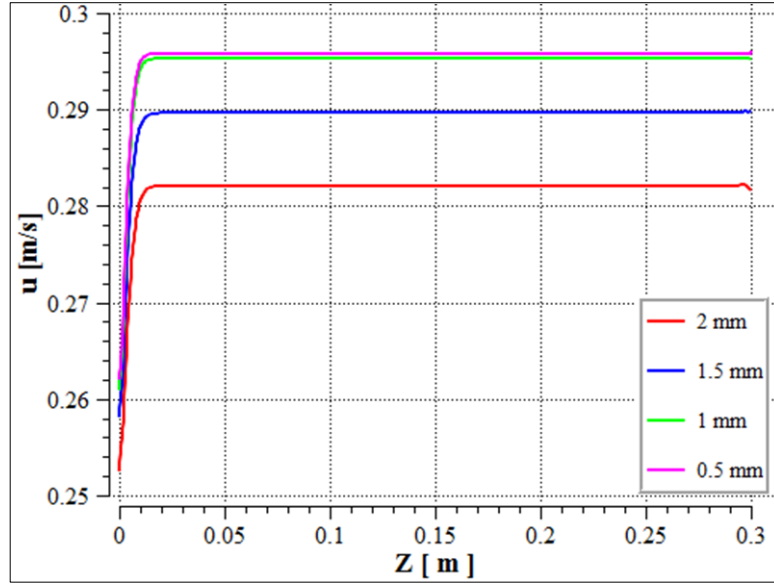


Şekil 4.24. Boru geometrisinin şematik resmi.

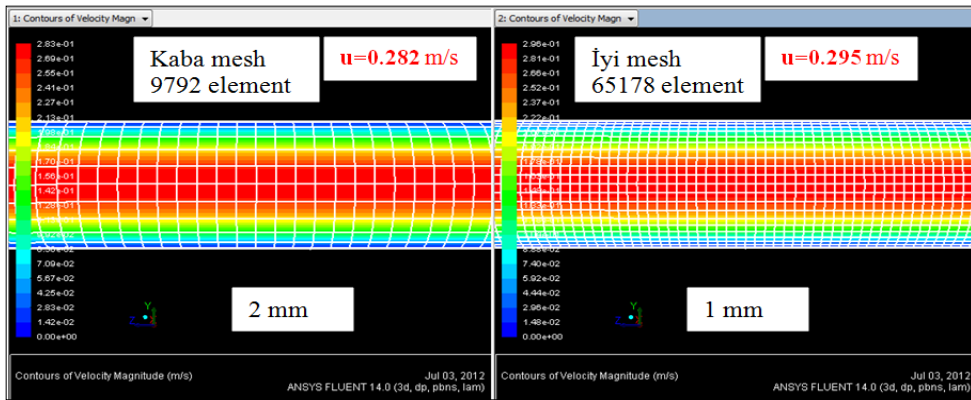


Şekil 4.25. Boru geometrisinin katı modeli, a) izometrik b) ön görünüş.

Şekil 4.26'da 15 mm çapa sahip boru geometrisi için manyetik alanın olmadığı,  $B=0$  T durumunda dört farklı mesh boyutu seçilerek boru boyunca aksenal yönde meydana gelen hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi mesh boyutu küçüldükçe (mesh yoğunluğu arttıkça) hız değerleri artış göstermiş ve belli bir mesh boyutundan sonra hız değerlerinde önemli ölçüde bir değişim gözlenmemiştir. Mesh boyutunun 1 mm olduğu durumda hız değerlerinde bir sonraki mesh boyutuna göre çok farklılık olmadığı için bu geometride uygun mesh boyutu 1 mm olarak seçilmiş ve Şekil 4.27'de kaba ve iyi mesh görüntüleri verilirken Çizelge 4.2'de bu çalışma için kullanılan mesh bilgileri sunulmuştur. Problemin çözümünde, 65178 adet hexahedra tip hücre kullanılmıştır.



Şekil 4.26. Mesh çalışması (d:15 mm).



Şekil 4.27. Uygun sayısal mesh yapısı (d:15 mm).

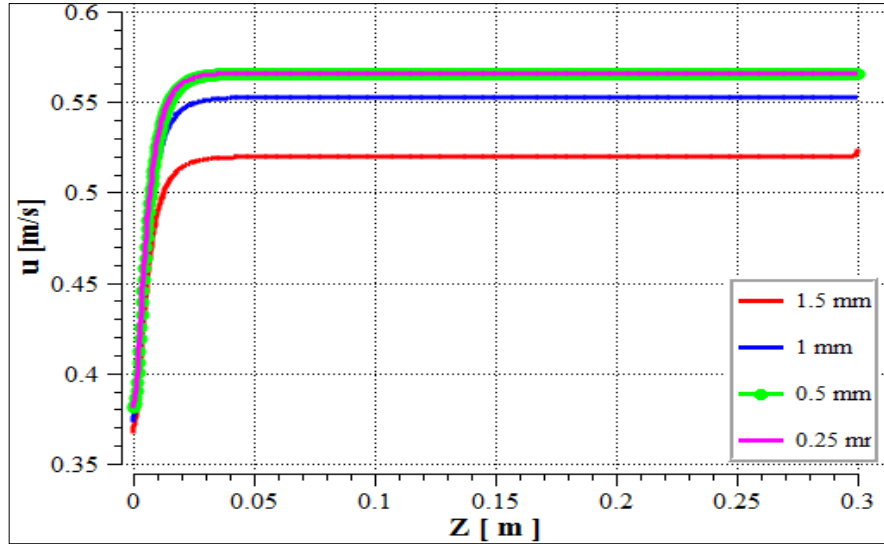
Çizelge 4.2. Mesh bilgileri (d:15 mm).

Mesh No	Mesh Boyutu (mm)	Hücre sayısı	İterasyon	Hız (m/s)
1	2	9792	114	0.282
2	1.5	18156	142	0.289
<b>3</b>	<b>1</b>	<b>65178</b>	<b>313</b>	<b>0.295</b>
4	0.5	484380	700	0.295

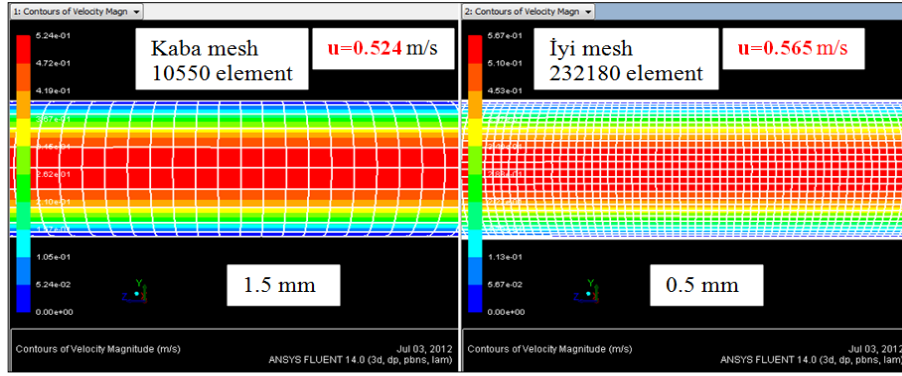
#### 4.2.6.2. Boru Çapı 10 mm İçin Mesh Çalışması

Benzer bir biçimde, boru çapı 10 mm ve 300 mm uzunluktaki boru geometrisi için uygun mesh yapısının belirlenmesi işlemleri yapılmıştır. Çözümlemek üzere ele alınan boru geometrisi için gerekli olan şartlar 15 mm çapa sahip boru için oluşturulan şartlar ile aynıdır.

Şekil 4.28'de 10 mm çapa sahip boru geometrisi için manyetik alanın olmadığı,  $B=0$  T durumunda dört farklı mesh boyutu seçilerek boru boyunca aksel yönde meydana gelen hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi mesh boyutu küçüldükçe hız değerleri artış göstermiş ve belli bir mesh boyutundan sonra hız değerlerinde önemli ölçüde bir değişim gözlenmemiştir. Mesh boyutunun 0.5 mm olduğu durumda hız değerlerinde bir sonraki mesh boyutuna göre çok farklılık olmadığı için bu geometride uygun mesh boyutu 0.5 mm olarak seçilmiş ve Şekil 4.29'da kaba ve iyi mesh görüntüleri verilirken Çizelge 4.3'de bu çalışma için kullanılan mesh bilgileri sunulmuştur. Problemin çözümünde, 232180 adet hexahedra tip hücre kullanılmıştır.



Şekil 4.28. Mesh çalışması (d:10 mm).



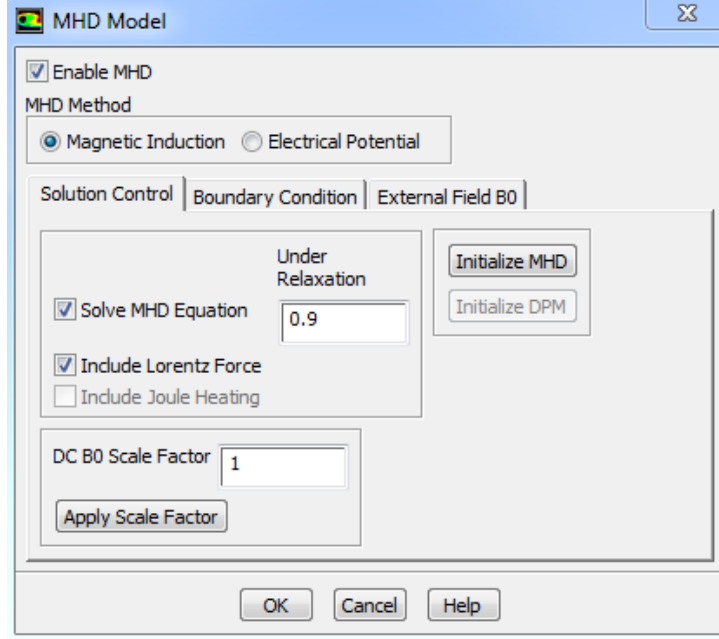
Şekil 4.29. Uygun sayısal mesh yapısı (d:10 mm).

Çizelge 4.3. Mesh bilgileri (d:10 mm).

Mesh No	Mesh Boyutu (mm)	Hücre sayısı	İterasyon	Hız (m/s)
1	1.5	10550	130	0.524
2	1	27234	200	0.556
<b>3</b>	<b>0.5</b>	<b>232180</b>	<b>601</b>	<b>0.565</b>
4	0.25	1670962	1273	0.565

#### 4.2.7. Çözümlerin Yapılması

Deneyleerde kullanılan akışkanların silindirik bir boru içinden akışını tarif eden genel yönetici denklemler, başlangıç ve sınır şartları altında nümerik olarak, HD akış ve MHD akış modelleri için çözülmüştür. HD akış modelinde ( $B=0$  T) akışa manyetik alan uygulanmamış, genel denklemlerin çözümü yapılarak  $r$ ,  $\theta$  ve  $z$  yönlerindeki  $u$ ,  $v$  ve  $w$  hız bileşenleri hesaplanmıştır. MHD akış modelinde ise, programda addon modülleri kullanılarak MHD Model ara yüzü oluşturulmuş ve manyetik indüksiyon denkleminin çözümü metodu uygulanarak akışa ait momentum ve elektromanyetik denklemler birlikte çözdürülmüştür. MHD modül tanımlamaları, Şekil 4.30'da görülen Ansys Fluent 14.0 kodunda MHD Model'de yapılmıştır.



Şekil 4.30. Çözüm şartları ve MHD Model.

Under-Relaxation (yakınsama) parametreleri hesaplanan bir büyüklük için iki iterasyon arasındaki farkı etkilemektedir ve 0-1 arasında bir değer almaktadırlar. Bu sayının düşük tutulması ile iki iterasyon arasındaki farkın azalması sağlanır ve ıraksama sorunu giderilmiş olur. Programın MHD modülünde, momentum,  $B_x$ ,  $B_y$  ve  $B_z$  manyetik indüksiyonların çözüm şartları için Second Order Upwind metodu seçilmiş, çözüm kontrolleri yapılarak iterasyona başlanmış ve uygulanan manyetik alana bağlı olarak 400 ile 500 iterasyon arasında çözümler sonuçlanmıştır.

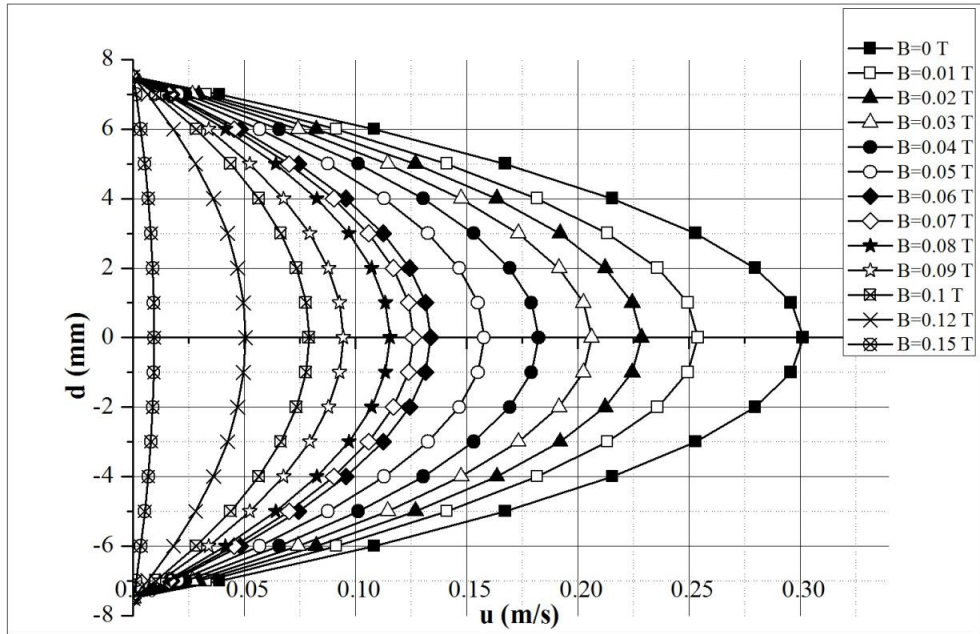
## BÖLÜM 5

### DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMA SONUÇLARI

Yapılan bu çalışmada, manyetik alan etkisi altında kalan silindirik borulardaki üç farklı fiziksel özelliğe sahip manyetiklenebilen akışkanlar için deneysel ve nümerik sonuçlar elde edilerek akış hız profilleri oluşturulmuş ve sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Her iki çalışmadan elde edilen sonuçlara ait veriler grafik haline getirilerek aşağıdaki bölümlerde tartışılmıştır.

#### 5.1. DENEYSEL SONUÇLAR

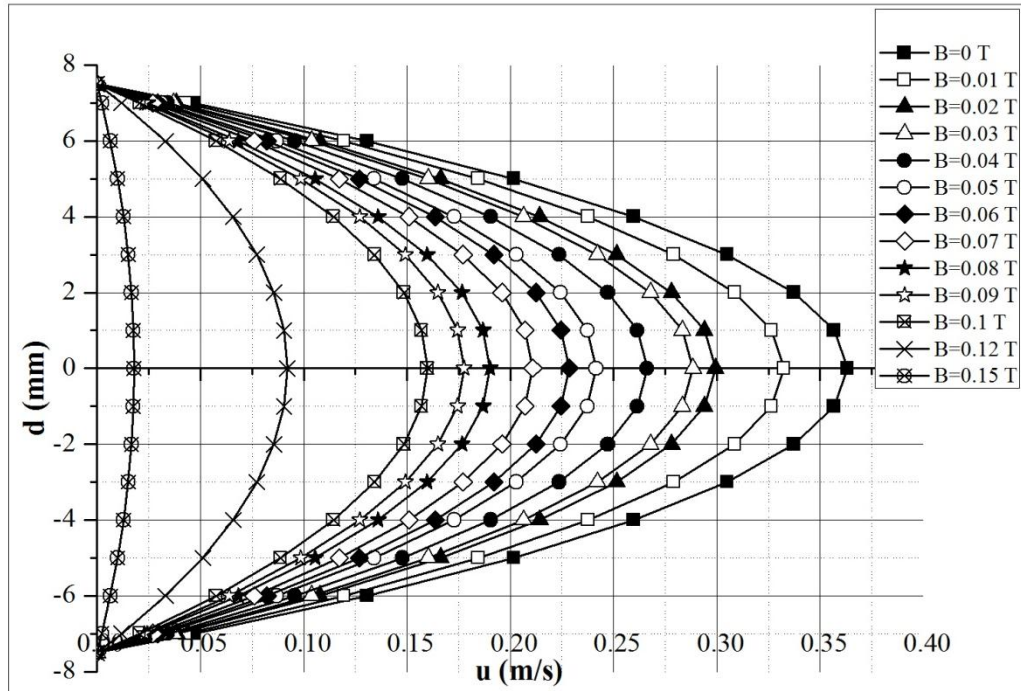
Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre manyetik alan yokluğunda ve varlığında iki farklı çapa sahip boru geometrisinde üç farklı akışkan için aşağıda verilen şekillerde çap boyunca meydana gelen hız değişim grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 5.1. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d:15 mm, Akışkan:A).



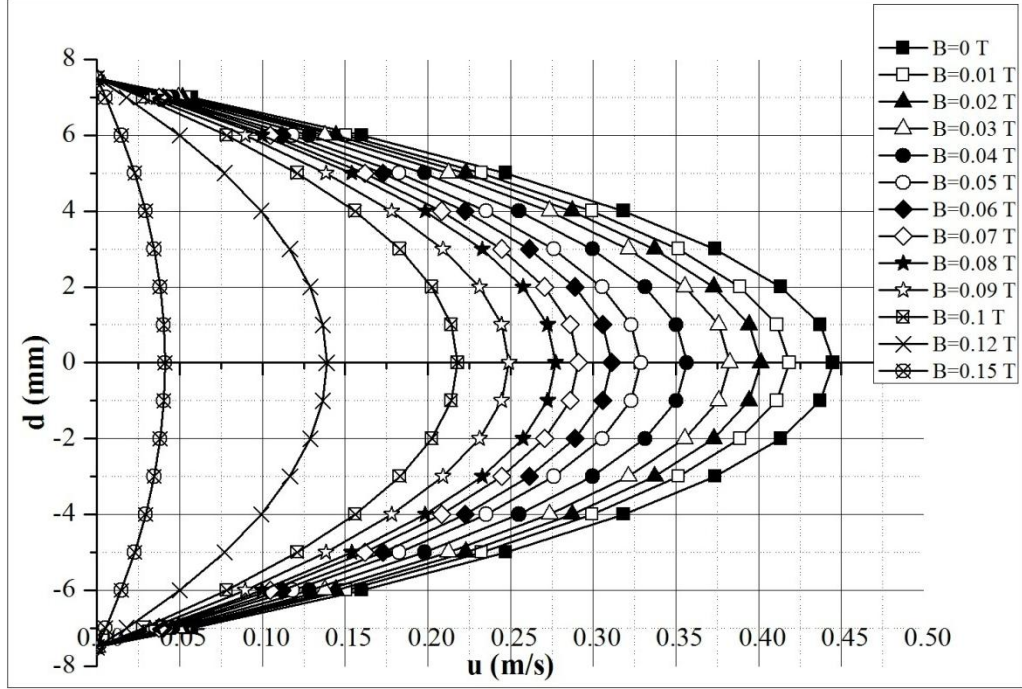
Şekil 5.1’de A akışkanının manyetik alan altında kalan 15 mm çapındaki boru boyunca meydana gelen akışı HD ve MHD akış modelleri olmak üzere iki farklı akış türünde incelenmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde ( $B=0$  T) maksimum  $u=0.301$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artmasına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde, manyetik alan indüksiyonunun  $B=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezinde sırasıyla  $u=0.253, 0.228, 0.206, 0.182, 0.157, 0.133, 0.125, 0.115, 0.094, 0.079, 0.050, 0.0094$  m/s olmuştur.



Şekil 5.2. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi ( $d:15$  mm, Akışkan:B).

Şekil 5.2’de B akışkanı için farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde boru çapı boyunca hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde maksimum  $u=0.363$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artmasına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde hız değerleri, manyetik alan indüksiyonunun  $B=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru

merkezinde sırasıyla  $u=0.332, 0.299, 0.288, 0.266, 0.241, 0.228, 0.210, 0.190, 0.177, 0.159, 0.092, 0.0179$  m/s olmuştur.

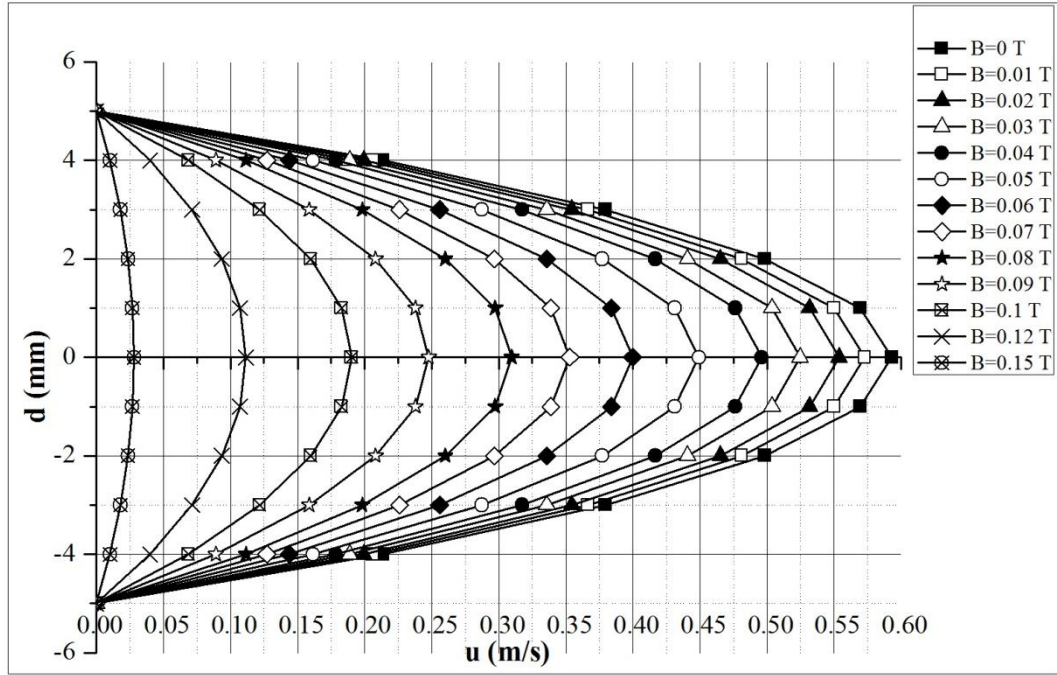


Şekil 5.3. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan:C).

Şekil 5.3'de de C akışkanı için farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde boru çapı boyunca meydana gelen hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde maksimum  $u=0.445$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artışıyla hız düşüşleri meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde hız değerleri, manyetik alan indüksiyonunun  $B=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezinde sırasıyla  $u=0.418, 0.401, 0.382, 0.356, 0.328, 0.311, 0.291, 0.277, 0.249, 0.218, 0.138, 0.0411$  m/s olmuştur.

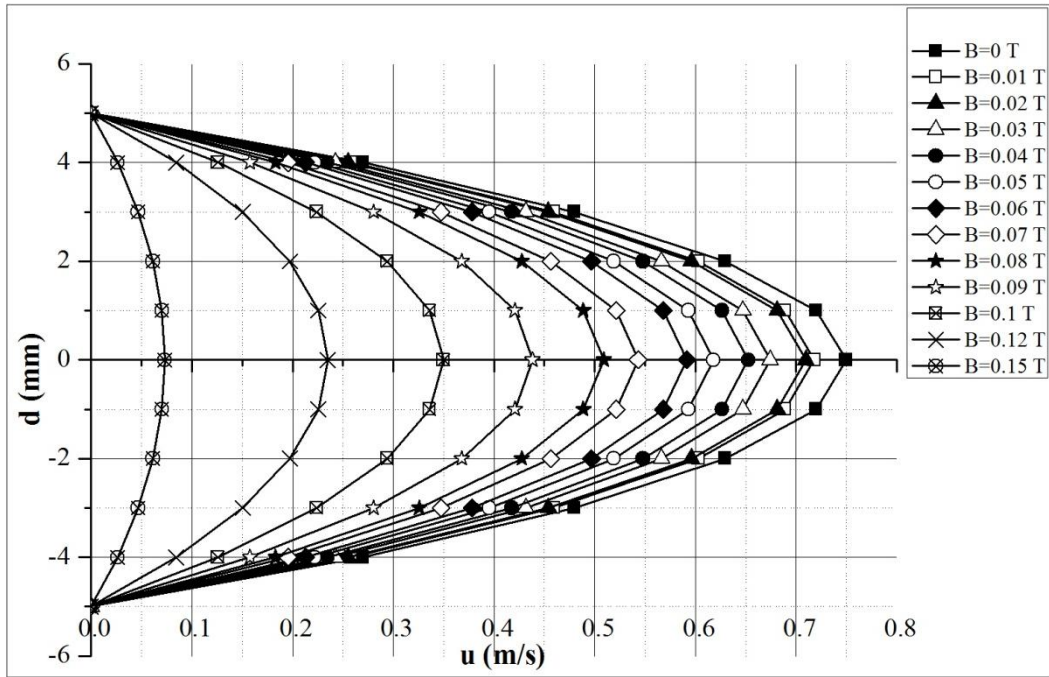
Benzer bir biçimde, manyetik alan altındaki 10 mm çapındaki boru akışına ait deneysel hız değerleri için aşağıdaki grafikler oluşturulmuştur. Şekil 5.4'de A akışkanın manyetik alan altında kalan 10 mm çapındaki boru boyunca meydana gelen akışı HD ve MHD akış modelleri olmak üzere iki farklı akış türünde incelenmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde maksimum

$u=0.593$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artışına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde, manyetik alan indüksiyonunun  $B=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezinde sırasıyla  $u=0.572, 0.553, 0.524, 0.495, 0.449, 0.399, 0.352, 0.309, 0.247, 0.190, 0.111, 0.028$  m/s olmuştur.



Şekil 5.4. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d:10 mm, Akışkan:A).

Şekil 5.5’de B akışkanın manyetik alan altında kalan 10 mm çapındaki boru boyunca meydana gelen akışı HD ve MHD akış modelleri olmak üzere iki farklı akış türünde incelenmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde maksimum  $u=0.749$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artışına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde, manyetik alan indüksiyonunun  $B=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezinde sırasıyla  $u=0.717, 0.709, 0.674, 0.652, 0.617, 0.591, 0.543, 0.509, 0.438, 0.349, 0.234, 0.0731$  m/s olmuştur.

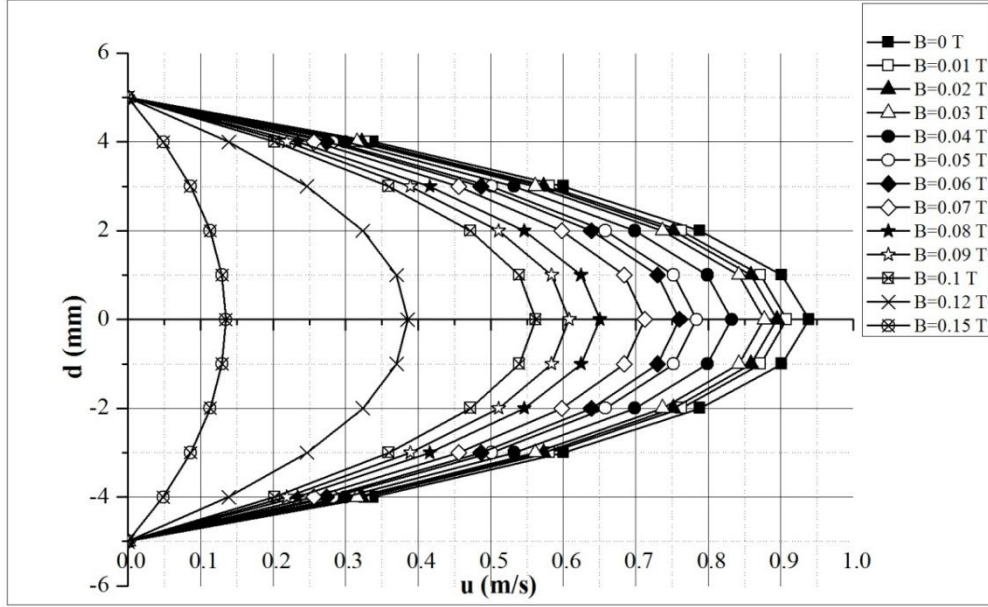


Şekil 5.5. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d:10 mm, Akışkan:B).

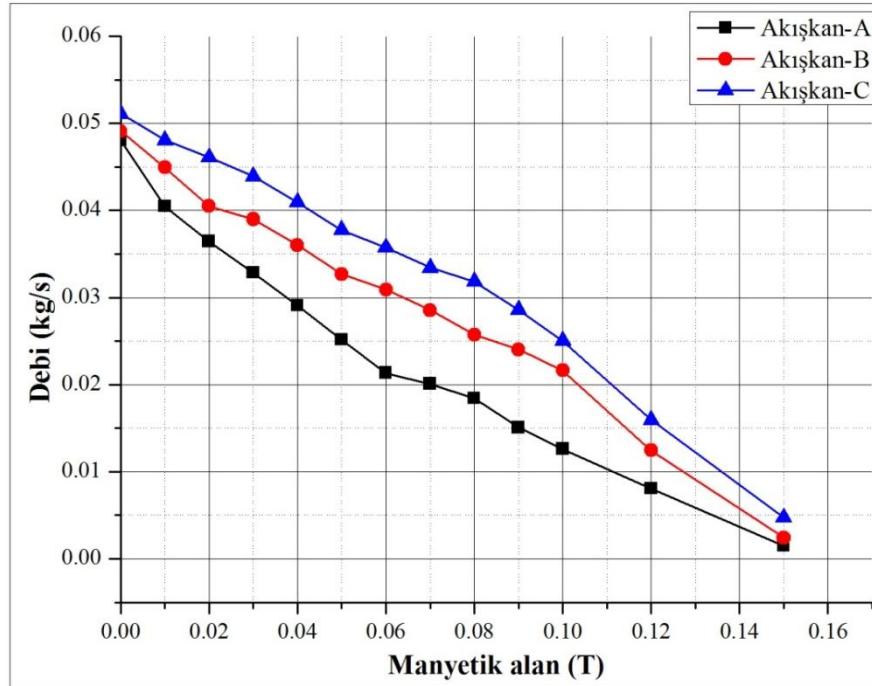
Şekil 5.6'da C akışkanın manyetik alan altında kalan 10 mm çapındaki boru boyunca meydana gelen akışı HD ve MHD akış modelleri olmak üzere iki farklı akış türünde incelenmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde maksimum  $u=0.938$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artmasına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde, manyetik alan indüksiyonunun  $B=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezinde sırasıyla  $u=0.908, 0.894, 0.877, 0.832, 0.783, 0.760, 0.712, 0.650, 0.608, 0.562, 0.385, 0.135$  m/s olmuştur.

Şekil 5.7 ve 5.8' de sırasıyla boru çapı 15 ve 10 mm için her üç tür akışkanın deneysel ölçümlerden elde edilen kütleli debilerinin manyetik alan indüksiyonuna bağlı değişim grafikleri verilmiştir. Şekil 5.7' den görülebileceği gibi manyetik alan indüksiyonunun artmasına bağlı olarak her üç akışkanın kütleli debi değerleri azalmıştır. Farklı yoğunluklardaki akışkanların kütleli debi değerleri manyetik alan indüksiyonu altında değişiklik göstermiştir. Akışkan A, B ve C için manyetik alanın olmadığı durumda sırasıyla  $0.048, 0.0492$  ve  $0.511$  kg/s olan kütleli debiler,

manyetik alanın en büyük değeri olan  $B=0.15$  T'da sırasıyla 0.001513, 0.002428 ve 0.004725 kg/s olarak ölçülmüştür. En düşük yoğunluğa sahip C akışkanının ölçülen kütleli debisi en fazla olmuştur.

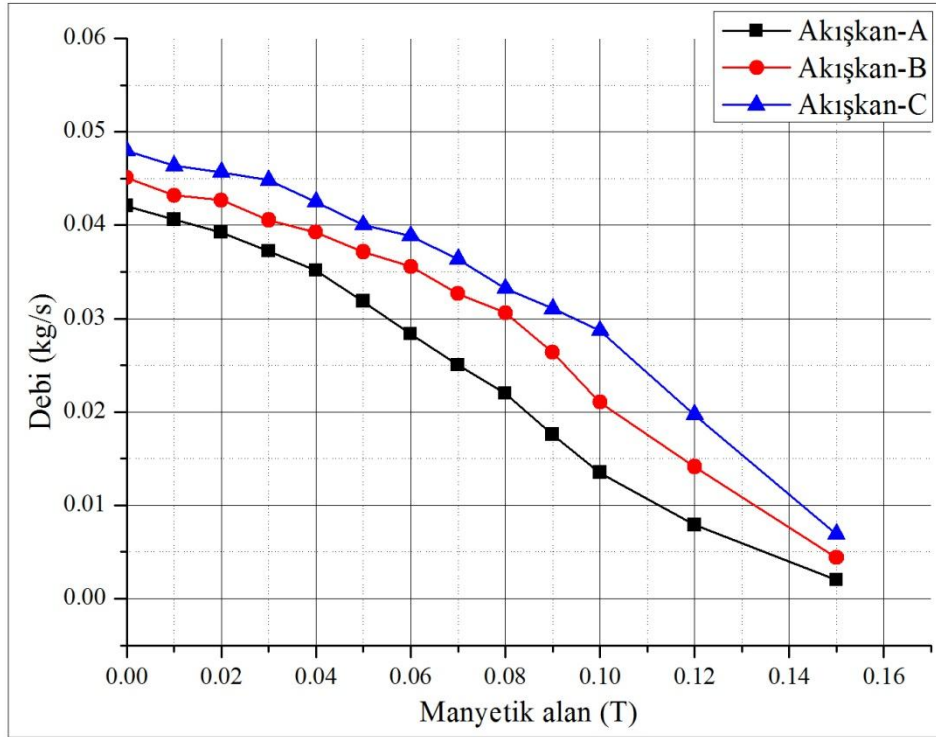


Şekil 5.6. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca deneysel hız değişimi (d:10 mm, Akışkan: C).



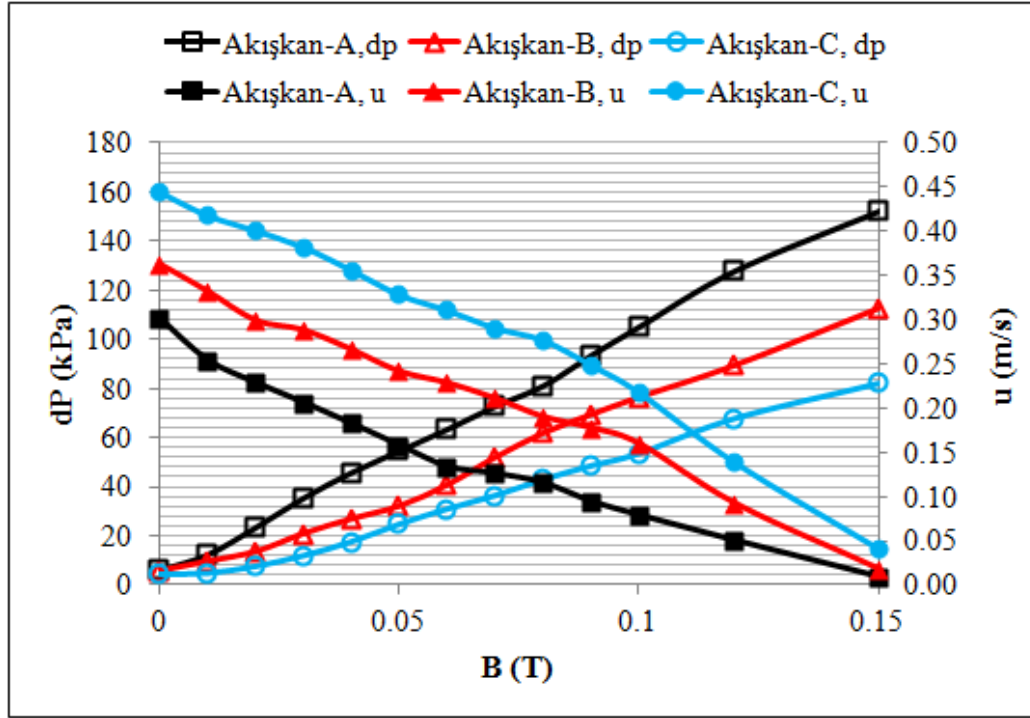
Şekil 5.7. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı olarak kütleli debi değişimi (d:15 mm, Akışkan: A-B-C).

Şekil 5.8' de de benzer bir durum söz konusu olup manyetik alan indüksiyonunun artışına bağlı olarak her üç akışkanın kütleli debi değerleri azalmıştır. Akışkan A, B ve C için manyetik alanın olmadığı durumda sırasıyla 0.042, 0.045 ve 0.0479 kg/s olan kütleli debiler, manyetik alanın en büyük değeri olan B=0.15 T'da sırasıyla 0.001985, 0.004398 ve 0.006896 kg/s olarak ölçülmüştür. Bu ölçümlerde de en düşük yoğunluğa sahip C akışkanının kütleli debisi en fazla olmuştur.

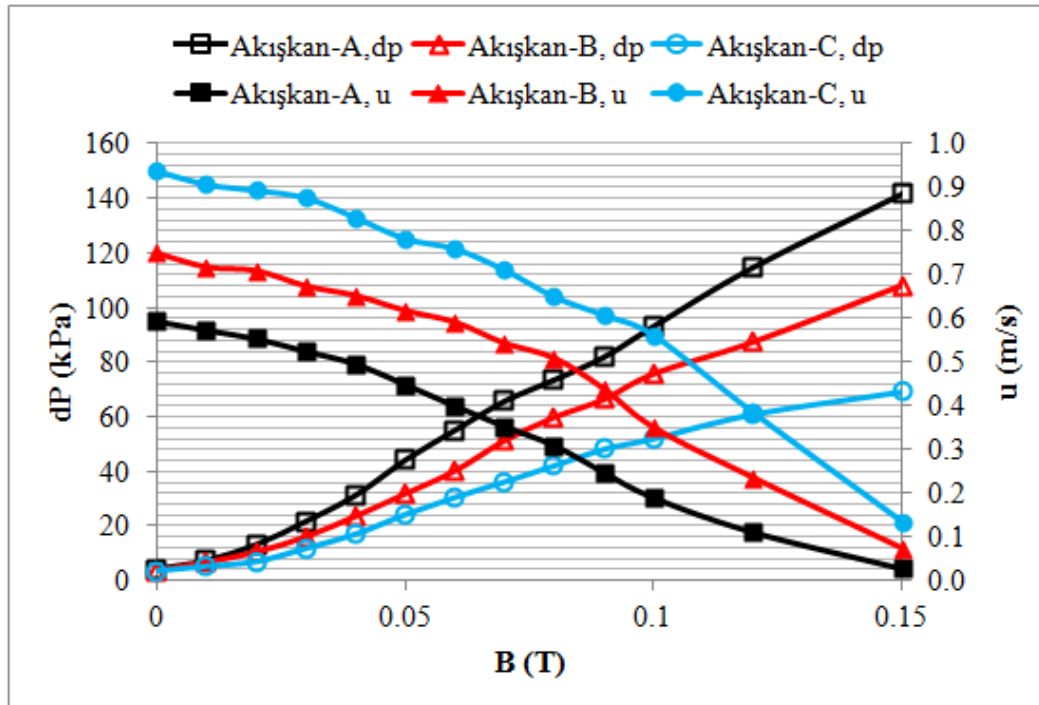


Şekil 5.8. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı olarak kütleli debi değişimi (d:10 mm, Akışkan: A-B-C).

Şekil 5.9'da boru çapı 15 mm için manyetik alan indüksiyonu artışına bağlı olarak deneylerde ölçülen basınç ve boru merkezindeki hız değişimleri birlikte verilmiştir. Her üç akışkan için manyetik alan arttığında hız değerleri düşerken basınç değerleri artış göstermiştir. Akışkan A, B ve C için manyetik alanın olmadığı Hidrodinamik akış modelinde sırasıyla 5.845, 5.504 ve 4.313 kPa olarak ölçülen basınç değerleri manyetik alan varlığında yani MHD akış modelinde artış göstermiş ve manyetik alanın en büyük değeri olan B=0.15 T'da bu değerler sırasıyla 152.394, 112.610 ve 82.147 kPa olarak ölçülmüştür. Akışkanların yoğunlukları azaldıkça basınç değerleri de azalmıştır.

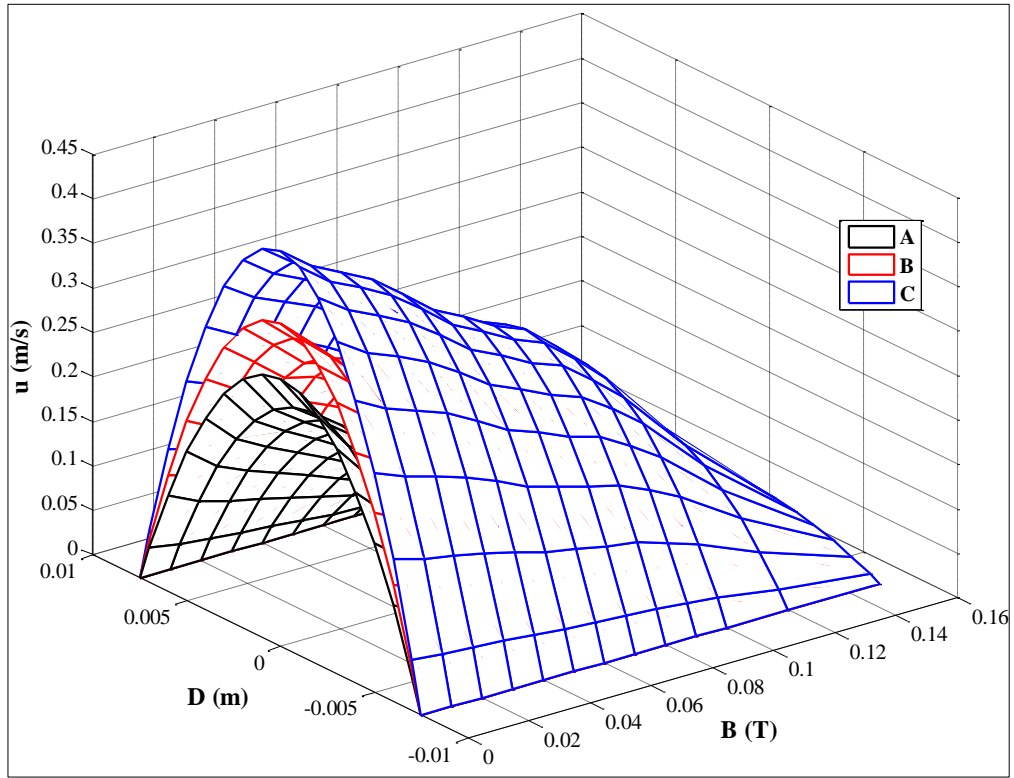


Şekil 5.9. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı olarak basınç ve boru merkezindeki hız değişimleri (d:15 mm).



Şekil 5.10. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı olarak basınç ve boru merkezindeki hız değişimleri (d:10 mm).

Şekil 5.10'da da benzer bir biçimde boru çapı 10 mm için manyetik alan indüksiyonu artışına bağlı olarak deneylerde ölçülen basınç ve boru merkezindeki hız değişimleri birlikte verilmiştir. Akışkan A, B ve C için manyetik alanın olmadığı Hidrodinamik akış modelinde sırasıyla 4.125, 3.440 ve 3.380 kPa olarak ölçülen basınç değerleri, MHD akış modelinde artış göstermiş ve manyetik alanın en büyük değeri olan  $B=0.15$  T'da bu değerler sırasıyla 141.576, 108.057 ve 69.341 kPa olarak ölçülmüştür. Akışkanların yoğunlukları azaldıkça basınç değerleri de azalmıştır.



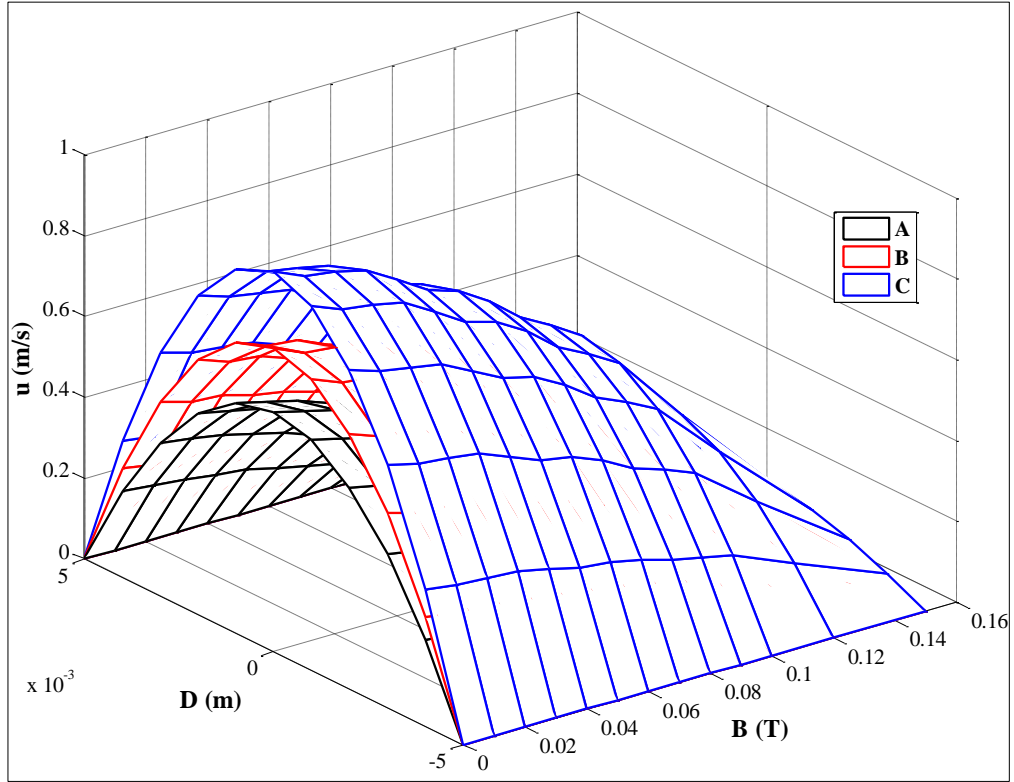
Şekil 5.11. Manyetik alan indüksiyonuna ve çapa bağlı olarak hız değişimlerinin mesh görünümü (d:15 mm, Akışkan: A-B-C).

Şekil 5.11'de manyetik alanın,  $B=0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru çapı 15 mm için deneylerde ölçülen kütleli debiler sonucu hesaplanan hız değerlerinin mesh yapısı verilmiştir. Burada; her üç akışkana ait deneysel ölçüm sonuçlarının parabolik hız görüntüleri elde edilmiştir. Akışkanlara uygulanan manyetik alan her üç akışkanın boru içi akış hızlarını düşürmüştür. Akışkanların farklı fiziksel özelliklerinden dolayı manyetik alan etkisi altındaki davranışları da farklı olmuştur. Hidrodinamik akış durumunda, boru merkezinde A akışkanı için  $0.301$  m/s olan hız değeri, B ve C akışkanı için



sırasıyla %17.07 ve %32.36 oranlarında artış göstererek 0.363 ve 0.445 m/s değerlerine ulaşmıştır.

Benzer bir biçimde, Şekil 5.12'de manyetik alanın aynı değerlerinde boru çapı 10 mm için hesaplanan hız değerlerinin mesh yapısı verilmiştir. Akışkanlara uygulanan manyetik alan her üç akışkanın boru içi akış hızlarını düşürmüştür akışkanların farklı fiziksel özelliklerinden dolayı manyetik alan etkisi altındaki davranışları da farklı olmuştur. Hidrodinamik akış durumunda, boru merkezinde A akışkanı için 0.593 m/s olan hız değeri, B ve C akışkanı için sırasıyla %20.82 ve %36.78 oranlarında artış göstererek 0.749 ve 0.938 m/s değerlerine ulaşmıştır. Boru çapı küçüldükçe beklenildiği gibi hızlarda artışlar olmuştur.

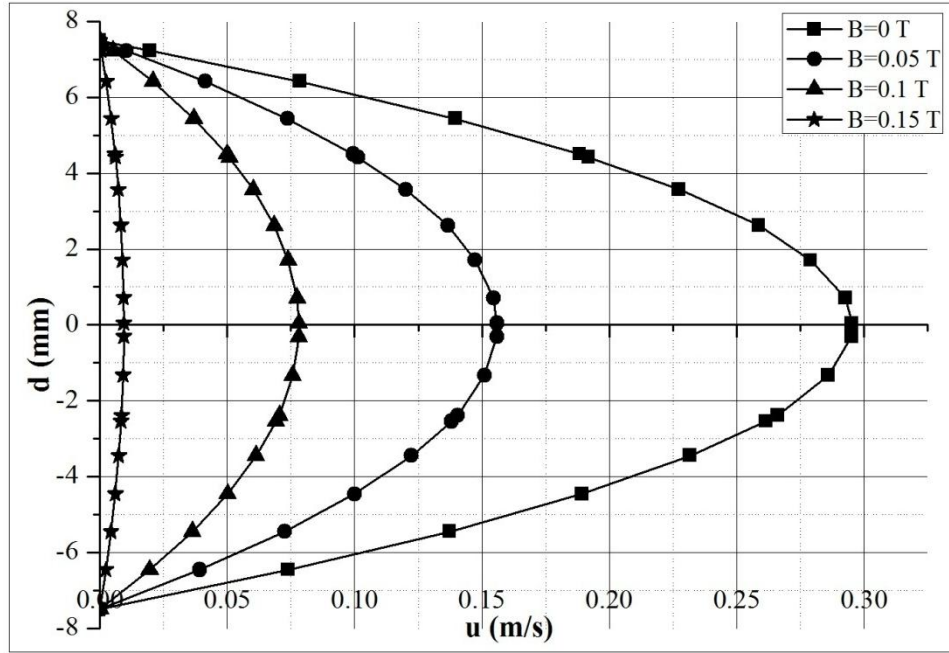


Şekil 5.12. Manyetik alan indüksiyonuna ve çapa bağlı olarak hız değişimlerinin mesh görünümü (d:10 mm, Akışkan: A-B-C).

## 5.2. NÜMERİK SONUÇLAR

Nümerik çalışmadan elde edilen sonuçlara göre iki farklı boru geometrisi ve üç farklı akışkan için manyetik alanın  $B=0, 0.05, 0.1, 0.15$  T değerlerinde aşağıda verilen şekillerde çap boyunca hız değişim grafikleri oluşturulmuştur.

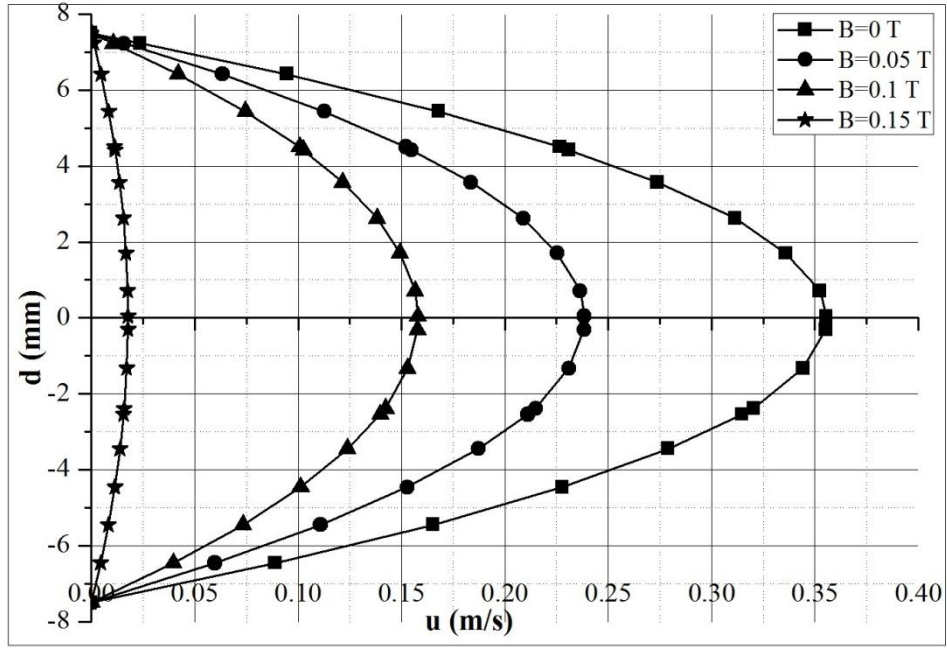
Şekil 5.13'de A akışkanının manyetik alan altında kalan 15 mm çapındaki boru boyunca akışı HD ve MHD akış modelleri olmak üzere iki farklı akış türünde nümerik olarak incelenmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde ( $B=0$  T) maksimum  $u=0.295$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artmasına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde manyetik alan indüksiyonunun  $B=0.05, 0.1$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezindeki hız değerleri sırasıyla  $u=0.155, 0.078$  ve  $0.0093$  m/s olmuştur.



Şekil 5.13. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d:15 mm, Akışkan:A).

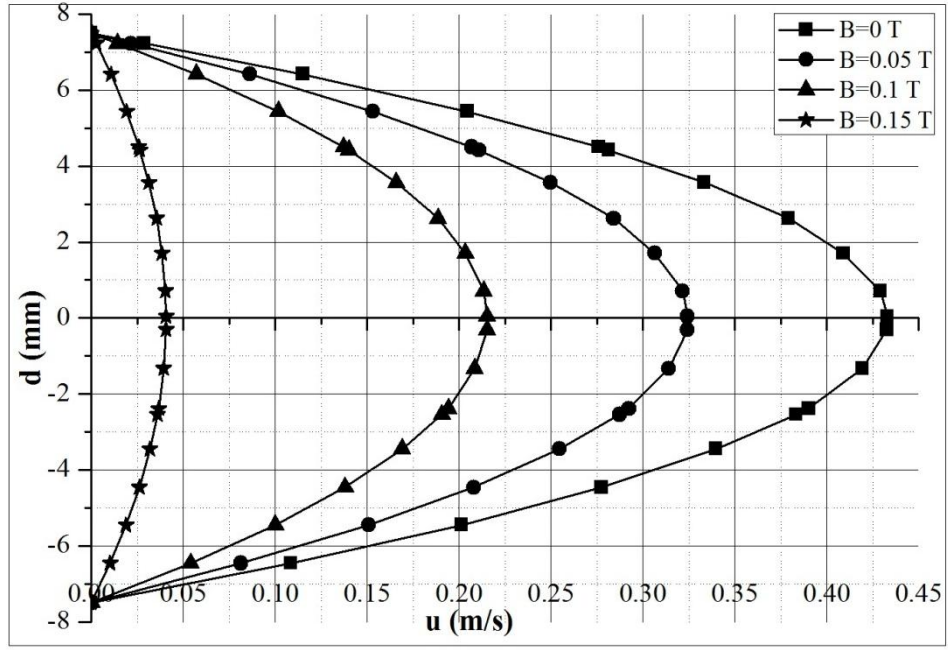
Şekil 5.14'de B akışkanı için farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde boru çapı boyunca nümerik çalışmadan elde edilen hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde maksimum  $u=0.355$  m/s olan hız

değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artışına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde manyetik alan indüksiyonunun  $B=0.05$ ,  $0.1$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezindeki hız değerleri sırasıyla  $u=0.238$ ,  $0.157$  ve  $0.0177$  m/s olmuştur.



Şekil 5.14. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d:15 mm, Akışkan:B).

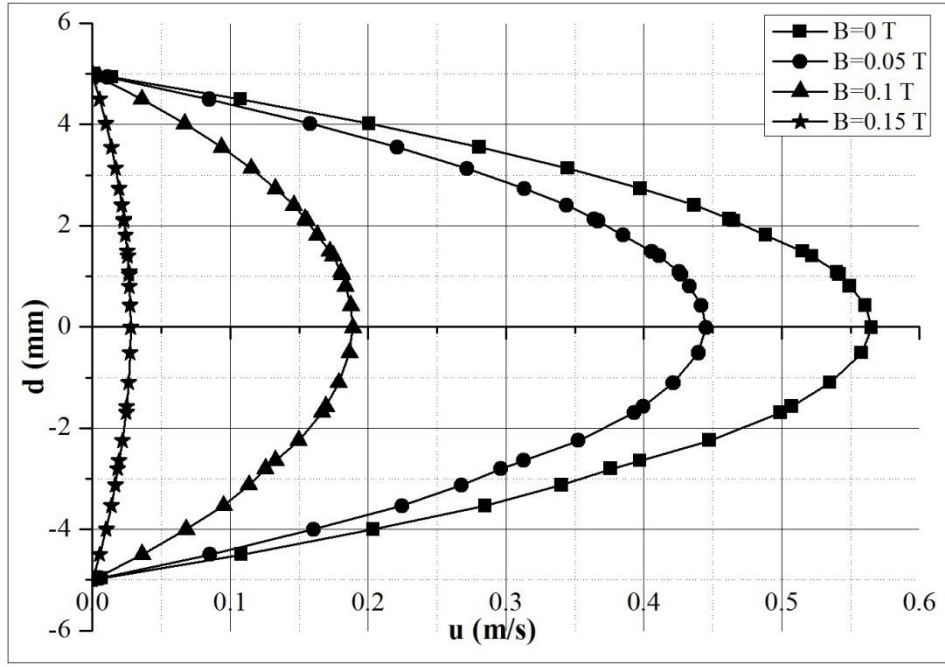
Şekil 5.15'de C akışkanı için farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde boru çapı boyunca meydana gelen nümerik hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde maksimum  $u=0.432$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artışına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler manyetik alan indüksiyonunun  $B_0=0.05$ ,  $0.1$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezinde sırasıyla  $u=0.324$ ,  $0.215$  ve  $0.0406$  m/s olmuştur.



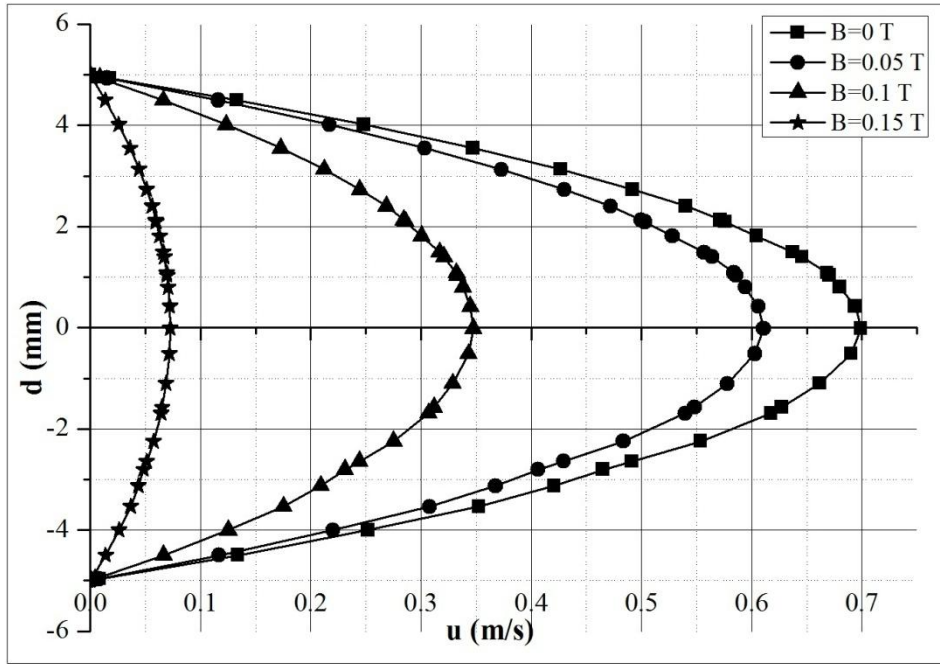
Şekil 5.15. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d:15 mm, Akışkan:C).

Benzer bir biçimde; Şekil 5.16'de A akışkanı için farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde 10 mm çapındaki boru için çap boyunca meydana gelen nümerik hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde maksimum  $u=0.565$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artışına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde manyetik alan indüksiyonunun  $B_0=0.05, 0.1$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezindeki hız değerleri sırasıyla  $u=0.445, 0.188$  ve  $0.027$  m/s olmuştur.

Şekil 5.17'de B akışkanı için farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde 10 mm çapındaki boru için boru çap boyunca meydana gelen nümerik hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi HD akış modelinde maksimum  $u=0.699$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artışına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde manyetik alan indüksiyonunun  $B=0.05, 0.1$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezindeki hız değerleri sırasıyla  $u=0.6108, 0.347$  ve  $0.072$  m/s olmuştur.



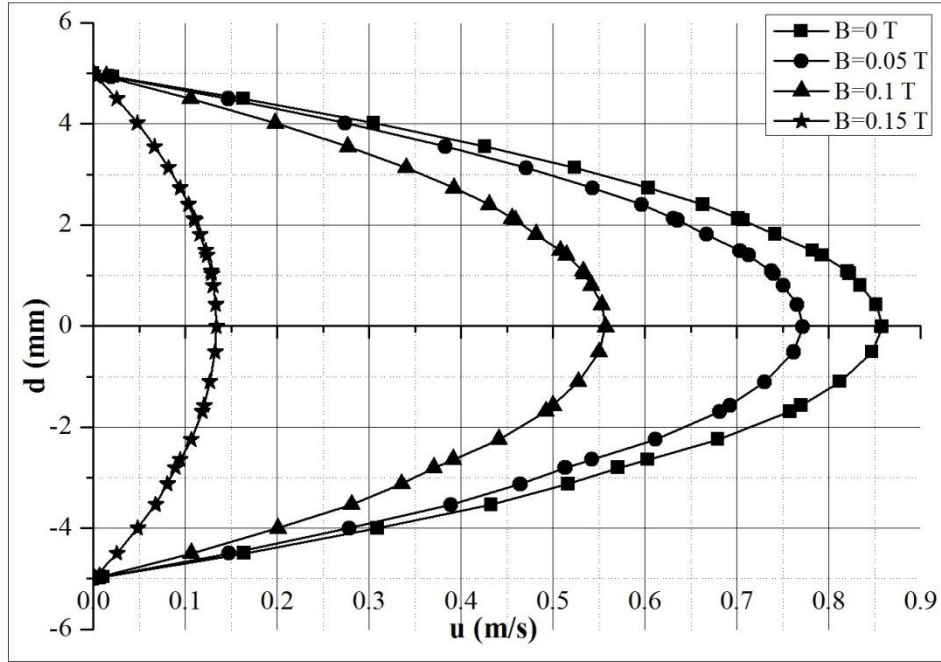
Şekil 5.16. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değışimi (d:10 mm, Akışkan: A).



Şekil 5.17. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değışimi (d:10 mm, Akışkan: B).

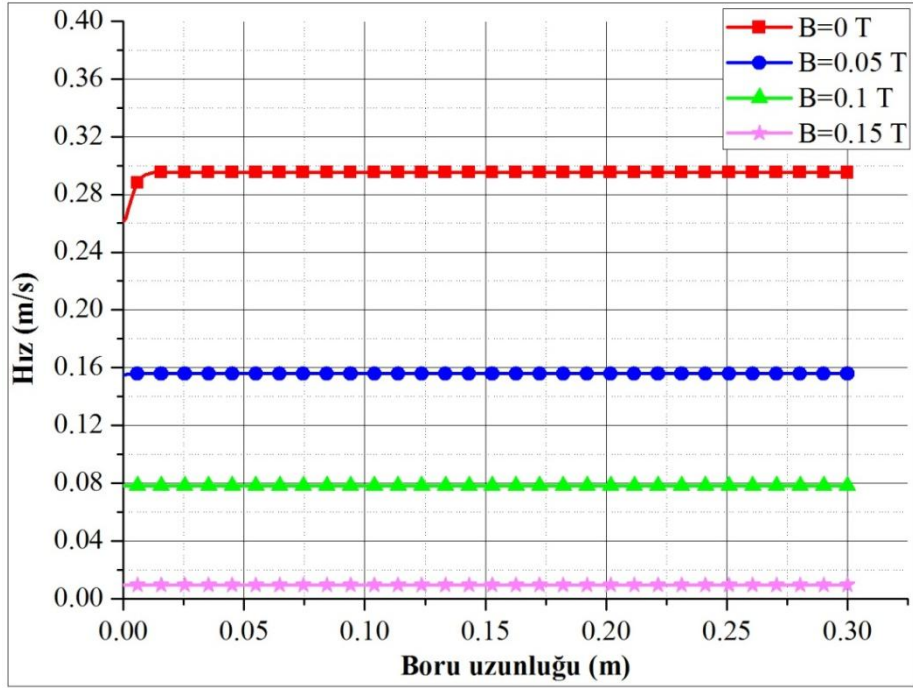
Şekil 5.18'de de C akışkanı için farklı manyetik alan indüksiyonu değeriinde 10 mm çapındaki boru için boru çap boyunca meydana gelen nümerik hız değışimleri

verilmiştir. Burada; HD akış modelinde maksimum  $u=0.858$  m/s olan hız değerinde, MHD akış modelinde manyetik alan indüksiyonunun artışına bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu düşüşler neticesinde manyetik alan indüksiyonunun  $B= 0.05$ ,  $0.1$  ve  $0.15$  T değerlerinde boru merkezindeki hız değerleri sırasıyla  $u=0.771$ ,  $0.557$  ve  $0.134$  m/s olmuştur.

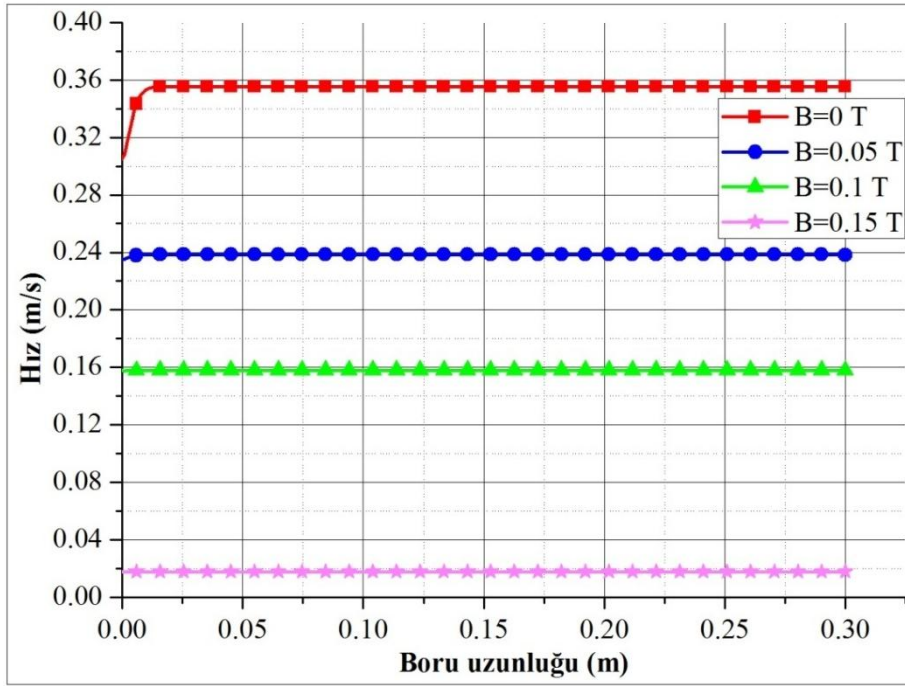


Şekil 5.18. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı çap boyunca nümerik hız değişimi (d:10 mm, Akışkan: C).

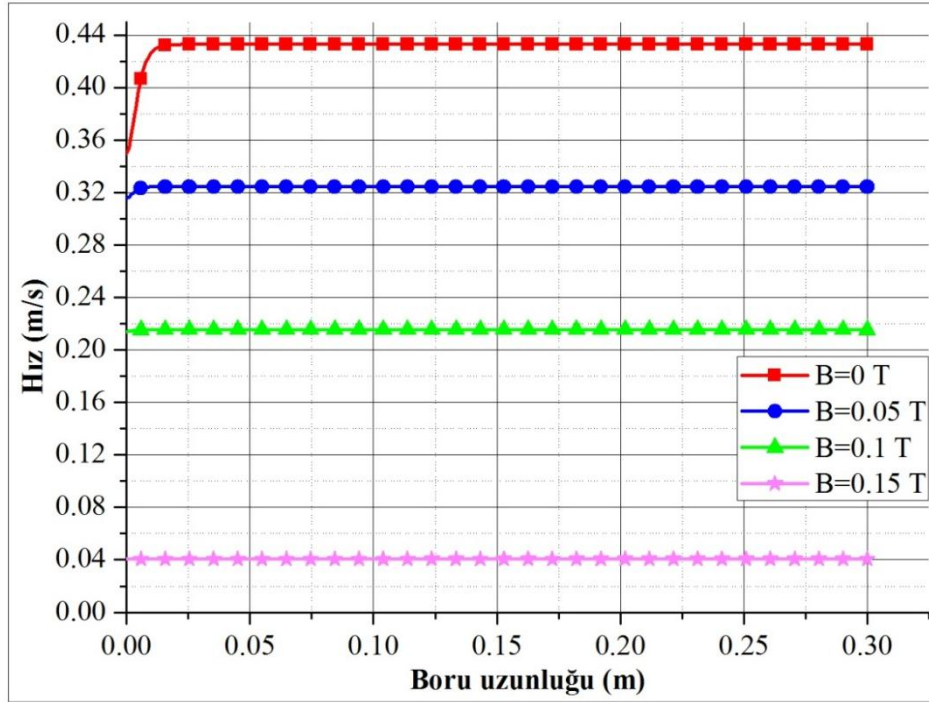
Şekil 5.19-5.21'de sırasıyla A, B ve C akışkanları için boru merkezinde ( $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0-0.3$ ) aksel yöndeki manyetik alana bağlı olarak değişen hız eğrileri verilmiştir. Şekillerden de açıkça görülebileceği gibi uygulanan manyetik alan akış hızlarını düşürmüştür. Bu düşüşler Şekil 5.19'a göre uygulanan manyetik alanın  $B=0.05$ ,  $0.1$  ve  $0.15$  T olduğu durumda sırasıyla %47.45, %73.55 ve %96.82 olmuştur. Şekil 5.20'ye göre uygulanan manyetik alanın  $B=0.05$ ,  $0.1$  ve  $0.15$  T olduğu durumda sırasıyla %32.95, %55.77 ve %95.01 olmuştur. Şekil 5.21'e göre ise uygulanan manyetik alanın  $B=0.05$ ,  $0.1$  ve  $0.15$  T olduğu durumda sırasıyla %25, %50.23 ve %90.6 olmuştur. En fazla düşüş A akışkanı için manyetik alanın en büyük değeri olan  $B=0.15$  T değerinde olmuştur.



Şekil 5.19. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d:15mm, Akışkan:A, x=0, y=0, z=0-0.3).



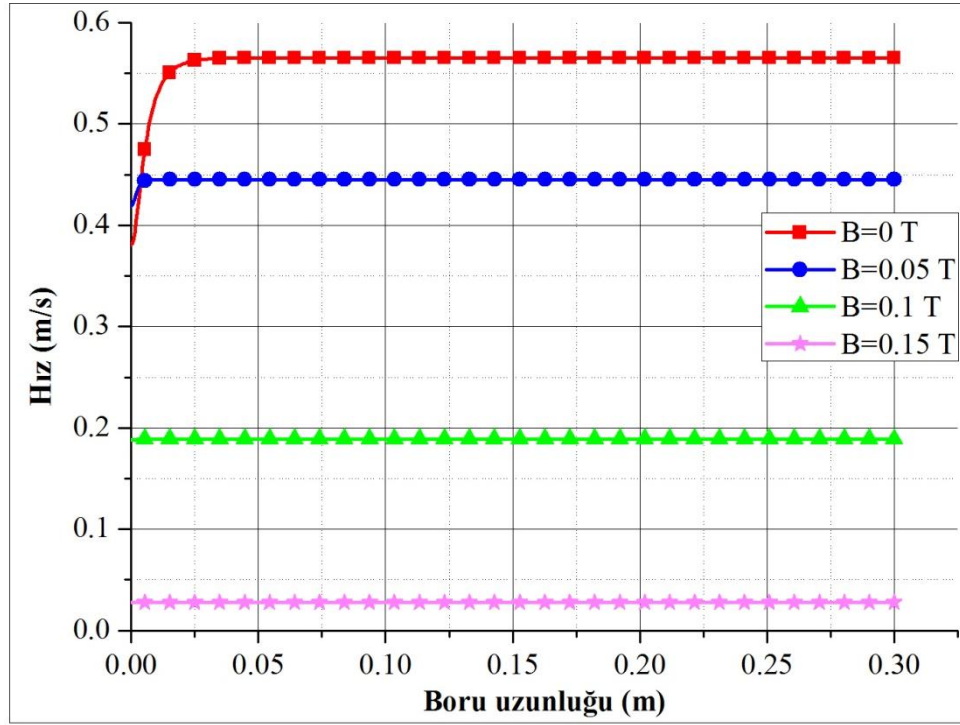
Şekil 5.20. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 15 mm, Akışkan: B, x= 0, y= 0, z= 0-0.3).



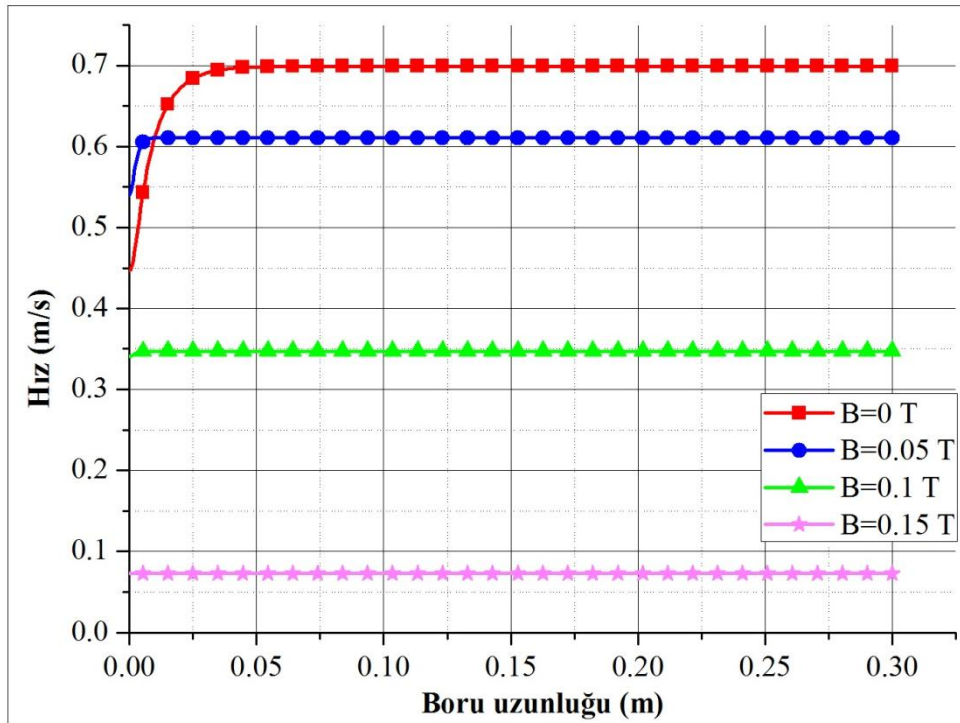
Şekil 5.21. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d:15 mm, Akışkan: C,  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0-0.3$ ).

Benzer bir biçimde boru çapı 10 mm için Şekil 5.22-5.24'de sırasıyla A, B ve C akışkanları için boru merkezinde ( $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0-0.3$ ) aksenal yöndeki manyetik alana bağlı hız eğrileri verilmiştir. Şekillerden de açıkça görülebileceği gibi uygulanan manyetik alan akış hızlarını düşürmüştür. Bu düşüşler Şekil 5.22'de uygulanan manyetik alanın  $B=0.05$ ,  $0.1$  ve  $0.15$  T olduğu durumda sırasıyla %21.23, %66.72 ve %95.05 olmuştur. Şekil 5.23'e göre uygulanan manyetik alanın  $B=0.05$ ,  $0.1$  ve  $0.15$  T olduğu durumda sırasıyla %12.61, %50.35 ve %89.69 olmuştur. Şekil 5.24'e göre ise uygulanan manyetik alanın  $B=0.05$ ,  $0.1$  ve  $0.15$  T olduğu durumda sırasıyla %10.13, %35.08 ve %84.38 olmuştur. 10 mm çapa sahip boru geometrisi için de en fazla hız düşüş A akışkanı için manyetik alanın en büyük değeri olan  $B=0.15$  T değerinde olmuştur.

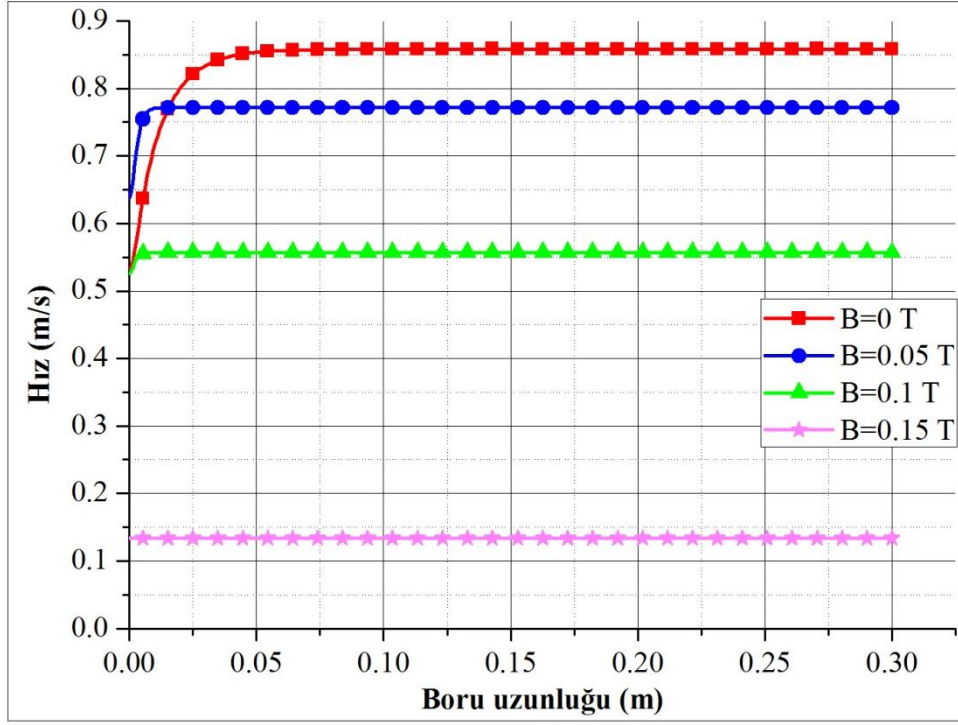




Şekil 5.22. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: A, x= 0, y= 0, z= 0-0.3).

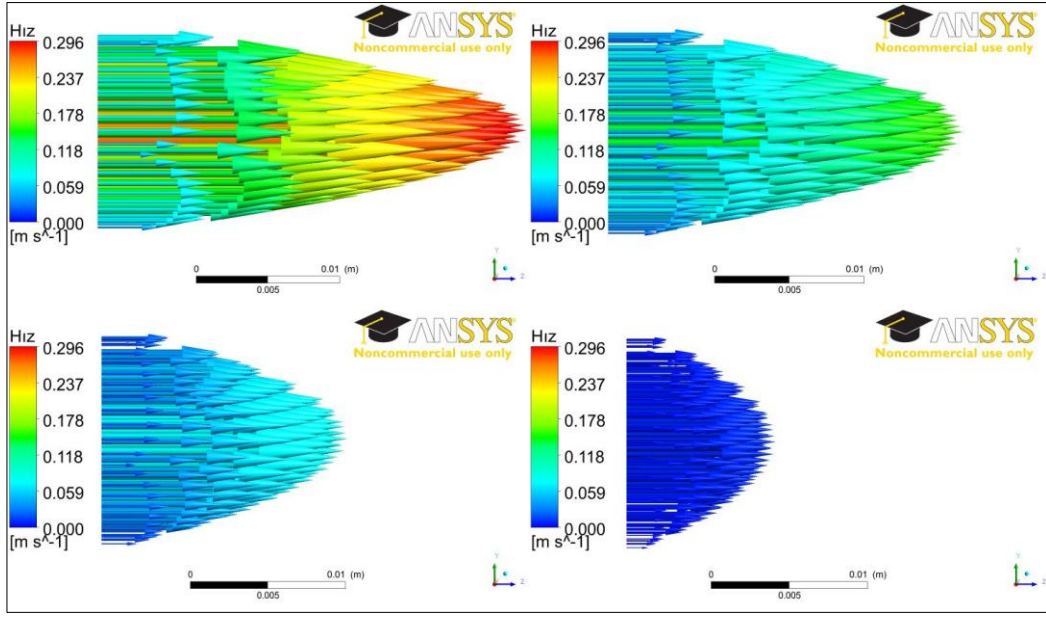


Şekil 5.23. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: B, x=0, y=0, z=0-0.3).

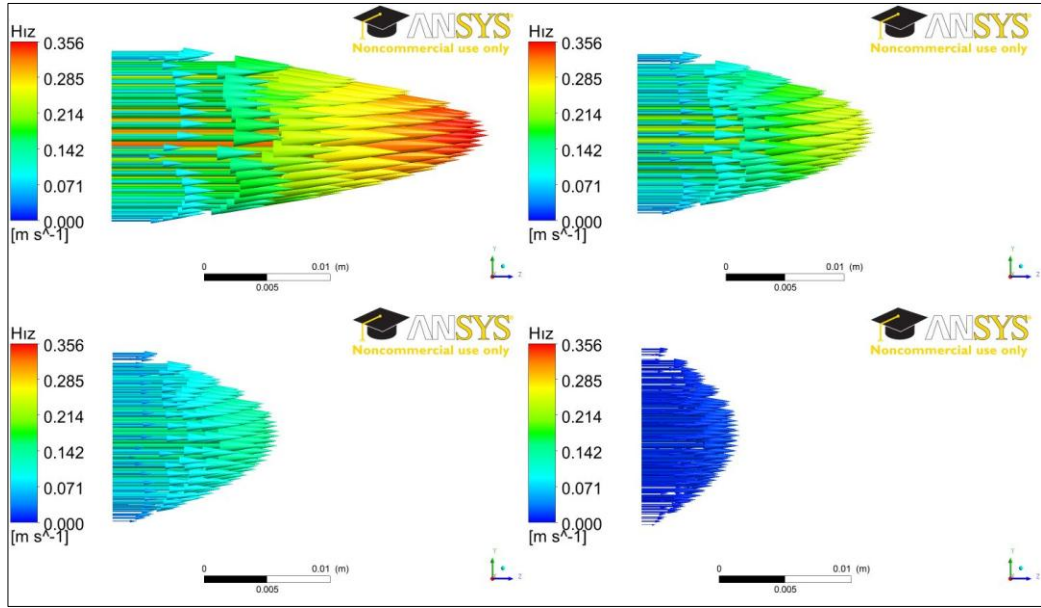


Şekil 5.24. Manyetik alan indüksiyonuna bağlı boru merkezinde nümerik hız değişimi (d: 10 mm, Akışkan: C,  $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0-0.3$ ).

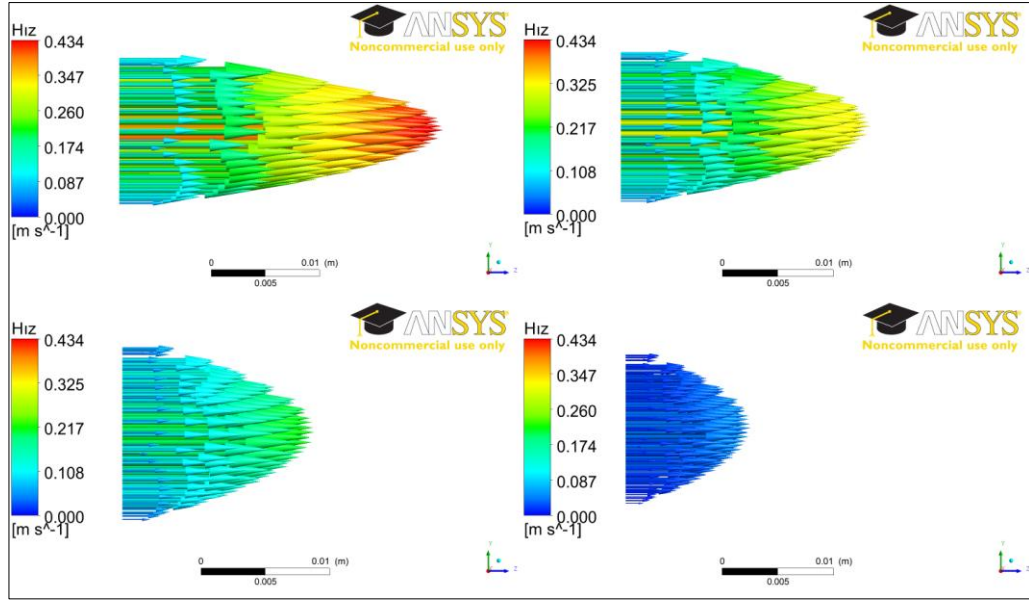
Ayrıca, yapılan nümerik hesaplamalara göre A, B, C akışkanları için  $B=0, 0.05, 0.1$  ve  $0.15$  T değerlerinde silindirik boru içinde ( $x_{1,2}=-0.075-0.075$ ,  $y_{1,2}=0-0$ ,  $z_{1,2}=0.15-0.15$  konumunda) hız vektörlerinin görünümü aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Şekillerde HD akış modelinde ( $B=0$ ) paraboloid olan hız vektörlerinin görünümü MHD akış durumunda ( $B \neq 0$ ) uygulanan manyetik alanın etkisiyle ( $B=0.05, 0.1, 0.15$  T) hızlar düşüş göstermiş ve paraboloid görünüm manyetik alanın  $B=0.15$  T değerinde boru merkezinde neredeyse düz bir görünüm halini almıştır. MHD teoride uygulanan manyetik alana bağlı olarak merkezdeki hız profilleri yassılaşıma eğilimindedir. Boru merkezindeki düz hız profili ve çeper yakınındaki hız düşüşü tipik MHD akış özelliklerini göstermiştir.



Şekil 5.25. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerindeki nümerik hız vektörleri (d: 15 mm, Akışkan: A).

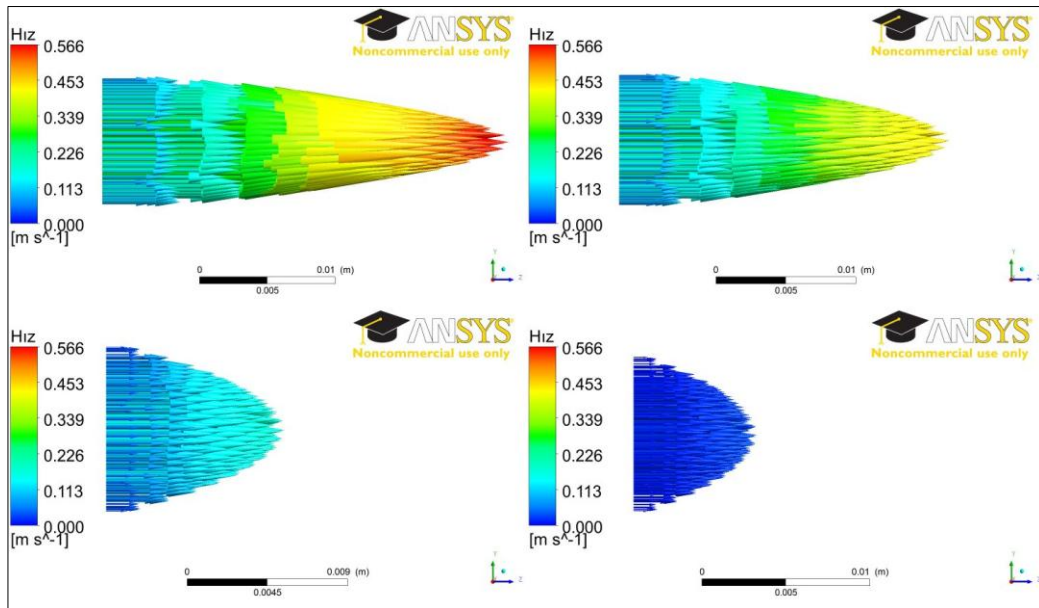


Şekil 5.26. Farklı manyetik alan indüksiyonudeğerlerindeki nümerik hız vektörleri (d: 15 mm, Akışkan: B).

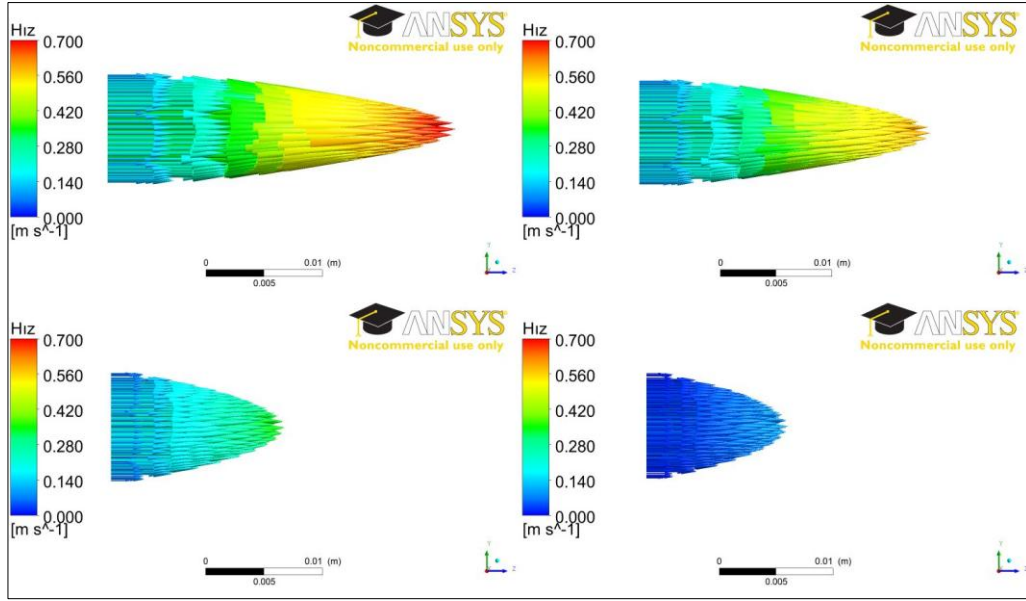


Şekil 5.27. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerindeki nümerik hız vektörleri (d: 15 mm, Akışkan: C).

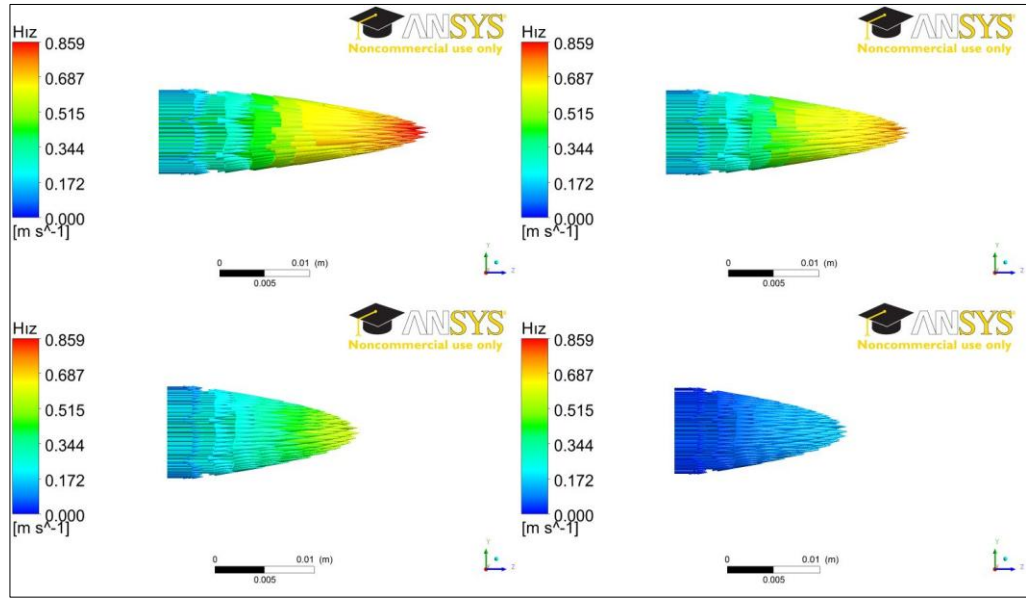
Şekil 5.28-30'da da boru çapı 10 mm için boru içi akış hız vektörleri verilmiştir. Benzer bir durum bu grafikler için de söz konusudur. Manyetik alanın artışı hız düşüşlerine neden olmuş ve bu etki açık bir biçimde simülasyon sonuçlarından elde edilen hız vektörlerinden görülmektedir.



Şekil 5.28. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerindeki nümerik hız vektörleri (d: 10 mm, Akışkan: A).

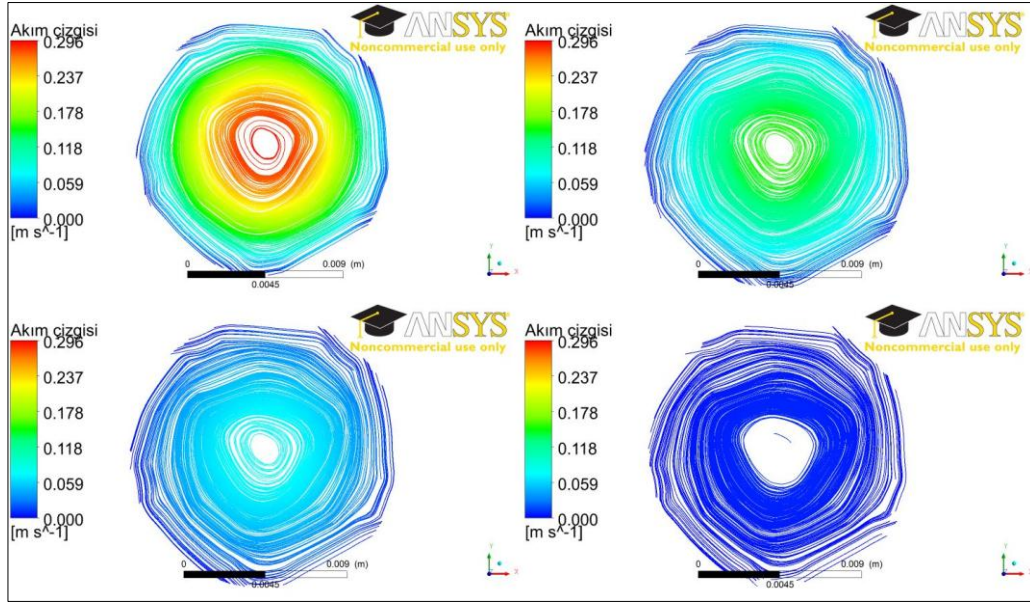


Şekil 5.29. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerindeki nümerik hız vektörleri (d: 10 mm, Akışkan: B).

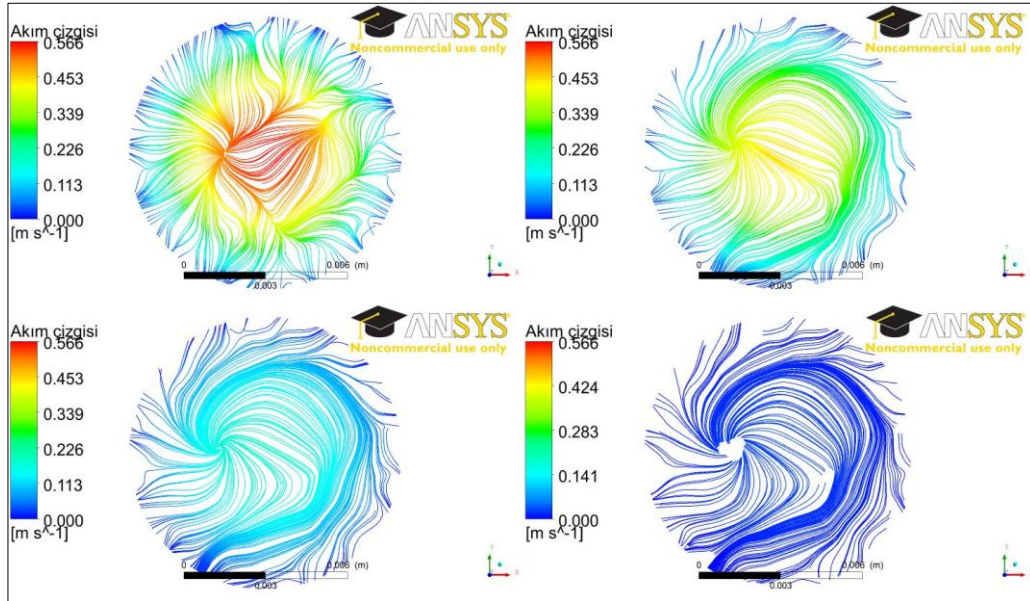


Şekil 5.30. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerindeki nümerik hız vektörleri (d:10mm, Akışkan: C).

A akışkanı için her iki boru geometrisinde çap boyunca meydana gelen akım çizgilerinin görüntüsü Şekil 5.31-5.32'de verilmiştir.

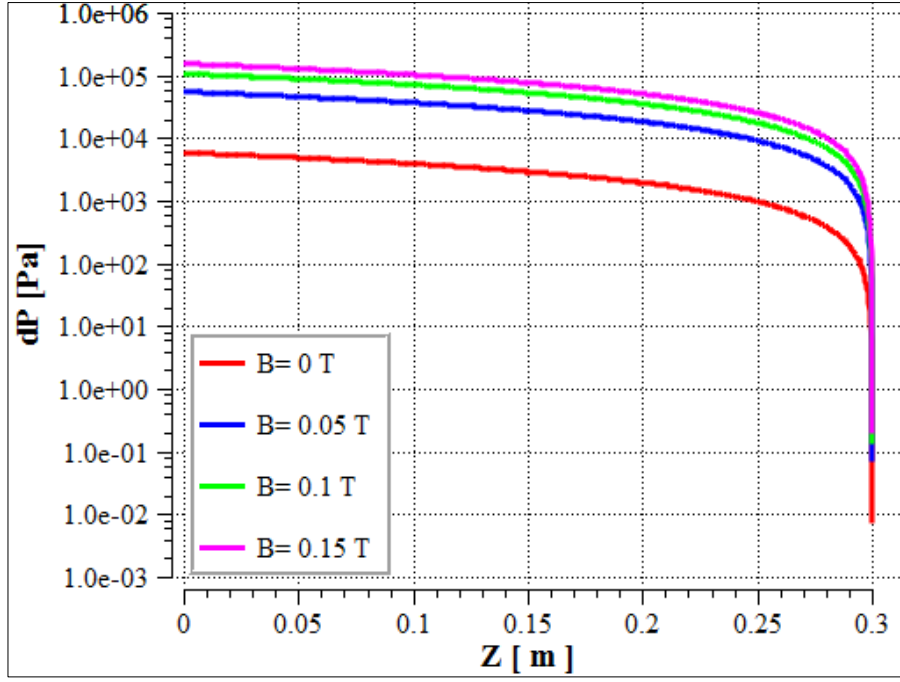


Şekil 5.31. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde meydana gelen akım çizgileri (D:15 mm, Akışkan: A,  $x_{1-2}=-0.0075-0.0075$ ,  $y_{1-2}=0$ ,  $z_{1-2}=0.15$ ).

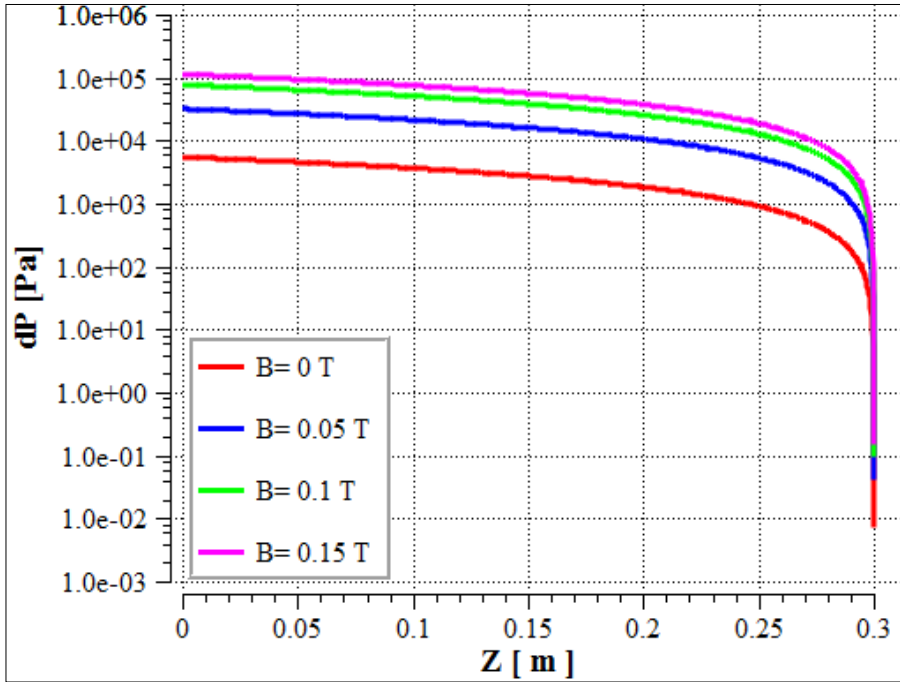


Şekil 5.32. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde meydana gelen akım çizgileri (d:10 mm, Akışkan: A,  $x_{1-2}=-0.0075-0.0075$ ,  $y_{1-2}=0$ ,  $z_{1-2}=0.15$ ).

Şekil 5.33-35'de nümerik hesaplamalardan elde edilen A, B ve C akışkanları için 15 mm çapa sahip boruda aksel yönde meydana gelen basınç düşüşleri verilmiştir. Uygulanan manyetik alan şekillerden de görülebileceği gibi borunun girişi ve çıkışı arasındaki basınç farkını arttırmıştır.



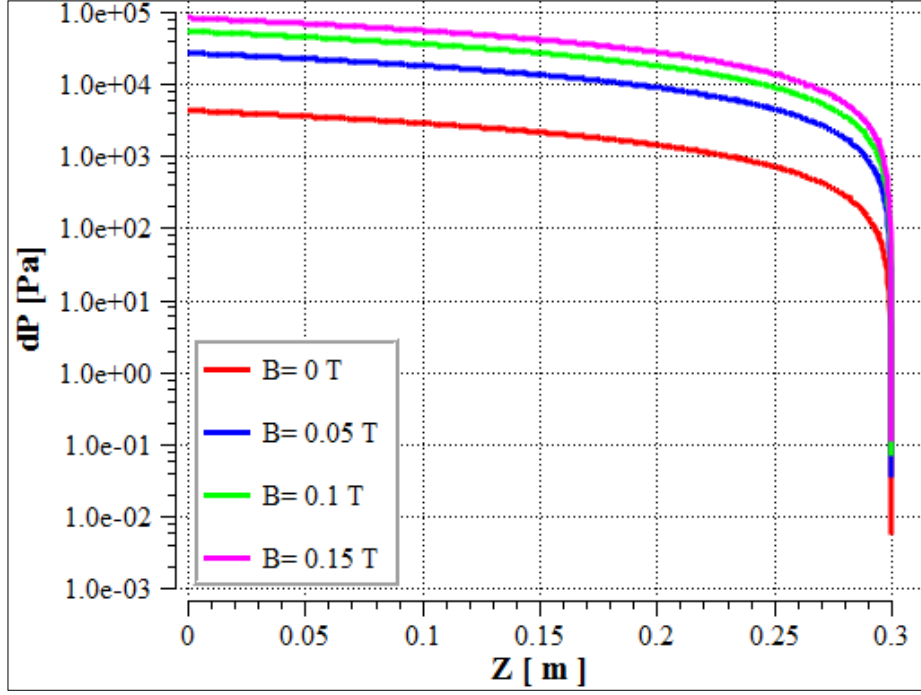
Şekil 5.33. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d:15 mm, Akışkan: A, x=0, y=0, z=0-0.3 m).



Şekil 5.34. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d:15mm, Akışkan: B, x=0, y=0, z=0-0.3 m).

Şekil 5.33'de akışa uygulanan manyetik alanın B=0, 0.05, 0.1 ve 0.15 T değerlerinde boru girişi ve çıkışı arasındaki basınç farkı değerleri sırasıyla 5.845, 54.597, 105.255

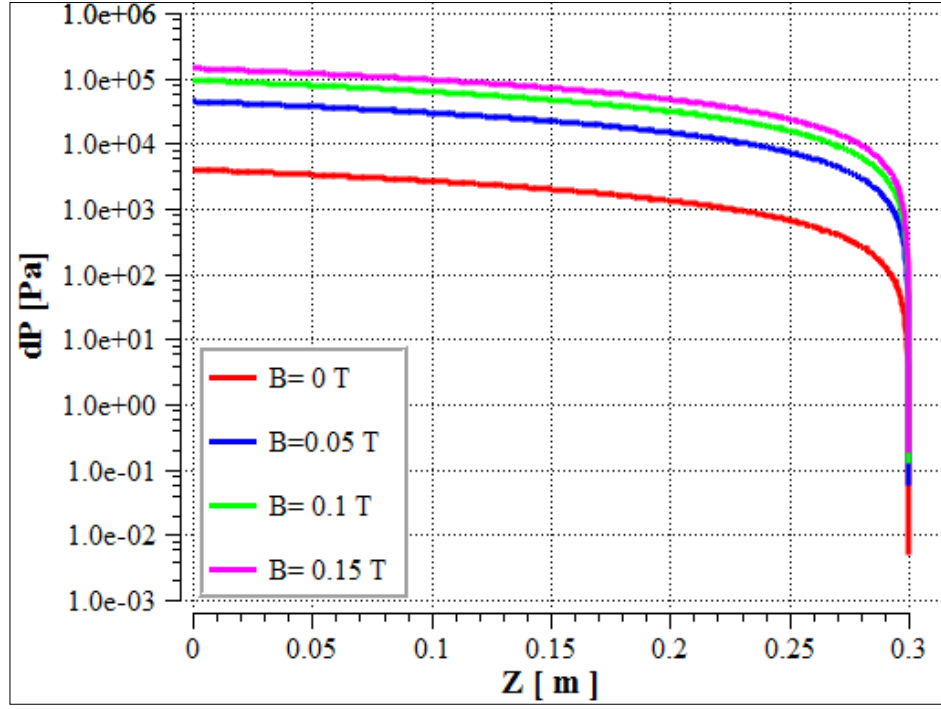
ve 152.394 kPa olmuştur. Şekil 5.34'de bu değerler 5.504, 31.895, 76.297 ve 112.61 kPa olmuştur. Şekil 5.35'de ise 4.313, 24.712, 53.595 ve 82.147 kPa olmuştur. Bu değerler aynı zamanda deneysel basınç değerleri olup verilen bu şekillerde boru boyunca basınç düşüşlerinin uygulanan manyetik alan ile nasıl değiştiğini vurgulamak için verilmiştir.



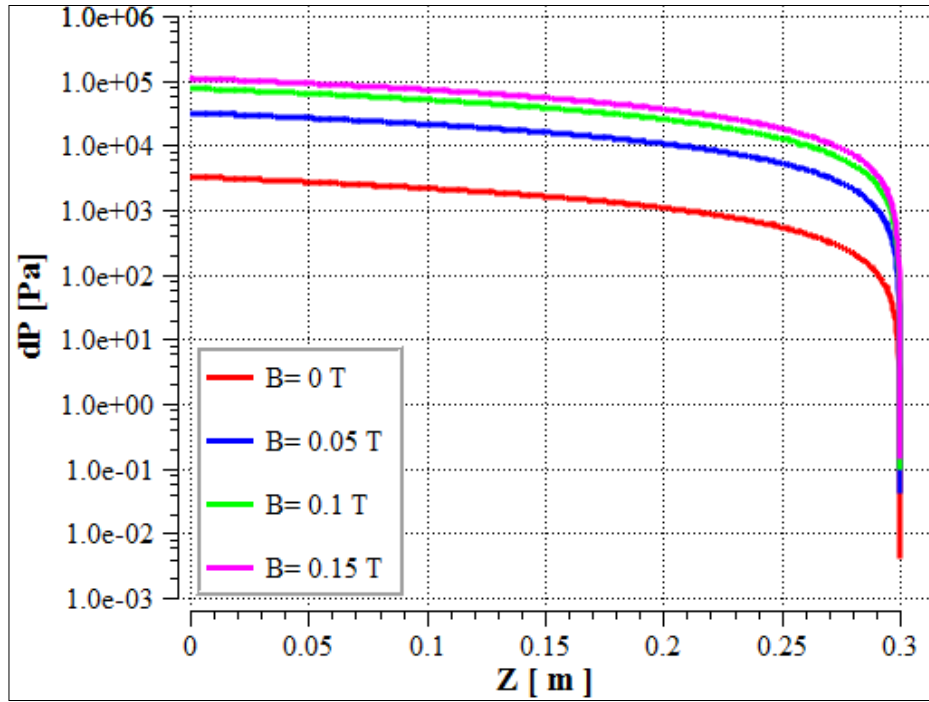
Şekil 5.35. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d:15 mm, Akışkan: C, x=0, y=0, z=0-0.3 m).

Benzer bir biçimde, Şekil 5.36-38'de de A, B ve C akışkanları için 10 mm çapa sahip boruda aksenal yönde meydana gelen basınç düşüşleri verilmiştir. Uygulanan manyetik alan şekillerden de görülebileceği gibi borunun girişi ve çıkışı arasındaki basınç farkını arttırmıştır. Şekil 5.36'da farklı akışa uygulanan manyetik alanın B=0, 0.05, 0.1 ve 0.15 T değerlerinde boru girişi ve çıkışı arasındaki basınç farkı değerleri sırasıyla 4.125, 44.078, 93.067 ve 141.576 kPa olmuştur. Şekil 5.37'de bu değerler 3.44, 31.692, 75.662 ve 108.057 kPa olmuştur. Şekil 5.38'de ise 3.383, 24.133, 52.024 ve 69.341 kPa olmuştur.

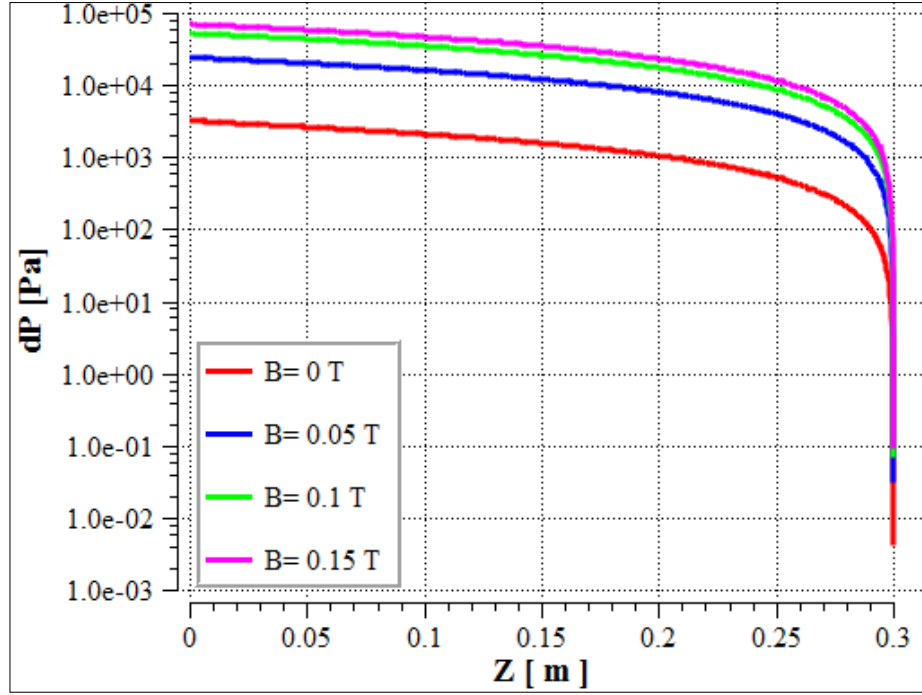




Şekil 5.36. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d:10 mm, Akışkan: A, x=0, y=0, z=0-0.3 m).



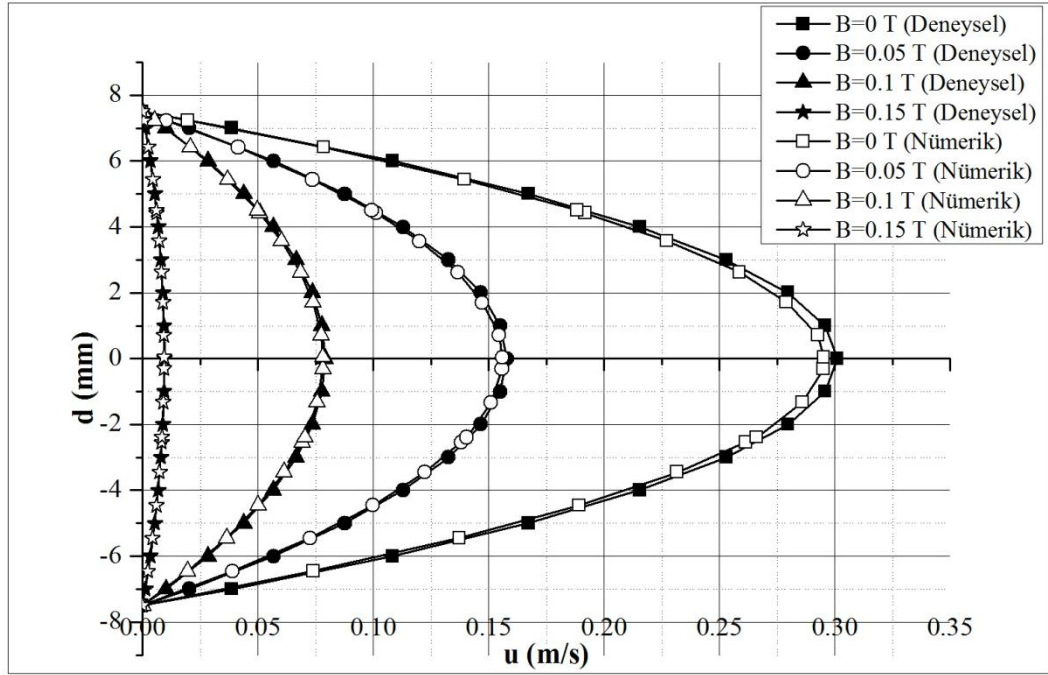
Şekil 5.37. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d:10 mm, Akışkan: B, x=0, y=0, z=0-0.3 m).



Şekil 5.38. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde nümerik basınç düşüşleri (d:10 mm, Akışkan: C, x=0, y=0, z=0-0.3 m).

### 5.3. DENEYSEL VE NÜMERİK ÇÖZÜM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

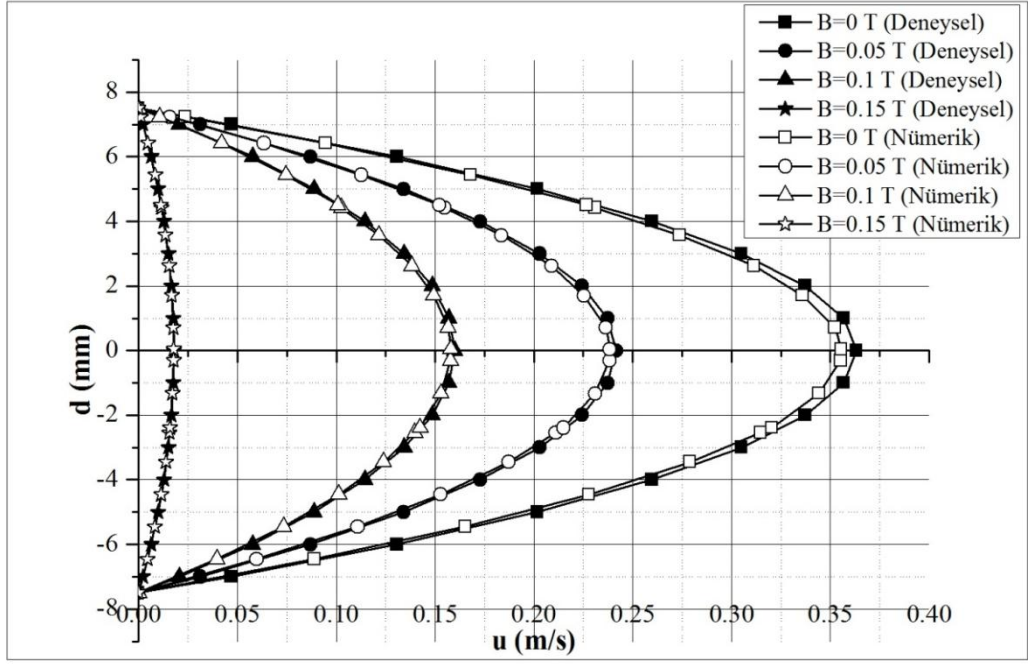
Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların teorik modellemeden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılabilmesi için lisanslı Ansys Fluent 14.0 kodunda nümerik hesaplamalar yapılmıştır. Sonlu hacimler metoduna göre hesaplama yapan HAD programı Fluent kodunda çözümlerin yapılabilmesi için, deney düzeneğinde kullanılan her iki boru geometrisi Gambit programında oluşturularak uygun sayısal ağ (mesh) örme işlemi gerçekleştirilmiş ve çözüm ayarları için Fluent programına aktarılmıştır. Fluent programında akışkanın kararlı, sıkıştırılamaz, laminar boru akışı durumu için çözüm şartları ayarlanmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Deneysel çalışmadan ve nümerik çalışmadan elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için her üç akışkana ait boru çapı boyunca meydana gelen hız değişimleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



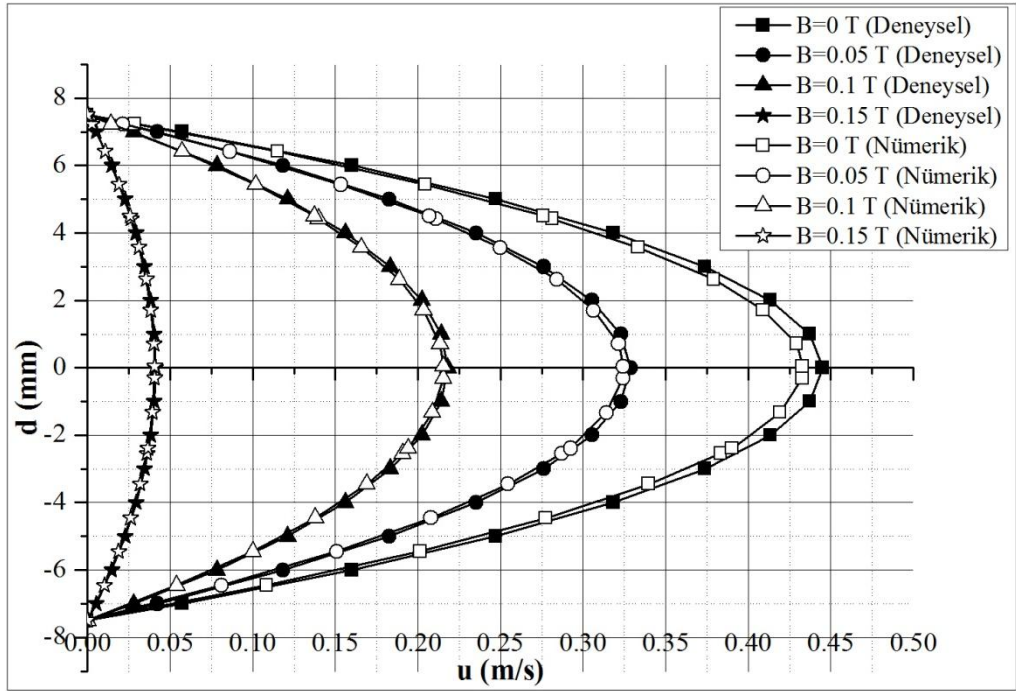
Şekil 5.39. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d:15 mm, Akışkan: A).

Şekil 5.39'de 15 mm'lik boruda A akışkanı için  $B=0$ , 0.05, 0.1 ve 0.15 T değerlerinde deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen çap boyunca hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi boru çapı boyunca  $B=0$  T durumunda deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki fark %1.7,  $B=0.05$  T durumunda %1.25,  $B=0.1$  T durumunda %1.19,  $B=0.15$  T durumunda ise %1.12 olmuştur. Deneysel ve nümerik çalışma arasındaki farklar boru çapı boyunca hesaplanarak ortalaması alınmıştır.

Şekil 5.40'da B akışkanı için  $B=0$ , 0.05, 0.1 ve 0.15 T değerlerinde deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen çap boyunca hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi boru çapı boyunca  $B=0$  T durumunda deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki fark %2.43,  $B=0.05$  T durumunda %1.95,  $B=0.1$  T durumunda %1.56,  $B=0.15$  T durumunda ise %1.41 olmuştur.



Şekil 5.40. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d:15 mm, Akışkan: B).

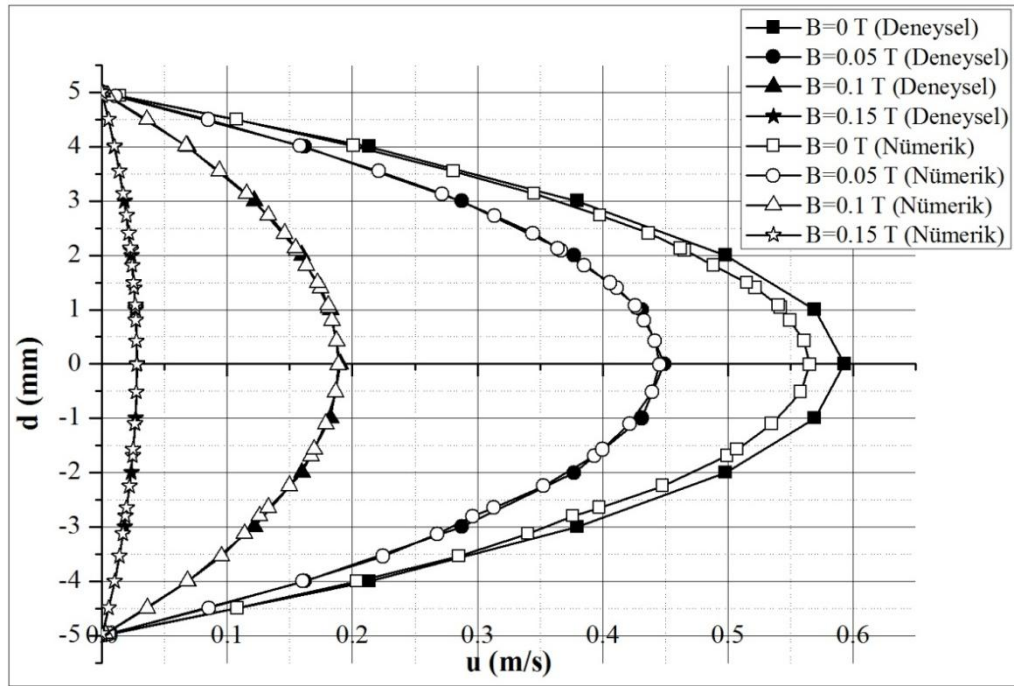


Şekil 5.41. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d:15 mm, Akışkan: C).

Şekil 5.41'de C akışkanı için B=0, 0.05, 0.1 ve 0.15 T değerlerinde deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen çap boyunca hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de

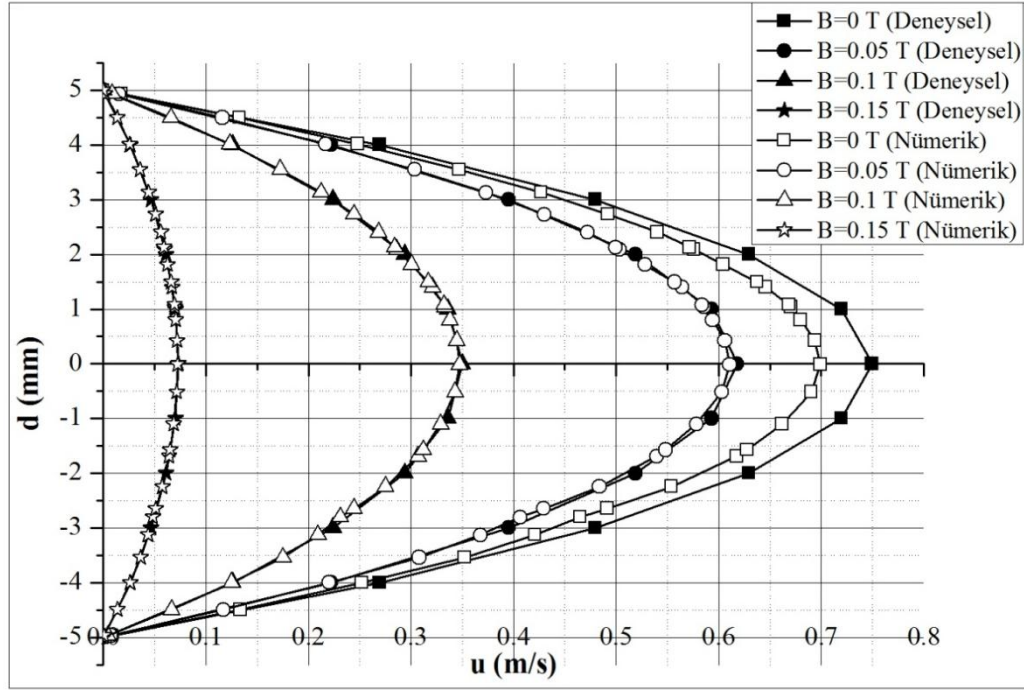
görülebileceği gibi boru çapı boyunca  $B=0$  T durumunda deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki fark %2.82,  $B=0.05$  T durumunda %2.54  $B=0.1$  T durumunda %2.44,  $B=0.15$  T durumunda ise %2.01 olmuştur.

Benzer bir biçimde 10 mm'lik çapa sahip boruda meydana gelen deneysel ve nümerik hız profilleri Şekil 5.42-44'de verilmiştir.



Şekil 5.42. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d:10 mm, Akışkan: A).

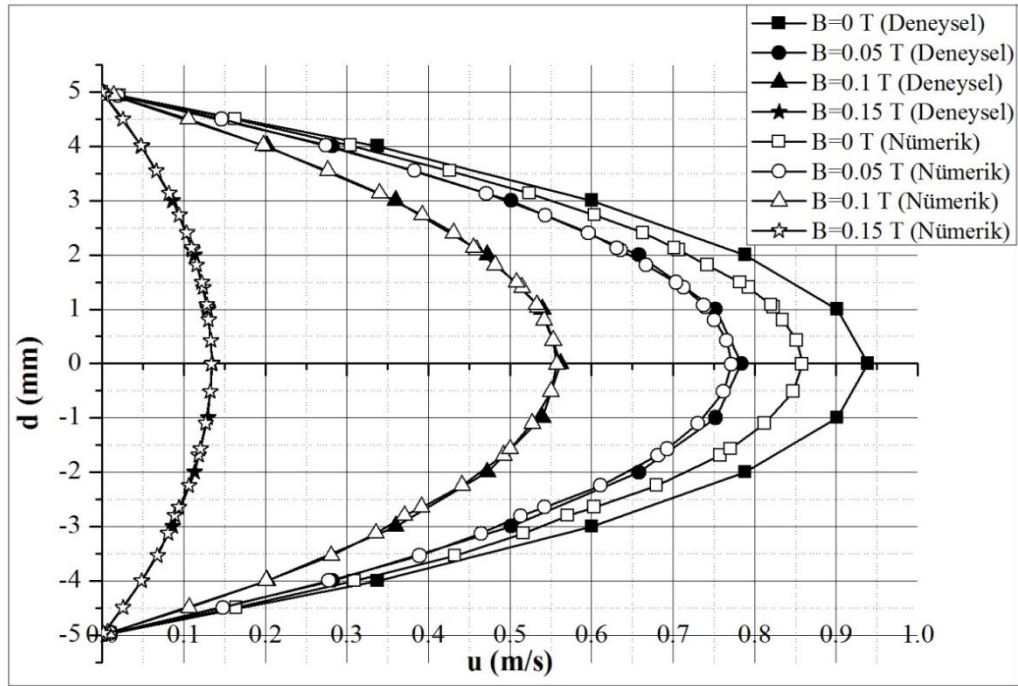
Şekil 5.42'de 10 mm'lik boruda A akışkanı için  $B=0$ , 0.05, 0.1 ve 0.15 T değerlerinde deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen çap boyunca hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi boru çapı boyunca  $B=0$  T durumunda deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki fark %4.46,  $B=0.05$  T durumunda %0.80,  $B=0.1$  T durumunda %0.74,  $B=0.15$  T durumunda ise %0.63 olmuştur.



Şekil 5.43. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d:10 mm, Akışkan:B).

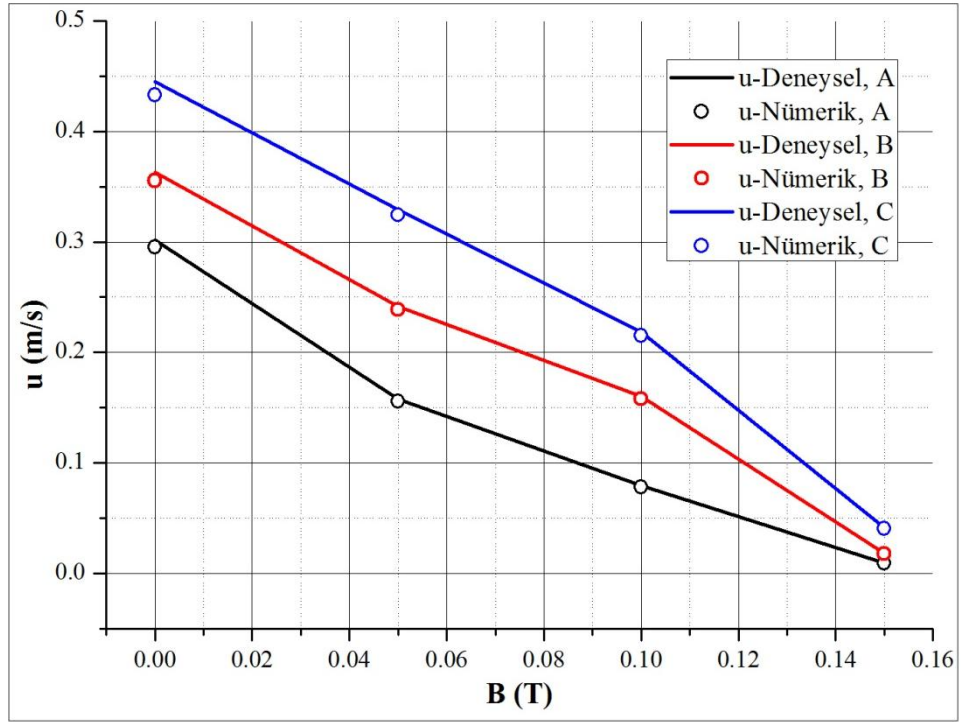
Şekil 5.43'de 10 mm'lik boruda B akışkanı için B=0, 0.05, 0.1 ve 0.15 T değerlerinde deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen çap boyunca hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi boru çapı boyunca B=0 T durumunda deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki fark %6.38, B=0.05 T durumunda %0.93, B=0.1 T durumunda %0.86, B=0.15 T durumunda ise %0.76 olmuştur.

Şekil 5.44'de 10 mm'lik boruda C akışkanı için B=0, 0.05, 0.1 ve 0.15 T değerlerinde deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen çap boyunca hız değişimleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi boru çapı boyunca B=0 T durumunda deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki fark %7.66, B=0.05 T durumunda %1.37, B=0.1 T durumunda %1.06, B=0.15 T durumunda ise %0.88 olmuştur.

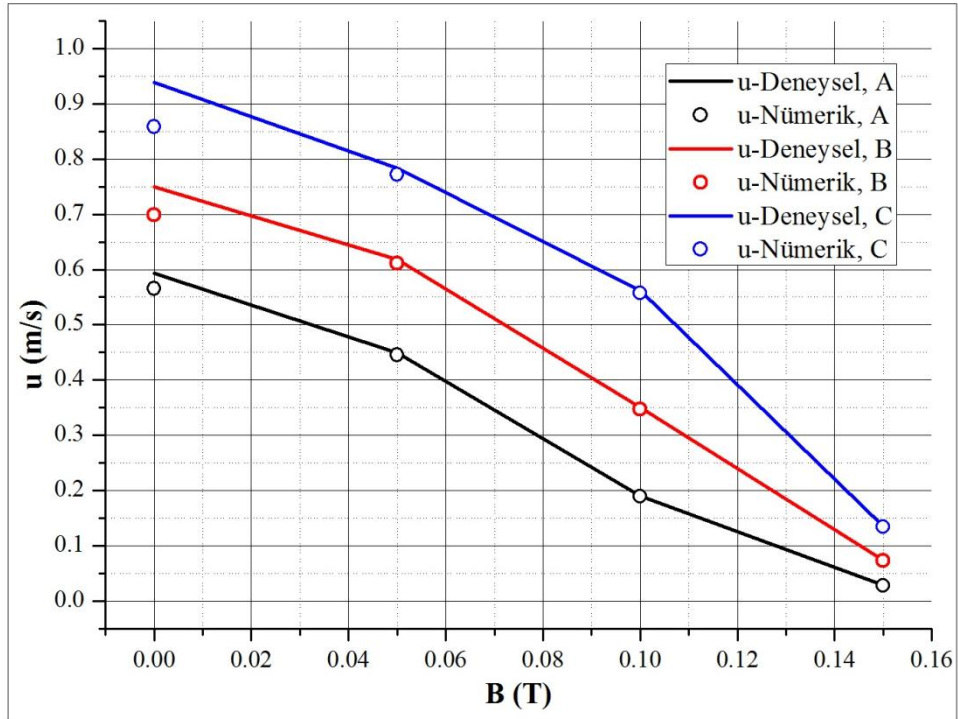


Şekil 5.44. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde deneysel ve nümerik hız profilleri (d:10 mm, Akışkan:C).

Şekillerden de görülebileceği yapılan hesaplamalar neticesinde deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarının manyetik alanın bütün değerlerinde uyum sağladığı görülmektedir. Deneysel ve nümerik çalışma sonuçları arasındaki en büyük fark boru çapının 10 mm olduğu durumda C akışkanı için manyetik alanın B=0 T değerinde meydana gelmiştir. Deneysel ve nümerik çalışma arasındaki farkı daha net görebilmek için her iki boru geometrisinde ve her üç akışkan için manyetik alana bağlı boru çapı boyunca hız değişimlerinin deneysel ve nümerik sonuçları Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da verilmiştir.



Şekil 5.45. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde boru merkezindeki deneysel ve nümerik hız değişimleri (d:15 mm).



Şekil 5.46. Farklı manyetik alan indüksiyonu değerlerinde boru merkezindeki deneysel ve nümerik hız değişimleri (d:10 mm).



## BÖLÜM 6

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sabit manyetik alan altında viskoz, sıkıştırılmaz üç farklı özelliğe sahip manyetik akışkanın (A-B-C) silindirik bir boruda laminer HD ve MHD akışı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneyler manyetik alan değerinin  $B=0$ , 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.12 ve 0.15 T değerlerinde iki farklı boru geometrisinde ve üç farklı akışkan için yapılmıştır. Yapılan her bir deneyde manyetik alanın akış hız değerlerini düşürdüğü ve basınç farklarını arttırdığı tespit edilmiştir. Boru çapının 15 mm olduğu durumda yapılan deneylerde A akışkanı için HD akış modelinde 0.301 m/s olarak bulunan aksel hız değeri, manyetik alanın en büyük değeri  $B=0.15$  T' da MHD akış modelinde %96.87 oranında düşüş göstererek 0.0094 m/s olmuştur. Bu durum B akışkanı için HD akış modelinde 0.363 m/s olurken MHD akış modelinde, %95.06 oranında düşüş göstererek 0.0179 m/s olmuş, C akışkanı için ise HD akış modelinde 0.445 m/s olurken MHD akış modelinde, %90.76 oranında düşüş göstererek 0.0411 m/s olmuştur. Boru çapının 10 mm olduğu durumda A akışkanı için HD akış modelinde 0.593 m/s olarak bulunan aksel hız değeri, manyetik alanın en büyük değeri  $B=0.15$  T' da MHD akış modelinde %95.27 oranında düşüş göstererek 0.028 m/s olmuştur. Bu durum B akışkanı için HD akış modelinde 0.749 m/s olurken MHD akış modelinde, %90.24 oranında düşüş göstererek 0.0731 m/s olmuş, C akışkanı için ise HD akış modelinde 0.938 m/s olurken MHD akış modelinde, %85.6 oranında düşüş göstererek 0.135 m/s olmuştur.

Nümerik hesaplamalar manyetik alan değerinin  $B=0$ , 0.05, 0.1 ve 0.15 T değerlerinde iki farklı boru geometrisi ve üç farklı akışkan için yapılmıştır. Boru çapının 15 mm olduğu durumda yapılan nümerik hesaplamalarda A akışkanı için

manyetik alanın olmadığı HD akış modelinde 0.295 m/s olarak bulunan aksel hız değeri, manyetik alanın en büyük değeri  $B=0.15$  T' da MHD akış modelinde %96.84 oranında düşüş göstererek 0.0093 m/s olmuştur. Bu durum B akışkanı için HD akış modelinde 0.355 m/s olurken MHD akış modelinde, %95.01 oranında düşüş göstererek 0.0177 m/s olmuş, C akışkanı için ise HD akış modelinde 0.432 m/s olurken MHD akış modelinde, %90.6 oranında düşüş göstererek 0.0406 m/s olmuştur. Boru çapının 10 mm olduğu durumda yapılan nümerik hesaplamalarda A akışkanı için manyetik alanın olmadığı HD akış modelinde 0.565 m/s olarak bulunan aksel hız değeri, manyetik alanın en büyük değeri  $B=0.15$  T' da MHD akış modelinde %95.22 oranında düşüş göstererek 0.027 m/s olmuştur. Bu durum B akışkanı için HD akış modelinde 0.699 m/s olurken MHD akış modelinde, %89.69 oranında düşüş göstererek 0.072 m/s olmuş, C akışkanı için ise HD akış modelinde 0.858 m/s olurken MHD akış modelinde, %84.38 oranında düşüş göstererek 0.134 m/s olmuştur.

Deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve bu sonuçlar birbiri ile kıyaslanarak aralarındaki fark yüzdelik oranlar halinde verilmiştir. Bunun için, her iki boru geometrisi ve her üç akışkana ait deneysel ve nümerik çalışma sonuçlarından boru çapı boyunca her bir r boru adımıdaki elde edilen hız değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak her iki çalışma arasındaki farklar hesaplanmıştır. Boru çapının 15 mm olduğu, HD akış durumunda deneysel ve nümerik çalışma arasındaki ortalama fark A, B ve C akışkanları için sırasıyla %1.7, %2.43 ve %2.82 bulunurken MHD akış modelinde ise sırasıyla %1.18, %1.64 ve %2.33 olarak hesaplanmıştır. Benzer bir biçimde, boru çapının 10 mm olduğu, HD akış durumunda deneysel ve nümerik çalışma arasındaki ortalama fark A, B ve C akışkanları için sırasıyla %4.46, %6.38 ve %7.66 bulunurken MHD akış modelinde ise sırasıyla %0.72, %0.85 ve %1.1 olarak hesaplanmıştır.

Yapılan bu çalışma sonucunda akışa dışarıdan uygulanan manyetik alanın akışın viskozitesini arttırdığı ve buna bağlı olarak akış hızlarını düşürdüğü, basınç değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Boru çapının küçülmesi ile akış hız ve debileri artış göstermiştir. Akışkanların yoğunlukları arttıkça manyetik alandan etkilenmeleri daha fazla olmuş dolayısıyla daha fazla hız düşüşlerine neden olmuştur.

Yapılan bu çalışma, manyetiklenebilen akışkanların bilgisayar yardımıyla CFD analizlerinin gerçekleştirilebilmesinde, türbülans modelleri gibi daha karmaşık akış koşullarının simülasyonunda, MHD pompa, jeneratör vb. cihazların tasarımı ve üretiminde, nükleer reaktörlerde soğutma sıvısı olarak kullanılan sıvı-metallerin manyetik alan altındaki davranışlarının incelenmesinde önemli bir bilgi kaynağı olacaktır. Manyetik akışkanların manyetik alan altındaki davranışlarının bilinmesi, köprü ve binaların deprem esnasındaki titreşimleri sönmelenmesinde, otomatik sektörde kavrama, frenleme, kilitleme, süspansiyon uygulamalarında, petrol kuyularında istenmeyen fişkırımlara karşı vana görevi yaparak önlenmesinde, hava-uzay çalışmalarında, demir çelik sanayinde ergimiş metalin dökümünde ve taşınmasında, nükleer santrallerde kullanılan eriyiğin taşınmasında ve nükleer reaktörlerde soğutma uygulamalarında geliştirilecek olan makine alet ve cihazların tasarım ve imalatları konusunda önemli rol oynayacaktır.

Gelecek çalışmalarda farklı boru çapları ve farklı akışkanlar için deneyler ve/veya nümerik çözümler yapılabileceği gibi farklı geometrilere MHD akış indüklenen manyetik alan da dikkate alınarak incelenebilir. Ayrıca manyetik alan yanında elektrik alanın da birlikte akışa olan etkisinin incelenmesi farklı bir çalışmayı ortaya koymasına mümkündür.

## KAYNAKLAR

Abbasbandy, S. and Hayat, T., "Solution of the MHD Falkner–Skan flow by Hankel–Padé method", *Physics Letters A*, 373 (7): 731-734 (2009).

Abbasov, T., Memedov, A. ve Bayramov, B., "İki paralel disk arasındaki Manyetohidrodinamik sıvı akışının incelenmesi" *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi ve Fuarı*, Eskişehir-Türkiye, 1-5 (2007).

Abdelkhalek, M.M., "Heat and mass transfer in MHD free convection from a moving permeable vertical surface by a perturbation technique", *Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14 (5): 2091-2102 (2009).

Asghar, S., Khan, M. and Hayat, T., "Magnetohydrodynamic transient flows of a non-Newtonian fluid", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 40 (5): 589-601 (2005).

Atlı, Z., "Yarı açık çarklı merkezkaç fanların aralık kayıplarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile simülasyonu" Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 30, (2006).

Attia, H.A., Lotfy, A. and Hassan, A., "Effect of Hall current on the unsteady MHD flow due to a rotating disk with uniform suction or injection", *Applied Mathematical Modelling*, 25 (12): 1089-1098 (2001).

Attia, H.A. and Ahmed, M.E.S., "Hall effect on unsteady MHD Couette flow and heat transfer of a Bingham fluid with suction and injection", *Applied Mathematical Modelling*, 28 (12): 1027-1045 (2004).

Attia, H.A., "Hall effect on unsteady couette flow with heat transfer under exponential decaying pressure gradient", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19 (11): 2053-2060 (2005).

Attia, H.A., "Hall effect on the flow of a dusty Bingham Fluid in a circular pipe", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 30 (1): 14-21 (2006).

Attia, H.A., "Hydromagnetic flow and heat transfer above a rotating disk with suction or injection considering Hall effect", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 21 (3): 518-524 (2007).

Balan, C., Broboana, D., Gheorghiu, E. and Vekas, L., "Rheological characterization of complex fluids in electro-magnetic fields", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 154 (1): 22-30 (2008).

Badr, H.M., Habib, M.A., Ben-Mansour, R. and Said, S.A.M., "Numerical investigation of erosion threshold velocity in a pipe with sudden contraction", *Computers & Fluids*, 34 (6): 721-742 (2005).

Chamkha, A.J., "Unsteady laminar hydromagnetic fluid-particle flow and heat transfer in channels and circular pipes", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21 (6): 740-746 (2000).

Chamkha, A.J., "Unsteady MHD convective heat and mass transfer past a semi-infinite vertical permeable moving plate with heat absorption", *International Journal of Engineering Science*, 42 (2): 217-230 (2004).

Chaudhary, R.C. and Jain, A., "Magnetohydrodynamic Transient convection flow past a vertical surface embedded in a porous medium with oscillating temperature", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32 (1): 13-22 (2008).

Chopra, K.P., "Hydromagnetic flow in a circular pipe", *Zeitschrift für Physik*, 162 (1): 46-52 (1961).

Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M., "Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları", Çeviri Editörü: Tahsin Engin, *Güven Bilimsel*, İzmir, 140 (2008).

Dağlı F. ve Kaleli A., "Moody diyagramının iki fazlı akışa uygulanabilirliği", *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 20 (3-4): 37-39 (2000).

Damseh, R.A., Duwiri, H.M. and Odat, M.A., "Similarity analysis of magnetic field and thermal radiation effects on forced convection flow", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 30 (2): 83-89 (2006).

Denghan, M. and Mirzaei, D., "Meshless local Petrov-Galerkin method for the unsteady magnetohydrodynamic flow through pipe with arbitrary wall conductivity", *Applied Numerical Mathematics*, 59 (5): 1043-1058 (2009).

Dritselis, C.D., Sarris, I.E., Fidaros, D.K. and Vlachos, N.S., "Transport and deposition of neutral particles in magnetohydrodynamic turbulent channel flows at low magnetic Reynolds numbers", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32 (2): 365-377 (2011).

Duwairi, H. and Abdullah, M., "Numerical computation of fluid flow in a magnetohydrodynamic micropump", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32 (1): 1-5 (2008).

Frank, M., Barleon, L. and Müller, U., "Visual analysis of two dimensional magnetohydrodynamics", *Physics of Fluids*, 13 (8): 2287-2295 (2001).

Gardner, L.R.T. and Gardner, G.A., "A two-dimensional bi-cubic B-spline finite element used in a study of MHD duct flow", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 124 (4): 365-375 (1995).

Gedik, E., Kurt, H. and Recebli, Z., "Investigation of magnetic field effect on steady laminar two phase fluid flow", *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ-Turkey, 43-45 (2011).

Gedik, E., Kurt, H., Recebli, Z. and Keçebaş A., "Unsteady flow of two-phase fluid in circular pipes under applied external magnetic and electrical fields", *International Journal of Thermal Sciences*, 53: 156-165 (2012a).

Gedik, E., Kurt, H., Recebli, Z. and Balan C., "Two-dimensional CFD simulation of magnetorheological fluid between two fixed parallel plates applied external magnetic field", *Computers & Fluids*, 63: 128-134 (2012b).

Gedik, E., Kurt, H. and Recebli, Z., "Na<sup>22</sup>K<sup>78</sup> liquid-metal magnetohydrodynamic flow in non-conducting circular pipes", *III. International Conference on Nuclear & Renewable Energy Resources*, İstanbul-Turkey, 1-7 (2012c).

Gedik, E., Kurt, H. and Recebli, Z., " CFD simulation of magnetohydrodynamic flow of liquid-metal in circular pipes", *Sixth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications*, İstanbul-Turkey, 1-4 (2012d).

Gedik, E., Kurt, H. and Recebli, Z., " Three-dimensional magnetohydrodynamic flow simulations in circular pipes considered external electrical field", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, submitted to Journal (2012e).

Ghotbi, A.R., "Homotopy analysis method for solving the MHD flow over a non-linear stretching sheet", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14 (6): 2653-2663 (2009).

Grosan, T., Revnic, C., Pop, I. and Ingham, D.B., "Magnetic field and internal heat generation effects on the free convection in a rectangular cavity filled with a porous medium", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (5-6): 1525-1533 (2009).

Grundwall, A. and Olabi, A.G., "Design of magneto-rheological (MR) valve" *Sensors and Actuators A: Physical*, 148 (1): 211-223 (2008).

Gupta, A.S., Guria, M. and Jana, R.N., "Hall effects on the magnetohydrodynamic shear flow past an infinite porous flat plate subjected to uniform suction or blowing", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 46 (8): 1057-1064 (2011).

Hartmann J., "Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field", *Mathematisk Fysiske Meddelelser*, 15 (6): 1-28 (1937).

Hayat, T., Khan, M. and Asghar, S., " Homotopy analysis of MHD flows of an Oldroyd 8 constant fluid" *Acta Mechanica* 168 (3-4): 213-232 (2004).

Hayat, T., Sajid, M. and Ayub, M., "On explicit analytic solution for MHD pipe flow of a fourth grade fluid", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 13 (4): 745-751 (2008).

Hayat, T., Hussain, Q. and Javed, T., "The modified decomposition method and Pade approximants for the MHD flow over a non-linear stretching sheet", *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 10 (2): 966-973 (2009).

Helmy, K.A., "MHD unsteady free convection flow past a vertical porous plate", *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 78 (4): 255-270 (1998).

Helzel, C., Rossmanith, J.A. and Taetz, B., "An unstaggered constrained transport method for the 3D ideal magnetohydrodynamic equations", *Journal of Computational Physics*, 230 (10): 3803-3829 (2011).

Hossain, M.A., Hossain, A. and Wilson, M., "Unsteady flow of viscous incompressible fluid with temperature-dependant viscosity due to a rotating disc in presence of transverse magnetic field and heat transfer", *International Journal of Thermal Sciences*, 40 (1): 11-20 (2001).

Internet: Ansys Fluent14.0 Customer Portal, "FLUENT Magnetohydrodynamics (MHD) Module Manual", <https://www1.ansys.com/customer/default.asp>, (2012).

Internet: Motozawa, M., Kawaguchi, Y., Chang, J. and Sawada, T., "Effect of Magnetic Field on Forced Convective Heat Transfer in Rectangular Duct Flow of Magnetic Fluid" <http://www.istp-22.org/proceedings/proceedings/documents/97.pdf>, (2011).

Keçebaş, A., "Newtonyen olmayan yeni bir akışkan medelinde kararsız akış için sınır tabakası denklemlerinin benzerlik çözümlerinin araştırılması", Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi FenBilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-2 (2011).

Khan, M., Abbas, Z. and Hayat, T., "Analytic solution for flow of Sisko fluid through a porous medium", *Transport in Porous Media*, 71 (1): 23-37 (2008).

Khan, M., Abbas, Q. and Duru, K., "Magnetohydrodynamic flow of a Sisko fluid in annular pipe: A numerical study", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 62 (10): 1169-1180 (2010).

Kharicha, A., Alemany, A. and Bornas, D., "Hydrodynamic study of a rotating MHD flow in a cylindrical cavity by ultrasound Doppler shift method", *International Journal of Engineering Science*, 43 (7): 589-615 (2005).

Kurt, H. and Recebli, Z., "Two-phase steady flow along a horizontal glass pipe in the presence of the magnetic and electrical fields", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29 (1): 263-268 (2008).

Lantzsch, R., Galindo, V., Grants, I., Zhang, C., Patzold, O., Gerbeth, G. and Stelter, M., "Experimental and numerical results on the fluid flow driven by a traveling magnetic field", *Journal of Crystal Growth*, 305 (1): 249-256 (2007).

Li, F.C. and Serizawa, A., "Experimental study on flow characteristics of vertically falling film flow of liquid metal NaK in a transverse magnetic field", *Fusion Engineering and Design*, 70 (2): 185-199 (2004).

Nakaharai, H., Takeuchi, J., Yokomine, T., Kunugi, T., Satake, S., Morley, N.B. and Abdou, M.A., "The influence of a magnetic field on turbulent heat transfer of a high Prandtl number fluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32 (1): 23-28 (2007).

Ni, M.J., Munipalli, R., Morley, N.B., Huang, P. and Abdou, M.A., "Validation case results for 2D and 3D MHD simulations", *Fusion Science And Technology*, 52 (3): 587-594 (2007).

Ni, M.J., Munipalli, R., Morley, N.B., Huang, P. and Abdou, M.A., "A current density conservative scheme for incompressible MHD flows at a low magnetic Reynolds number Part I: On a rectangular collocated grid system", *Journal of Computational Physics*, 227 (1): 174-204 (2007).

Nishiyama, H., Takana, H., Shinohara, K., Mizuki, K., Katagiri, K. and Ohta, M., "Experimental analysis on MR fluid channel flow dynamics with complex fluid-wall interactions", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323 (10): 1293-1297 (2011).

Özcan, S., Evrensel, C.A., Pinsky, M.A. and Fuchs, A., "Dynamic simulation of pressure driven flow of fluids with suspended ferrous particle in a micro channel under magnetic field", *International Journal of Modern Physics B*, 21 (28-29): 4890-4897 (2007).

Öztürk, F., Apaydın, H. ve Walling, D.E., "Sakarya havzasında taşkınlarla taşınan asılı sediment miktarları", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25 (6): 643-650 (2001).

Prasad, K.V., Pal, D. and Datti, P.S., "MHD power-law fluid flow and heat transfer over a non-isothermal stretching sheet", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14 (5): 2178-2189 (2009).

Racabovadiloğlu (Recebli), Z., "Petrol ve gaz kuyularındaki istenmeyen fişkırmaları durdurabilen elektromanyetik bir düzenek yapmak amacı ile manyetik alanın akışkan hareketlerine etkilerinin incelenmesi" Doktora Tezi, *Azerbaycan Petrol Akademisi*, Azerbaycan, 50-55 (1990).

Racabovadiloğlu (Recebli), Z., "Silindirik borularda tek fazlı manyetohidrokinamik akışın teorik ve deneysel olarak incelenmesi", *Teknoloji*, 5 (1-2): 43-48 (2002).



Recebli, Z. and Atik, K., "Sıvı-katı iki fazlı karışımın kararsız hareketlerinin sayısal ve slezkin-targ yöntemleri ile incelenmesi", *Gazi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (4): 661-666 (2006).

Sadeghy, K., Khabazi, N. and Taghavi, S.M., "Magnetohydrodynamic (MHD) flows of viscoelastic fluids in converging/diverging channels", *International Journal of Engineering Science*, 45 (11): 923-938 (2007).

Sarris, I.E., Kakarantzas, S.C., Grecos, A.P. and Vlachos, N.S., "MHD natural convection in a laterally and volumetrically heated square cavity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (16): 3443-3453 (2005).

Sekhar, T.V.S., Sivakumar, R., Kumar, H. and Ravi, T.V.R., "Effect of aligned magnetic field on the steady viscous flow past a circular cylinder", *Applied Mathematical Modelling*, 31 (1): 130-139 (2007).

Sevindir, M.K., "Çapraz akış içerisinde sıcak jet akışın sayısal ve deneysel incelenmesi" Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, , İstanbul, 48 (2007).

Sezgin, M.T. and Aydın, S.H., "Solution of magnetohydrodynamic flow problems using the boundary element method", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 30 (5): 411-418 (2006).

Sezgin, M.T. and Bozkaya, C., "Boundary element method solution of magnetohydrodynamic flow in a rectangular duct with conducting walls parallel to applied magnetic field", *Computational Mechanics*, 41 (6): 769-775 (2008).

Shakeri, F. and Dehghan, M., "A finite volume spectral element method for solving magnetohydrodynamic (MHD) equations", *Applied Numerical Mathematics*, 61 (1): 1-23 (2011).

Shercliff, J.A., "Steady motion of conducting fluids in pipes under transverse fields", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 49 (1): 136-144 (1953).

Singh, B. and Lal, J., "MHD axial flow in a triangular pipe under transverse magnetic field" *Indian Journal of Pure and Applied Mathematics*, 9 (2): 101-115 (1978).

Singh, B. and Lal, J., "Finite element method in MHD channel flow problems", *International Journal For Numerical Method in Engineering*, 18 (7): 1104-1111 (1982).

Singh, B. and Lal, J., " Finite element method for unsteady MHD flow through pipes with arbitrary wall conductivity", *International Journal For Numerical Method in Fluids*, 4 (3): 291-302 (1984).

- Singh, J.R. and Rakesh, S., "MHD three-dimensional couette flow with transpiration cooling", *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 81 (10): 715-720 (2001).
- Tagawa, T., "Numerical simulation of two-phase flows in the presence of a magnetic field", *Mathematics and Computers in Simulation*, 72 (2-6): 212-219 (2006).
- Takeuchi, J., Satake, S., Morley, N.B., Kunugi, T., Yokomine, T. and Abdou, M.A., "Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Filibe simulant fluid in circular pipe", *Fusion Engineering and Design*, 83 (7-9): 1082-1086 (2008).
- Takhar, H.S., Surma, D. and Nath, G., "Flow and heat transfer over an upstream moving wall with a magnetic field and a paralel free stream", *Indian Journal of Pure Applied Mathematics*, 22 (1): 89-98 (1991).
- Takhar, H.S., Chamkha, A.J. and Nath, G., "MHD flow over a moving plate in a rotating fluid with magnetic field, Hall currents and free stream velocity", *International Journal of Engineering Science*, 40 (13): 1511-1527 (2002).
- Takhar, H.S., Chamkha, A.J. and Nath, G., "Flow and heat transfer on a stretching surface in a rotating fluid with a magnetic field", *International Journal of Thermal Sciences*, 42 (1): 23-31 (2003).
- Tezer, M., "Boundary element method solution of MHD flow in a rectangular duct", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 18 (10): 937-952 (1994).
- Türkyilmazoğlu, M., " Unsteady mhd flow with variable viscosity: Applications of spectral scheme" *International Journal of Thermal Sciences*, 49 (3): 563-570 (2010).
- Türkyilmazoğlu, M., "Exact solutions for the incompressible viscous magnetohydrodynamic fluid of a rotating disk flow", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 46 (1): 306-311 (2011).
- Umur, H. "Akışkanlar Mekaniği, 4.Baskı", *Dora Yayınları*, Bursa, 1-2 (2009).
- Viré, A., Krasnov, D., Boeck, T. and Knaepen B., "Modeling and discretization errors in large eddy simulations of hydrodynamic and magnetohydrodynamic channel flows", *Journal of Computational Physics*, 230 (5): 1903-1922 (2011).
- Wan, D. and Turek, S., "An efficient multigrid-FEM method for the simulation of solid-liquid two phase flows", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 203 (2): 561-580 (2007).
- Watanabe T., Pop, I. and Goto, F., "MHD stability of boundary layer flow over a moving flat plate", *Technische Mechanik*, 15 (4): 325-332 (1995).
- Xiang, Y. and Bau, H.H., "Complex magnetohydrodynamic low-Reynolds-number flows", *Physical Review E*, 68 (1): 1-11 (2003).

Xiaomei, Z., Haoyu, L.U., Dajun, X.U. and Guobiao, C.A.I., "Numerical simulation of 2D supersonic magnetohydrodynamic channel and study on Hall effect", *Chinese Journal of Aeronautics*, 24 (2): 136-144 (2011).

Zaloğlu, A. ve Yalçinkaya, G., "Paralel iki levha arasındaki viskoz akışkanın MHD radyal titreşimli akışı", *İTÜ Dergisi, Seri:D Mühendislik*, 2 (5): 53-60 (2003).

Zhang, Q., Zhang, M., Jin, G., Dayou, L. and Shu, C.W., "Modeling, numerical methods, and simulation for particle-fluid two-phase flow problems", *Computers & Mathematics With Applications*, 47 (8-9): 1437-1462 (2004).

**EK AÇIKLAMALAR A.**

**FLUENT KODUNDA MHD MODEL**

```
> /define/models/addon-module
```

```
FLUENT Addon Modules:
```

0. None
  1. MHD Model
  2. Fiber Model
  3. Fuel Cell and Electrolysis Model
  4. SOFC Model with Unresolved Electrolyte
  5. Population Balance Model
  6. Adjoint Solver
  7. Battery Module
- ```
Enter Module Number: [0] 1
```

#### **MHD Model text komutları**

##### **mhd-models/**

Define solver configuration.

##### **enable-mhd?**

Enable/disable MHD model.

##### **mhd-method**

Select MHD method.

##### **boundary-conditions/**

Define MHD boundary conditions

##### **list-zones**

List ANSYS FLUENT zone information.

##### **fluid**

Set fluid zone boundary condition.

##### **solid**

Set solid zone boundary condition.

##### **wall**

Set wall boundary condition.

##### **b0-scale-factor**

Set and apply external magnetic field scale factor.

##### **external-b0-field**

Set and apply external magnetic field data.

##### **initialize-mhd**

Initialize MHD model.

##### **initialize-dpm**

Initialize DPM related MHD variables.

##### **solution-control**

Set MHD solution control parameters.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Engin GEDİK 1981'de Aydın'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Nazilli Anadolu Teknik Lisesi Elektronik Bölümü'nden mezun olduktan sonra 2000 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi (ZKÜ), Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eitimi Bölümü'ne girdi; 2004'de "iyi" derece ile mezun oldu. 2005 yılında ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2007 yılında ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisansını tamamladı ve aynı yıl Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen aynı kurumda görev yapmaktadır. Engin GEDİK evli ve iki çocuk babasıdır.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
KARABÜK

Tel: (370) 433 82 00

Faks: (370) 433 82 04

E-posta: egedik@karabuk.edu.tr