

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



NANO PARÇACIK KATKILI
MANYETOHİDRODİNAMİK AKIŞIN DENEYSEL VE
SAYISAL İNCELENMESİ

Murat ERDEM

Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Programı: Enerji Eğitimi
Danışman: Prof. Dr. Yasin VAROL

NİSAN-2019

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO PARÇACIK KATKILI MANYETOHİDRODİNAMİK AKIŞIN
DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Murat ERDEM
(112119201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Şubat 2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 04 Nisan 2019

Tez Danışman : Prof. Dr. Yasin VAROL

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet ESEN

Prof. Dr. Cengiz YILDIZ

Prof. Dr. Hüsamettin BULUT

Dr. Öğr. Üyesi Doğan Engin ALNAK



NİSAN-2019

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca tecrübeleri ile birlikte beni her konuda yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Yasin VAROL'a teşekkür ederim. Sayısal sonuçların analizi ve hesaplamalarda bana destek olan değerli hocalarım Dr. Müjdat FIRAT'a, Prof. Dr. Fethi KAMIŞLI'ya, Arş. Gör. Erman ÇELİK'e, Prof. Dr. Hüseyin ALTUN'a, ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İlyas BAYINDIR'a teşekkür ederim.

Deney setinin tasarımı ve imalatında gereken teknik desteği veren Elkimak Mühendislik Endüstriyel Tasarım Danışmanlık şirketi müdürü Serhat YOL'a, arkadaşlarım Murat BAYRAK ve Ahmet Can ÇAKIL'a, deney setinin kurulumu esnasında teknik destek veren F.Ü. Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Elektrik ve Enerji Bölümü hocalarına ve bölüm teknisyenlerine teşekkür ederim.

ANSYS-FLUENT MHD modulünün uygulanması konusunda yardımlarını esirgemeyen Hindistan, Mumbai'de bulunan Bhabha Atom Araştırma Merkezinde çalışmakta olan Dr. Pravat Kumar Swain'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamızın finansal kısmı ile ilgili, TEKF.15.01 numaralı projeyle desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje (FÜBAP) koordinasyon birimine şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, bugünlere gelmemde büyük desteği olan değerli abim Erkan ERDEM'e, aileme ve tez çalışmalarım boyunca bana her türlü maddi ve manevi destek veren sevgili eşim Süreyya ERDEM'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Murat ERDEM
ELAZIĞ - 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	3
1.1.1. Manyetik Alan Etkisi Olmayan Nanoakışkanlar ($B = 0$).....	3
1.1.2. MHD Zorlanmış Taşınım	4
1.1.3. Nanoakışkanlarda MHD Zorlanmış Taşınım.....	13
1.1.4. MHD Doğal Taşınım	18
1.1.5. MHD Karma Taşınım	25
2. MATERYAL ve METOT	29
2.1. Manyetik Alan	29
2.2. Manyetik Alanın Üretilmesi	29
2.3. Manyetik Devreler	32
2.4. Histerisis Çevrimi	35
2.5. Zamanla Değişen Manyetik Alanın İndüklediği Gerilim, Faraday Kanunu.....	36
2.6. Elektromanyetik Kuvvet.....	37
2.7. Ferromanyetik Nüvedeki Enerji Kayıpları	39
2.7.1. Histerisis kayıpları	39
2.7.2. Eddy (Girdap) Akımı Kayıpları.....	39
2.8. B-H Eğrisi	41
2.9. Deney Düzeneği.....	42
2.10. Nüve Ölçüleri.....	46
2.11. Nüveye ait sargıların özellikleri.....	48
2.12. Deneyde Kullanılan Ölçüm aletleri	48
2.13. MHD Akış Modeli ve Manyetik İndüksiyon Metodu	52

2.14.	Genel Denklemler ve Nano Akışkan Formülleri	55
2.15.	Akış Hızının Deneysel Olarak Tespiti	58
2.16.	Literatür Doğrulaması (Kod Geçerliliği)	60
2.17.	Sayısal Modelleme, Ağ Yapısının Oluşturulması ve Ağ Kalitesi	64
3.	BULGULAR.....	72
3.1.	Deneysel Sonuçlar ve Sayısal Sonuçların Akışkan Hız karşılaştırmaları.....	72
3.2.	Deneysel Sonuçlar ve Sayısal Sonuçların Akışkan Basınç karşılaştırmaları	72
3.3.	Al ₂ O ₃ , CuO ve TiO ₂ – Su Nano Akışkanlarının Hız Profilleri.....	77
3.4.	Al ₂ O ₃ , CuO ve TiO ₂ – Su Nano Akışkanlarının Merkez Basınç değişimleri	95
3.5.	Al ₂ O ₃ , CuO ve TiO ₂ – Su Nano Akışkanlarının Yerel Nusselt Sayısı (Nu _x) Değişimleri	111
3.6.	Al ₂ O ₃ , CuO ve TiO ₂ – Su Nano Akışkanlarının Ortalama Nusselt Sayısı (Nu)	128
3.7.	Nano Akışkanın akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerinde ΔT etkisi	133
3.8.	Akışkanın Isıtılması ve Soğutulmasının Akış ve Isı Transferi Üzerinde Etkisi	138
3.9.	Kanal Malzeme Yapısının Nano Akış Üzerindeki Etkisi	145
3.10.	Akışkanın Hız ve Sıcaklık Konturları.....	151
3.11.	Kanal Malzeme Yapısının Sıcaklık Konturları Değişimleri.....	156
3.12.	Boyuna Sıcaklık Konturları Üzerinde Re Etkisi.....	160
4.	SONUÇLAR.....	165
5.	ÖNERİLER	168
	KAYNAKLAR	169
	ÖZGEÇMİŞ	182

ÖZET

Bu tez kapsamında, laminar akış şartlarında silindirik bir boru içerisinde ve manyetik alan etkisi altında tek fazlı sıkıştırılamaz, viskoz ve elektriksel iletkenliğe sahip farklı nano akışkanların davranışı deneysel ve üç boyutlu sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, 1 Tesla manyetik alan üretebilen bir deney seti tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ancak şebeke elektriği yüksek akımlarda çalışmaya müsait olmadığından maksimum $B = 0.3T$ ile çalışma gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma, ANSYS FLUENT 18.2 ticari yazılım programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Gerekli doğrulama testleri yapıldıktan sonra sayısal model belirlenmiş ve çalışmanın büyük çoğunluğu sayısal olarak yapılmıştır. Sayısal çalışmadan nano hacimsel oranları (ϕ), Re sayıları ve uygulanan manyetik alan şiddetleri (Ha) sırasıyla $\phi = 0, 0.01, 0.03, 0.05$, $Re = 10, 100, 500, 1000, 2000$ ve $Ha = 0, 25, 50, 100$ olarak seçilmiştir. Nano parçacık olarak Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 tercih edilmiştir.

Deneysel olarak yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar, sayısal çalışmada elde edilen sonuçlar ile kıyaslanarak sayısal modelin doğruluğu test edilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma arasındaki karşılaştırma, %2 nano parçacık içeren akışkana $B = 0.1, 0.2, 0.3T$ manyetik alan uygulayarak ve manyetik alanın olmadığı durum için yapılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda çalışma sonuçları literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların oldukça benzer olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan sayısal analizde nano akışkanların hız, basınç, yerel ve ortalama Nu grafikleri ile sıcaklık ve hız konturları kapsamlı olarak ele alınmıştır. Nano parçacığın ve özellikle uygulanan dış manyetik alan kuvvetinin nano akışkan hızını düşürdüğü, Re sayısı ile birlikte basıncı ve ısı transferini arttırdığı belirlenmiştir. En yüksek nano akışkan hızı, en yüksek basınç ve en yüksek Nu sayısı Al_2O_3 için elde edilmiştir. En düşük akışkan hızı ve basınç ise CuO için elde edilirken ısı transferinin CuO ve TiO_2 için benzerlik göstermiştir. $Re = 10$ hariç bütün parametrelerde manyetik alan şiddeti ve eklenen nano parçacıklar ısı transferini arttırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nano akışkan, MHD, Isı transferi, HAD, Zorlanmış taşınım

SUMMARY

Experimental and Numerical Investigation of Nanoparticles Added Magnetohydrodynamics Flow

In this thesis, the behavior of different nano-fluids with electrical conductivity single-phase incompressible, viscous under laminar flow conditions and magnetic field has been investigated in a cylindrical pipe experimentally and three-dimensional numerically. For this purpose, an experimental set-up which can procedure 1 Tesla magnetic field have been designed and manufactured. However, since the mains power is not suitable for operations at high currents, the operation has been performed with maximum $B = 0.3T$. Numerical study was performed with the help of the licensed ANSYS FLUENT 18.2 commercial software program. After the necessary verification tests, the numerical model was determined and the majority of the study was performed numerically. Nano volume ratios (ϕ), Re numbers and applied magnetic field magnitude for numerical study were selected as $\phi = 0, 0.01, 0.03, 0.05$, $Re = 10, 100, 500, 1000, 2000$ and $Ha = 0, 25, 50, 100$, respectively. Al_2O_3 , CuO and TiO_2 are preferred as nanoparticles.

The accuracy of the numerical model has tested by comparing of obtained datas from the experimental study with the results obtained in the numerical study. The comparison between experimental and numerical study has carried out by applying $B = 0.1, 0.2, 0.3T$ magnetic field to the fluid containing 2% nano-particle and in the absence of magnetic field, and the results have determined to be in compatibility. At the same time the results obtained from the study has been compared with that of given in the literature and results were found to be quite similar.

In the numerical analysis, velocity, pressure, and Nu were depicted in the graphics and temperature velocity contours of nano fluids have been investigated. It has been determined that both the nanoparticle and especially the applied external magnetic field strength decrease the nano-fluid velocity and increase the pressure and heat transfer with the Re number. The highest nano fluid velocity, the highest pressure and the highest Nu number was obtained for Al_2O_3 . While the lowest fluid velocity and pressure are obtained for CuO, the heat transfer is similar for CuO and TiO_2 . In all parameters except $Re = 10$, the magnetic field flux and the add of nano particles have increased the heat transfer rate.

Key words: Nano fluid, MHD, Heat transfer, CFD, Forced convection

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Manyetik akının üretilmesi	30
Şekil 2.2. Elektrik ve manyetik devrelerin karşılaştırılması	33
Şekil 2.3. Bir manyetik devrede mmk kaynağı polaritesinin belirlenmesi	33
Şekil 2.4. Hava aralığındaki manyetik akının saçak etkisi.....	35
Şekil 2.5. (a) Nüveye uygulanan akım (b) histerisis çevrimi	36
Şekil 2.6. Manyetik alan içindeki akım taşıyan bir iletken	38
Şekil 2.7. (a) Blok demir nüvedeki girdap akımları (b) paketli saclardan yapılmış nüvedeki girdap akımları	40
Şekil 2.8. $H < 400$ A/m için $B-H$ eğrileri	41
Şekil 2.9. $H > 400$ A/m için $B-H$ eğrileri	42
Şekil 2.10. Deney seti (1 Depo, 2 Pompa, 3 Valfler, 4-5 Basınç ölçüm yeri, 6 Basınç ölçer, 7 Akışkan taşıyıcı boru, 8 Debimetre, 9 Trafo, 10 nüve, 11 Elektrik panosu).....	43
Şekil 2.11. Deney setinin bazı bölgelerinin yakından çekilmiş resimleri.	44
Şekil 2.12. Deney setinin şematik görünüşleri	45
Şekil 2.13. Nüve ölçüleri.....	46
Şekil 2.14. Nüve köşe uzunlukları ve açıları (Firma verileri)	47
Şekil 2.15. Deneyler esnasında kullanılan ölçü aletleri.....	48
Şekil 2.16. Deneyde kullanılan nano akışkan.....	52
Şekil 2.17. ANSYS FLUENT MHD modeli	55
Şekil 2.18. Ağ çalışması için yerel hızların karşılaştırılması	61
Şekil 2.19. Kanal boyunca Recebli vd. [36] tarafından elde edilen hız değerleri ile mevcut çalışmada elde edilen değerlerin karşılaştırılması.....	62
Şekil 2.20. Kanal boyunca Recebli vd. [36] tarafından elde edilen merkez basınç değerleri ile mevcut çalışmada elde edilen değerleri.....	63
Şekil 2.21. Deneysel veriler ile karşılaştırmak için kullanılan plastik borunun katı modeli	65
Şekil 2.22. Deneysel çalışma ile kıyaslanacak sayısal çalışmanın ağ yapısı	66
Şekil 2.23. Sayısal modelleme için oluşturulan geometri	68
Şekil 2.24. Deneysel ile karşılaştırma dışındaki analizler için oluşturulan ağ yapısı	69

Şekil 3.1. Farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe_3O_4 -su nano akışkan için boru boyunca basınç farkının değişimi	73
Şekil 3.2. Farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe_3O_4 -su nano akışkanına ait sayısal basınç değişimleri.....	74
Şekil 3.3. Farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe_3O_4 -su nano akışkanına ait deneysel ve sayısal basınç değerlerinin karşılaştırmaları	75
Şekil 3.4. Al_2O_3 – su nano akışkanının çeşitli Re değerleri ve nano hacimsel oranlarında manyetik alan kuvvetlerinin boru çapı boyunca akışkan hız profilleri	78
Şekil 3.5. CuO – su nano akışkanının çeşitli Re değerleri ve nano hacimsel oranlarında manyetik alan kuvvetlerinin boru çapı boyunca akışkan hızlarının karşılaştırmaları.....	79
Şekil 3.6. TiO_2 – su nano akışkanının çeşitli Re değerleri ve nano hacimsel oranlarında manyetik alan kuvvetlerinin uygulanması ile boru çapındaki akışkan hız değişimleri.....	81
Şekil 3.7. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırılmaları ($\text{Re} = 10$)	82
Şekil 3.8. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırılmaları ($\text{Re} = 100$)	83
Şekil 3.9. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırılmaları ($\text{Re} = 500$)	85
Şekil 3.10. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırılmaları ($\text{Re} = 1000$)	86
Şekil 3.11. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırılmaları ($\text{Re} = 2000$)	87
Şekil 3.12. Farklı Re sayıları ve Ha sayılarında Al_2O_3 nano akışkanının hacimsel oranlarının kıyaslanması	88
Şekil 3.13. Farklı Re sayıları ve Ha sayılarında CuO nano akışkanının hacimsel oranlarının kıyaslanması	89
Şekil 3.14. Farklı Re sayıları ve Ha sayılarında TiO_2 Nano akışkanının hacimsel oranlarının kıyaslanması	91
Şekil 3.15. Çeşitli hacimsel oran ve manyetik alan kuvvetlerinde Al_2O_3 -su nano akışkanının çap boyunca Re sayısı ile hız değişimleri.....	92
Şekil 3.16. Çeşitli hacimsel oran ve manyetik alan kuvvetlerinde CuO -su nano akışkanının çap ile Re değişimleri	93

Şekil 3.17. Çeşitli hacimsel oran ve manyetik alan kuvvetlerinde TiO_2 -su nano akışkanının çap ile Re değişimleri	94
Şekil 3.18. Çeşitli Re ve nano hacimsel oranlarında Al_2O_3 – su nano akışkanının merkez basınç değerlerinin Ha sayısı ile değişimi	96
Şekil 3.19. Çeşitli Re ve nano hacimsel oranlarında CuO – su nano akışkanının merkez basınç değerlerinin Ha sayısı ile değişimi	97
Şekil 3.20. Çeşitli Re ve nano hacimsel oranlarında TiO_2 – su nano akışkanının merkez basınç değerlerinin Ha sayısı ile değişimi	98
Şekil 3.21. Sabit Re sayısında ($\text{Re} = 10$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri	99
Şekil 3.22. Sabit Re sayısında ($\text{Re} = 100$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri	100
Şekil 3.23. Sabit Re sayısında ($\text{Re} = 500$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri	102
Şekil 3.24. Sabit Re sayısında ($\text{Re} = 1000$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri	103
Şekil 3.25. Sabit Re sayısında ($\text{Re} = 2000$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri	104
Şekil 3.26. Farklı Re sayıları ve manyetik alan kuvvetinde Al_2O_3 - su nano akışkanının hacimsel oranların karşılaştırılması	105
Şekil 3.27. Farklı Re sayıları ve manyetik alan kuvvetinde CuO - su nano akışkanının hacimsel oranların karşılaştırılması	106
Şekil 3.28. Farklı Re sayıları ve manyetik alan kuvvetinde TiO_2 - su nano akışkanının hacimsel oranların karşılaştırılması	107
Şekil 3.29. Al_2O_3 – su nano akışkanı için Re sayısının etkisi	108
Şekil 3.30. CuO – Su nano akışkanı için Re sayısının etkisi	109
Şekil 3.31. TiO_2 – su nano akışkanı için Re sayısının etkisi	110
Şekil 3.32. Al_2O_3 – su nano akışkanının boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayısının Ha sayısı ile değişimi	111
Şekil 3.33. CuO – su nano akışkanının boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayısının Ha sayısı ile değişimi	113
Şekil 3.34. TiO_2 – su nano akışkanının boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayısının Ha sayısı ile değişimi	114

Şekil 3.35. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması (Re = 10)	116
Şekil 3.36. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması (Re = 100)	117
Şekil 3.37. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması (Re = 500)	118
Şekil 3.38. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması (Re = 1000)	120
Şekil 3.39. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması (Re = 2000)	121
Şekil 3.40. Al ₂ O ₃ – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının nano parçacıkla değişimi.....	123
Şekil 3.41. CuO – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının nano parçacıkla değişimi.....	124
Şekil 3.42. TiO ₂ – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının nano parçacıkla değişimi.....	125
Şekil 3.43. Al ₂ O ₃ – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının Re sayısıyla değişimi	126
Şekil 3.44. CuO – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının Re sayısıyla değişimi	127
Şekil 3.45. TiO ₂ – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının Re sayısıyla değişimi	128
Şekil 3.46. Farklı nano parçacık tiplerinin ortalama Nu sayısı üzerinde nano parçacık hacimsel oranı, Re ve Ha etkisi	132
Şekil 3.47. Üç farklı sıcaklık aralığında CuO – su nano akışkanının hız değişimi (Re = 1000)	134
Şekil 3.48. Üç farklı sıcaklıkta CuO – su nano akışkanının basınç değişimleri (Re = 1000)	135
Şekil 3.49. Üç farklı sıcaklıkta CuO – su nano akışkanının sıcaklık değişimleri (Re = 1000)	136
Şekil 3.50. Re = 1000 farklı sıcaklıkların yerel Nu değişimleri	137
Şekil 3.51. Re = 1000’de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtmada hızın etkisi (ΔT = 20).....	139

Şekil 3.52. Re = 1000'de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtmada basıncın etkisi ($\Delta T = 20$)	140
Şekil 3.53. Re = 1000'de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtmada sıcaklık etkisi ($\Delta T = 20$)	142
Şekil 3.54. Re = 1000'de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtmada sıcaklık etkisi ($\Delta T = 20$)	143
Şekil 3.55. V = 0.05m/s, bakır boruda ısıtma soğutma etkisi (Sabit hızda ve termo fiziksel özellikler hem soğutma hem de ısıtma için eşit)	144
Şekil 3.56. Farklı boru malzemesi için CuO – su nano akışkanının hız değişimleri (Re = 1000)	146
Şekil 3.57. Farklı boru malzemesi için CuO – su nano akışkanının basınç değişimleri (Re = 1000)	147
Şekil 3.58. Farklı boru malzemesi için CuO – su nano akışkanının sıcaklık değişimleri (Re = 1000)	149
Şekil 3.59. Farklı boru malzemesi için CuO – su nano akışkanının yerel Nu değişimleri (Re = 1000)	150
Şekil 3.60. CuO için farklı Re sayılarında nano parçacık ve manyetik alan etkisi (Hız konturları).....	152
Şekil 3.61. Farklı nano parçacık tipleri için farklı Re sayılarında nano parçacık ve manyetik alan etkisi (Hız konturları)	153
Şekil 3.62. Farklı malzeme ve sıcaklıktaki boruda değişik Ha sayılarında hız konturlarının karşılaştırılması ($\phi = 0.05$ CuO - Re = 1000)	155
Şekil 3.63. Farklı boru malzemesi ile ısıtma ve soğutma altındaki akışkanın sıcaklık konturlarının değişimi	157
Şekil 3.64. Saf su ve nano akışkanda Ha sayısının etkisinin kıyaslanması (Re = 10)	158
Şekil 3.65. Saf su ve nano akışkanda Ha sayısının etkisinin kıyaslanması (Re = 2000) ..	159
Şekil 3.66. Farklı Re sayıları ve nano hacimsel oranında boyuna sıcaklık konturları (Ha = 0)	161
Şekil 3.67. Farklı Re sayıları ve nano hacimsel oranında boyuna sıcaklık konturları (Ha = 100)	162
Şekil 3.68. CuO – su nano akışkanının bakır ve plastik boru arasındaki sıcaklık konturları (Re = 1000) Isıtma altında.....	163

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Nüve ölçüleri ve referans aralıkları	47
Tablo 2.2. Nüveye ait sargıların fiziksel özellikleri ve elektrik değerleri	48
Tablo 2.3. Deneysel verilerle karşılaştırmak için oluşturulan modelin ağ yapısı bilgileri .	68
Tablo 2.4. Deneysel karşılaştırma dışında oluşturulan ağ yapısının verileri	71
Tablo 3.1. Sıvısal ve deneysel olarak tespit edilen ortalama akışkan hızları ve fark değerleri.....	72
Tablo 3.2. Temel akış ve nano parçacıkların elektrik ve termo-fiziksel özellikleri	77
Tablo 3.3. $Re = 10$ için Al_2O_3 nano akışkanının Nu değerleri.....	129
Tablo 3.4. $Re = 100$ için Al_2O_3 nano akışkanının Nu değerleri.....	129
Tablo 3.5. $Re = 500$ için Al_2O_3 nano akışkanının Nu değerleri.....	129
Tablo 3.6. $Re = 1000$ için Al_2O_3 nano akışkanının Nu değerleri.....	129
Tablo 3.7. $Re = 2000$ için Al_2O_3 nano akışkanının Nu değerleri.....	129
Tablo 3.8. $Re = 10$ için CuO nano akışkanının Nu değerleri.....	130
Tablo 3.9. $Re = 100$ için CuO nano akışkanının Nu değerleri.....	130
Tablo 3.10. $Re = 500$ için CuO nano akışkanının Nu değerleri.....	130
Tablo 3.11. $Re = 1000$ için CuO nano akışkanının Nu değerleri.....	130
Tablo 3.12. $Re = 2000$ için CuO nano akışkanının Nu değerleri.....	130
Tablo 3.13. $Re = 10$ için TiO_2 nano akışkanının Nu değerleri	131
Tablo 3.14. $Re = 100$ için TiO_2 nano akışkanının Nu değerleri	131
Tablo 3.15. $Re = 500$ için TiO_2 nano akışkanının Nu değerleri	131
Tablo 3.16. $Re = 1000$ için TiO_2 nano akışkanının Nu değerleri	131
Tablo 3.17. $Re = 2000$ için TiO_2 nano akışkanının Nu değerleri	131

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Alan (m^2)
B_0	: Uygulanan dış manyetik alan indüksiyonu (T)
B	: Manyetik alan indüksiyon vektörü
B	: İndüklenen alan (T)
c	: Boşluğun elektriksel iletkenliği (S/m)
c_p	: Özgül ısı (J/kgK)
d	: Boru çapı (m)
D	: Türev operatörü
diV	: Diverjans operatörü
E_0	: Elektriksel alan şiddeti
E_t	: Enerji toplamı
E	: Elektrik alan şiddeti
f	: Sıvı akışkan
F_{EM}	: Elektromanyetik kuvvet
F_{net}	: Net kuvvet
$GaInSn$	: Galinstan sıvı metali
$grad$	: Gradyan operatörü
Ha	: Hartmann sayısı
I	: Birim tensör
J	: Elektrik akım yoğunluğu
k	: Termal iletkenlik katsayısı (W/m.K)
L	: Kanal uzunluğu (m)
Li_2BeFe_4	: Flibe akışkanı
m	: Kütle (kg)
$\dot{m}$	: Kütlesel debi (kg/s)
nf	: Nano akışkan
NaK	: Sodyum potasyum akışkanı
Nu	: Ortalama nusselt sayısı
Nu_x	: Yerel Nusselt sayısı

n	: İç cidardan kanalın içine olan mesafe (m)
P	: Basınç vektörü
p^*	: Yük yoğunluğu
Pr	: Prandtl sayısı
s	: Katı madde
Q	: Isı (W)
q	: Isı akısı (W/m^2)
R	: Yarıçap (m)
Re	: Reynolds sayısı
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_i	: Giriş sıcaklığı
T_w	: Cidar sıcaklığı
U_{max}	: Maksimum hız (m/s)
U_{ort}	: Ortalama hız (m/s)
u	: x yönündeki hız bileşeni (m/s)
v	: y yönündeki hız bileşeni (m/s)
w	: z yönündeki hız bileşeni (m/s)
x, y, z	: Konum koordinatları
V, v	: Hız (m/s)
v_r	: Radyal yöndeki hız bileşeni (m/s)
v_{θ}	: Açısal yöndeki hız vektörü (m/s)
v_z	: Eksenel yöndeki hız vektörü (m/s)
ϕ	: Nano akışkan hacimsel oranı
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
μ	: Dinamik viskozite (Pa.s)
μ_r	: Bağıl geçirgenlik
μ_0	: Manyetik geçirgenlik (H/m)
σ	: Elektriksel iletkenlik (S/m)
Δ	: Laplasyen

1. GİRİŞ

Akışkanlar mekaniği, hareket halinde olan (akışkanlar dinamiği) ya da duran (akışkanların statikliği) akışkanları ve bu akışkanların, katı yüzeylere ya da diğer akışkanlarla ara yüzey şeklinde olan sınırlara etkilerini incelemektedir. Solunum, kan akışı, yüzme, pompalar, vantilatörler, türbinler, uçaklar, gemiler nehirler, rüzgar türbinleri, borular, füzeler, buzdağları, motorlar, filtreler, jetler, su fişkırtma sistemleri vb. gibi gazlar ve sıvılarla ilgili mühendislik uygulamaları akışkanlar mekaniğinin uğraşı alanına girmektedir. Biraz düşünüldüğünde yeryüzündeki her şey ya akışkandır ya da akışkanın içinde veya yakınında hareket halindedir [1]. Akışkanlar mekaniği Fizik kurallarının geçerli olduğu mekaniğin bir alt konusu olarak, problemlerin teorik ve deneysel olarak birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Çünkü sayısal olarak çözülen akışkanlar mekaniği problemlerinde her zaman doğru sonuçlar elde edilmeyebilir. Bundan dolayı sayısal çalışmalarda, ağ sayısının doğru belirlenmesi ve diğer fiziksel özelliklerle birlikte elde edilen sonuçların doğruluğu ancak yapılan deneysel sonuçlarla uyumlu olması ile doğru bir şekilde belirlenebilmektedir.

Su, yağlar ve etilen glikol gibi çok düşük termal iletkenliğe sahip temel akışkanlara, ısı iletkenliği bu temel akışkanlara göre oldukça yüksek olan CuO , Al_2O_3 , TiO_2 , Cu , SiO_2 , Al , Ag , Altın ve Cu gibi nano parçacıkların eklenmesiyle elde edilen akışkanlar nano-akışkan olarak tanımlanmaktadır. Ya da yüksek ısı iletkenli nano parçacıkların termal iletkenliği düşük olan temel akışkanlara süspansiyonu olarak tanımlanmaktadır. Nano akışkanlar oluşturulurken en önemli problemlerden bir tanesi nano parçacıkların akışkan içinde askıda kalmadan dibe çökmesi yani topaklaşmasıdır. Bunun önüne geçilebilmesi için temel akışkana ilave olarak etil alkol vb. maddeler eklenmektedir. Bu sayede nano parçacıkların daha uzun sürede askıda kalması sağlanmaktadır. Nano parçacıkların askıda kalmasının sağlanması ile akışkanının homojen karışması amaçlanmaktadır. Bu durum deneysel çalışmalarda, ısı transferi ve akış analizleri için doğru sonucun elde edilmesinde oldukça önemlidir. Nano akışkan terimini, nano-parçacıkların askıya alındığı sıvıları ifade etmek için kullanan ilk kişi Choi [2], olarak literatür kayıtlarına geçmiştir.

Manyetohidrodinamik (MHD), manyetik alan kuvvetinin etkisi altında elektriksel iletkenliği olan akışkanların davranışını inceleyen disiplinler arası bir konudur. Madencilik, kimya, tarım, gıda teknolojileri, petrol endüstrisi, polimer teknolojisi ve MHD

güç üretimi, MHD pompaları, lüle, aerodinamik ısıtma, elektrostatik düşme (çökelme), ham petrol arıtılması ile sıvı damlacık spreyi gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Motor yağındaki aşındırıcı zerrecikler, karmaşık sıvı akışlar, yanma, atık su, petrol taşımacılığındaki katı/sıvı akışın uygulaması literatürde yer bulan diğer uygulamalardır. Son zamanlarda literatürde nano akışkana dış manyetik alan uygulanması ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu konu ile ilgili ilk çalışmanın Hartmann [3] tarafından yapıldığı görülmektedir. Hartmann, manyetik alan altında iki paralel plaka arasındaki viskoz sıkıştırılmaz ve elektriksel iletkenliğe sahip olan akışkanın davranışını incelemiştir.

Hartmann'dan sonra birçok araştırmacı, manyetik alan altında elektriksel iletkenliğe sahip veya manyetikleşebilen akışkanlar üzerinde farklı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaların birçok farklı amaç için kullanıldığı anlaşılmaktadır. M'hamed vd. [4], nano parçacık kullanarak temel akışkanın termal iletkenliğini arttırıldığı ve nanoakışkana uygulanan dış manyetik alan kuvvetinin temel hedefinin, nanoakışkanın akış karakteristiklerinin kontrol etmek olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, dış manyetik alan ile birlikte tümör kenarına ilacın yanında yüklenen nanoparçacıkların ilacın istenen noktaya ulaşması için kullanıldığı açıklanmıştır.

Manyetohidrodinamik sıvılar ayrıca, füzyon reaktörlerinin tasarımı ve geliştirilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Literatürde, bu amaçla kullanılan bazı sıvılar nükleer reaktörlerin soğutulması ve ısı transferinin iyileştirilmesi için kullanıldığı görülmektedir. Genellikle soğutucu akışkan olarak lityum ve sıvı metal helyum gazı gibi metaller nükleer reaktörlerin soğutulması için kullanılmıştır. Çünkü füzyon reaktörleri, nötron yükünün yanı sıra plazmadan yüksek ısı yüklerine maruz kalmaktadır. Bu reaktörlerde kullanılan soğutucular genellikle trityum üretimi için kullanılan Lityum, Flibe (Li_2BeF_4), Kurşun-Lityum (Pb-Li) sıvı metali ve Bi-Sn ötektik alaşımıyla oluşturulan sıvı metallerdir. Aynı şekilde Fe_3O_4 gibi ferro-fluid olarak bilinen manyetik nanoakışkanlar ve ferrofluid'ten farklı olan magnetorheological (MR) akışkanlarda literatürde çalışma sıvısı olarak yer bulan diğer akışkanlardır. Literatürden ferro-fluidler her koşulda akışkan özelliğini korurken, MR akışkanların yüksek manyetik alan altında katılaştığı görülmektedir.

MHD soğutma ve ısıtma sistemlerinde, geometrinin şekli ve boyutu, farklı akışkanlar, farklı sıcaklık girişleri, farklı manyetik ve elektrik alan kuvveti büyüklüğü, akışkanın laminar ya da türbülanslı olması, akışkan hareketi, ısı transferi üzerinde oldukça

etkilidir. Bunun yanında nano parçacık katkısının miktarı ve büyüklüğü de ısı transferi ve akışkan karakteristikleri üzerinde çok etkili olduğu bilinmektedir.

1.1. Literatür Taraması

Dairesel boru veya herhangi bir kanalda zorlanmış taşınım olayı, birçok mühendislik uygulaması için en önemli araştırma konularından bir tanesidir. Araştırmacılar saf akışkanlar veya çeşitli nano akışkanlar kullanarak ısı transferi ve akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Bunlarla ilgili yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

1.1.1. Manyetik Alan Etkisi Olmayan Nanoakışkanlar ($B = 0$)

Literatür araştırmasının bu kısmında herhangi bir manyetik alan etkisi olmadan, çeşitli nanoakışkanların ısı transferi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırmacılar saf akışkana nano parçacıklar ekleyerek akışkanı kontrol etme yoluna gitmişlerdir. Nano parçacıkların eklenmesiyle oluşan farklı nano akışkanların birbirinden farklı özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Birbirinden farklı nano akışkanlar kullanılarak yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Salman vd. [5], sabit ısı akısına maruz olan iki boyutlu bir mikro kanalda dört farklı nano akışkan için sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada temel akışkan olarak etilen glikol seçilmiş iken nano parçacık olarak Al_2O_3 , ZnO , CuO ve SiO_2 tercih edilmiştir. Temel akışkana % 1 ve % 4 oranında nano parçacık eklenmiştir. Çalışma kontrol hacim yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Nu sayısı, akışkan hızları, kayma gerilmesi, basınç, nano parçacık büyüklüğü, Re ve Nu sayısı gibi parametreler analiz edilmiştir. Newtonsal, sıkıştırılamaz laminar akış, radyasyon etkileri ihmal, küresel nano parçacık şekli küresel kabul edilip tek fazlı akış modeli ile problem çözülmüştür. En yüksek Re sayısı, en yüksek hız, en yüksek Nu sayısı ve en yüksek basınç düşümü SiO_2 için elde edilmiştir. Ayrıca nano tiplerinin sürtünme faktörü üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığını ve Nu sayısının, nano parçacık çapının büyümesi ile azaldığını belirtmişlerdir.

Kimouche vd. [6] yaptıkları sayısal çalışmada, silindirik ani genişlemeli bir kanalda türbülans altında su ve dört farklı nano akışkan ($Ag-su$, $Cu-su$, $CuO-su$ ve Al_2O_3-su) için nano parçacık hacim oranı, ısı transferi ve sürtünme katsayısını analiz etmişlerdir. Yönetici denklemleri çözmek için sonlu hacim tekniğini kullanmışlardır. Nano parçacık oranı ve Re

sayısının artmasının ısı transferini iyileştirdiğini ve en büyük Nu sayısının Al_2O_3 -su nano akışkanı için elde edildiğini açıklamışlardır.

Hemmat Esfe vd. [7], türbülans akışı altında dairesel bir boruda MgO-su nanoakışkanın termal iletkenliği, viskozite ve taşınım ısı transferi performansı üzerinde deneysel bir çalışma icra etmişlerdir. Deney seti, akışkanı pompa aracılığıyla test bölgesine taşıyan kapalı bir sistemden oluşmaktadır. Deneyler, tamamen gelişmiş türbülans rejimi içinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, deneylerde temel akışkana nano parçacık katmasının ısı transferini dikkate değer bir şekilde artırdığını ve nano akışkanın basınç düşümünün temel akışkanınkinden daha büyük olduğunu hesaplamışlardır. Ayrıca yazarlar, en yüksek termal iletkenliğin en yüksek nano yoğunluğunun olduğu akışkan için elde edildiğini göstermişlerdir.

1.1.2. MHD Zorlanmış Taşınım

Bu bölümde taranan çalışmaların tamamı manyetik alan etkisi altındadır. Manyetik alan genel olarak kanallara dıştan uygulanmıştır. 1937’de ilk kez Hartmann [3] tarafından uygulanan manyetik alan şiddeti, günümüzde hala ısı transferi, basınç düşümü vb. gibi birçok problem için uygulama alanı bulan araştırma konularının başında gelmektedir. Konuyla bağlantılı çeşitli akışkan tiplerini kapsayan bazı zorlanmış taşınım problemleri aşağıda sıralanmıştır.

Öncelikle lityum, flibe ve nano parçacık katkısı olmayan çeşitli MHD akışkan tiplerinin (daha çok laminar) zorlanmış taşınımını içermektedir. Hız, sıcaklık, basınç dağılımları ve Nu sayısının manyetik alan kuvveti ile olan değişimleri içeren bazı araştırmalar aşağıda sunulmuştur.

Öztürk [8], sabit ısı akısına maruz iki paralel plaka arasından, elektriksel iletkenliği olan bir viskoz akışkanın daimi, tam gelişmiş laminar ve bu akışa dik manyetik alanın varlığında ısı transferini analitik olarak incelemiştir. Knudsen sayısı, Bringman sayısı ve Hartmann sayısının hız, sıcaklık dağılımı ve ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ha sayısının artmasıyla hız profilleri düşerken, Nu sayının arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca, Knudsen sayısı arttıkça, kanal duvarındaki sıcaklık atlamalarından dolayı Nu sayısının azaldığını tespit etmiştir.

Lu vd. [9], Laminer ve türbülanslı akışlar için bir silindirik elektromanyetik akış ölçerin üç boyutlu MHD ile ilgili bazı simülasyonlarını FLUENT kodu MHD modülünü kullanarak oluşturmuşlardır. Her iki akış türü için hız profilleri, elektrik alan, akım yoğunluğu ve bağlantı kablosu elektrotları boyunca elektrik potansiyeli verilerini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, elektrotlar üzerinde hesaplanan elektrik potansiyeli farkının küçük Ha sayısı durumları için analitik değerlerle uyumlu olduğu, ayrıca, türbülanslı akışın karşıt-kesitli akış ölçerdeki elektrik potansiyeli dağılımının laminer akışinkinden daha üniform olduğunu savunmuşlardır.

Kiyasatfar ve Pourmahmoud [10] tarafından, dıştan üniform manyetik alana maruz bırakılan kare mikro bir kanalda, elektriksel iletkenliğe sahip nivtonsal olmayan sürekli, tamamen gelişmiş laminer akış ve ısı transferi karakteristikleri sonlu fark yaklaşımı Değiştirilmiş Güç-Yasası modelini (Modified Power-Law) kullanılarak incelenmiştir. Hız alanının uygulanan manyetik alandan güçlü bir şekilde etkilendiği ve Nu sayısının Joule ısıtma parametresinin artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir.

Sun vd. [11], iletkenliği olan bir akışkan içerisinde, belirli bir mesafede kendileri de iletken olan iki parçacığın çok güçlü bir manyetik alan (10 Tesla) altında, parçacıklar arası etkileşim ile katı-sıvı etkileşimini incelemek için nümerik bir model geliştirmişlerdir. Modeli sonlu hacim metoduna dayanan ticari paket programı ANSYS-FLUENT ile oluşturmuşlardır. Çalışmada, Re sayısı, parçacıklar arası mesafe ve manyetik akı yoğunluğu incelenmiştir. Tek bir küresel parçacığın sürüklenme kuvvetinin sürüklenen bir akış sınırında yaklaşık %15 kadar arttırılabileceği ve indüklenen manyeto-hidrokinamik etkileşim kuvvetinin akış alanı ve manyetik akı yoğunluğuna büyük ölçüde bağlı olduğunu savunmuşlardır.

Nayak vd. [12], sıcaklığa bağlı viskozite ile tel kaplama analizi için üçüncü derece bir sıvının ısı transferi ve sürekli MHD akışı nümerik ve analitik olarak çalışmışlardır. Yönetici denklemleri çözmek için nümerik çalışmada Runge-Kutta metodunu kullanılmıştır. Problem sabit viskozite durumu, Reynolds modeli ve Vogel's modeli için çözülmüştür. Manyetik alan uygulanmaksızın büyük Br sayılarının sıcaklık dağılımı arttırdığı, sabit viskozite durumunda artan manyetik alanın akışkan hızını azalttığı (hâlbuki üçüncü derece akışlarda artan manyetik alan hızı arttırmaktadır) görülmüştür. Reynolds modelinde ise, akışkanın newtonsal olmayan özelliği sıcaklığa bağlı değişebilen viskozite ile birlikte hızı arttırmak için uygun bir parametre olduğu gözlemlenmiştir.

Muthuraj ve Srinivas [13], içinde poroz madde bulunan asimetrik dalgalı bir kanalda, MHD titrşimli akışın hareketini analitik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerinde geometrik parametreler, poroz ortam şekil faktörü, Ha sayısı, Pe sayısı ve radyasyonun etkisi incelenmiştir. Akış hızının radyasyon parametresi, Gr ve Pecklet (Pe) sayısındaki artışla artarken, Ha sayısının artmasıyla azaldığını, ayrıca sıcaklığın radyasyon parametresi ile doğru orantılı bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir.

Satyamurthy vd. [14], paralel kanallarda 1 Teslalık manyetik alan altında NaK'nin MHD analizini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal çalışma FULENT'in MHD modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana sonuçları, basınç düşümü, akış hızı ve hız dağılımlarını içermektedir. Deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen verilen birbirleriyle uyumlu olduğu ve sayısal sonuçlardaki sapmanın deneysel sonuçlara göre çok daha az olduğunu vurgulamışlardır.

Anwar Béğ vd. [15] tarafından, darcian gözenekli bir ortama sahip iki paralel plaka arasında (dönen bir kanal içeren) viskoz, sıkıştırılmaz manyetohidrodinamik bir akış için nümerik bir çözüm geliştirilmiştir. Boyutsuz adi diferansiyel denklemler güçlü bir nümerik yöntem kullanılarak çözülmüş ve elde edilen veriler literatürde bulunan başka verilerle kıyaslanmıştır. Birincil ve ikincil hız alanı üzerinde Ha sayısı, rotasyon parametresi, Ekman (Ek) sayısı, duvar akım parametresi, Darcy (Da) geçirgenlik parametresi, basınç gradyanı ve manyetik alanın yön etkisi için elde edilen sonuçlar grafik olarak sunulmuştur. Da değeri ve basınç gradyanının artmasıyla hem birincil hem de ikincil hız alanının arttığı, fakat bu alanların Ha sayısının artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Ek sayısının artmasının birincil ve ikincil hız alanı için farklı sonuçlar elde edildiği yazarlar tarafından tespit edilmiştir.

Awang Kechil ve Hashim [16], bir poroz (gözenekli) ortamda çeşitli duvar sıcaklıklarına sahip bir düz plakada iki-boyutlu, sürekli laminar zorlanmış MHD Hiemenz akışı Keller-kutu yönteminin implisit fark metodu vasıtasıyla nümerik olarak çözmüşlerdir. Yüzey sürtünme katsayısı ve Adomian ayrıştırma metodu tarafından verilen ısı transferi hızının Keller kutu yönteminin nümerik çözümleri ile uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

Bandyopadhyay ve Layek [17], dar bir kanalda manyetohidrodinamik akışı hem sürekli hem de vürcalı (pulsatile) akış için sonlu fark metodunu kullanarak zamana bağılı nümerik olarak çözmüşlerdir. Çalışmada, manyetohidrodinamik akıştaki akım çizgileri ve girdap dağılımları grafik olarak sunulmuştur. Akış ayrılma bölgesinin manyetik

parametrenin artmasıyla azaldığını, vürmalı akıştaki duvar kayma gerilmesi tepe değerin zamanla değıştiğı ve bu değerin maksimum akış hızında en büyük değeri aldığını, her iki akış şartlarında (sürekli ve vürmalı) manyetik parametrenin eksenel hız profillerini kırdığını ve sınır tabaka ayrışmasının uygulanan dış manyetik alan ile kontrol edilebileceğini rapor etmişlerdir.

Yang vd. [18], yalıtkan kaplamalara sahip dikdörtgen kesitli bir kanalda MHD basınç düşümünü, 3 boyutlu MTC-H 1.0 kod isimli program vasıtasıyla nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada, MHD etkileri, yalıtımlı ve yalıtımsız duvar için çeşitli sonuçlarla ortaya konulmuştur. Mükemmel kaplanmış kanalda, aynı kaplama direncinin aşağı-yukarı aynı basınç düşümüne neden olacağı ve kaplama direnci $0.01 \Omega \text{ m}^2$ den daha düşük olursa, izolasyon performansının hızlı bir şekilde düşeceğini göstermişlerdir. Aynı zamanda, iyi yalıtılmamış duvarlarda daha uzun çatlak mesafelerinin, daha büyük MHD basınç düşümüne neden olacağını vurgulamışlardır.

Zhang vd. [19], dikdörtgen kesitli bir kanalın içine bir ucu yarıklı engel yerleştirerek MHD akış karakteristiklerini FLUENT kodunu kullanarak çözmüşlerdir. Elde edilen sayısal verileri deneysel veriler ile kıyaslamışlardır. Çalışmada, basınç düşümü ve hız dağılımlarıyla ilgili bazı veriler sunulmuştur. Engelsiz kanaldaki MHD akışın, deneysel veriler ile uyumlu olduğu gözlemlenirken, engelli durumun hız dağılımlarında bazı farklılıkların olduğunu sonucuna varmışlardır.

Huang ve Li [20], üstü açık dikdörtgen bir kanalda, kanalın altına yarı küresel çıkıntılı duvarlar (protrusion walls) yerleştirerek ısı transfer artırımını (Nu/Nu_0), akış karakteristikleri, sürtünme kayıplarını (f/f_0) ve termal performansı sayısal olarak incelemişlerdir. Manyetik alan yoğunluğu $0.06 - 0.14 \text{ T}$ aralığında değişmektedir (bu değerler $30 \leq Ha \leq 70$ aralığına tekabül etmektedir). Çıkıntıların ısı transfer katsayısını artırdığı ve Ha sayısının artmasının bu katsayının azalttığını elde ettikleri sonuçlarla ortaya koymuşlardır.

Mistrangelo ve Bühler [21], sonlu elektrik iletkenliğe sahip ani genişlemeli bir kanalda (x-yönünde genişleyen duvar) elektriksel iletkenliğe sahip bir akışkana, kanala dik manyetik alan uygulayarak akış hareketini nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmayı CFX paket programı yardımıyla üç boyutlu olarak gerçekleştirmişlerdir. Çok küçük hızlarda bile, bir akış sirkülasyonun meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Kang vd. [22], içinde sıvı metal bulunan ve üç paralel jet girişine sahip dikdörtgen bir kanala dıştan manyetik alan uygulayarak akışkan karakteristiklerini deneysel ve sayısal

olarak araştırmışlardır. Her iki yöntemden elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Kanal nozullarındaki akışkan giriş hızları ve farklı manyetik alan kuvvetlerinin etkisi ile ilgili sonuçlar şekil olarak sunulmuştur. Artan manyetik alanın, akışkan jet giriş hızlarının uzunluğunu önemli ölçüde azalttığı ve sıvı akışkan jet çaplarını kalınlaştırdığı gözlemlenmiştir.

Hashizume [23], sıvı bir blanket (üretken alan) sisteminde MHD problemini çözmek için nümerik ve deneysel bir inceleme yapmıştır. Çalışmasında, blanket soğutma sıvısı olarak erimiş Lityum ve Flibe tuzunu kullanmıştır. Hartmann tabakası ve M-şekilli kenar tabaka iletken bölge olarak düşünüldüğünde teorik ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu ve kapalı bir kanal içerisine yerleştirilen engellerin ısı transferini arttırmada iyi bir etken olduğunu gözlemlenmiştir.

Luo vd. [24], enine manyetik alan uygulayarak sıvı lityum metal jetini Penalty faktör medoduyla sayısal olarak modellemişlerdir. Sayısal çalışmadan elde ettikleri verileri, daha önce yapılan deneysel çalışmalarla karşılaştırmak için iki farklı akış için giriş hızı (3 ve 5 m/s) parametresi kullanılmıştır. İndüklenen manyetik alanın simetrik formunun MHD etkisi ile tahrip olduğu ve bu etkiden dolayı akışın hareketinin kaotikliği arttığı gözlemlenmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında her hangi bir sapmanın olmadığını belirtmişlerdir.

Hughes vd. [25], üç farklı manyeto hidrodinamik akış durumu için ticari paket programı PHOENICS'i kullanarak nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında sınır tabaka, Hartmann akışı ve Couette akışkanları için hız profilleri elde edilmiştir. Çalışma sıvısı olarak civa kullanılmıştır. Elde edilen verileri literatürdeki diğer analitik sonuçlarla karşılaştırmışlar ve sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğunu gözlemlenmişlerdir.

Kim [26], elektriksel iletkenliği olan ani genişlemeli dikdörtgen bir kanalda üç boyutlu sıvı metal MHD akışı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla nümerik olarak incelemiştir. Yazar, akış alanındaki akış hızı, akım yoğunluğu, elektrik potansiyeli, basınç düşümü ve Lorentz kuvvetini MHD akışı üzerindeki manyetik alanın yönü ve kanal genişlemesinin etkisi için incelemiştir. Ha sayısı 1000 olarak seçilmiştir. Manyetik alan, kanalın genişleyen bölümüne dik ve paralel olarak uygulanmıştır. Yüksek hız vektörleri kanalın x-yönündeki girişi ve genişleyen bölümüne yakın yerlerde elde edilirken, diğer bölgelerinde yaklaşık olarak eşit kaldığı ve basınç düşümünün kanalın dar kısmında daha dik bir şekilde indiği gözlemlenmiştir.

Bühler vd. [27], yüksek Hartmann sayısıyla duvarları elektriksel olarak iletken olan ani genişlemeli dikdörtgen bir kanal arasında sıvı-metal akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Giriş hızı ve indüklenen manyetik alan parametreleri, 1mm/s - 0.7 m/s ve $0.18 T \leq B \leq 2T$ arasında değişmektedir. Çalışmada, farklı etkileşim parametreleri için elde edilen değerleri asimptotik teori ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Ölçülen potansiyel yüzey tepkilerinin farklı etkileşim değerlerini için fazla etkili olmadığı görülmüştür.

Mistrangelo ve Bühler [28] tarafından, helyum soğutmalı sıvı lityum bir (blanket) sistemde manyetohidrokinamik akışların üzerinde helyum soğutma kanallarının etkisini incelenmiştir. Çalışma sıvısı olarak kurşun Lityum (PbLi) sıvısı kullanılmıştır. Kurulan MHD akışın homojen olmayan duvar iletkenliğindeki serleşme tabakaları ve soğutma için kullanılan helyum kanallarının varlığından etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Morley vd. [29], Manyetik etkileşim parametresini ($N = Ha^2 / Re$) analiz etmek için bir tane üç boyutlu çift soğutmalı kurşun lityum blanketini (tritiumun üretildiği alan) tasarlamışlardır. Dikdörtgen kanallardaki akışın daha iyi dağılması için manifold alan oluşturulmuştur. Akış dağılımının simetri koşullar kullanılarak yapılan simülasyonların daha üniform olduğunu savunmuşlardır.

Starke vd. [30], helyum kurşun-lityum soğutmalı bir sistemde MHD etkilerini farklı Ha ve Re sayıları için araştırmışlardır. Dikdörtgen şeklindeki deney setinin içine plakalar yerleştirilerek akış hızı ve akış dağılımı ile ilgili analizler yapılmıştır. Sonuç olarak, yeni geliştirilecek sistem ve modellemelerde basınç düşümü ve akış dağılımının bu sistem sayesinde tahmin edilebileceğini savunmuşlardır.

Ke vd. [31], ticari paket programı PHOENICS'i kullanarak sıvı metal/helyum gazının MHD akışı üzerinde nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yüksek hızlı jetin elektriksel iletkenliğe sahip olan duvarın yakında tabakalaştığı ve bunun ısı transferini iyileştirdiğini, ancak MHD basınç düşümünü arttırdığını tespit etmişlerdir.

Lyublinski vd. [32], V-4Ti-4Cr alaşımından yapılan yarıklı bir kanalda lityum akışkanının MHD akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyleri Ha sayısı ve Re sayısı gibi farklı parametreler için gerçekleştirmişlerdir. Ölçülen hidrolik dirençler, kaplanmış duvar kanalı için iletken duvar kanalına kıyasla beş kat azalma göstermiştir.

Aoyagi vd. [33], güçlü bir manyetik alan altında ($B = 5T$) üstü açık üç tabakalı bir kanalda MHD akışta basınç düşümü ile ilgili deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Akışkan olarak Bi-Sn ötektik alaşımını kullanmışlardır. Deneysel ve

sayısal sonuçlar arasında bazı farkların olmasına rağmen, deneysel sonuçlardan elektromanyetik kuvvetin etkisinin tabakalı kanalda azaldığını tespit etmişlerdir.

Chen vd. [34], kare karşıt-kesitli bir kanalda MHD etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Sayısal olarak kullanılan kodun amacı, Çin’de bulunan sıvı metal Lityum-kurşun (LiPb) deneysel döngüsü DRAGON-IV’yi geliştirmektir. Sıvı metal lityum-kurşunun akış karakteristiklerini, sıcaklık ve kanalın kayma dağılımlarını manyetik termal-hidrolik kodu (MTC) yardımıyla analiz etmişlerdir.

Bhattacharyay vd. [35], kurşun lityum (Pb-Li) sıvı metalini kullanarak MHD ile ilgili deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmadan elde ettikleri sonuçlarla sayısal çalışmada elde ettikleri sonuçlar arasında uyum olduğunu gözlemlemişlerdir. Her bir test bölümündeki MHD basınç düşüşünün, akış hızıyla doğrusal olarak ve uygulanan manyetik alanın bir fonksiyonu olarak arttığı bulunmuştur.

Recebli vd. [36], yatay bir boru içerisinde sabit akan sıvı lityum akışı üzerinde, boruya dik olarak uygulanan manyetik alanın etkisini üç boyutlu sayısal olarak analiz etmişlerdir. Sıvı lityum akışı sabit duvar sıcaklığıyla soğuk ve sıcak olarak iki farklı koşul için gözlemlenmiştir. Analiz termal olarak tamamen gelişmiş, fakat hidrodinamik olarak geçici akış bölgesi için yapılmıştır. Hesaplamayı ANSYS-Fluent yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Deneyleri farklı duvar sıcaklıkları, farklı giriş akış sıcaklıkları ve farklı manyetik alan şiddeti için gerçekleştirmişlerdir. Boru uzunluğu ve boru çapı boyunca akış sıcaklıkları dağılımı, Nu sayıları ve yüzey sürtünme katsayısı gibi parametreleri farklı manyetik alan şiddeti için tekrarlamışlardır.

Sutevski vd. [37], dikdörtgen kesitli bir kanala konulan yalıtımlı engel ve basınç dengeleme etkileriyle ilgili üç boyutlu sayısal bir çalışmayı modellemişlerdir. Kanal malzemesini paslanmaz çelikten, engel malzemesini silikon karbitten (SiC) ve akışkan sıvı metal In-Ga-Sn olarak kullanmışlardır. Parametrik çalışmayı kanal uzunluğu, engelin elektriksel iletkenliği ve yarık büyüklüğü için yapmışlardır. Kanalın eksenel kesitteki basıncın Lorentz kuvvetiyle dengelenebileceğini, ancak duvar uzunluğu boyunca yarık olması halinde basınç dengelenmesinin yaklaşık %50’ye kadar dengelendiğini belirtmişlerdir.

Patel vd. [38], test bölgesi iki farklı malzemeden yapılan (manyetik özelliği olmayan SS316L isimli malzeme ve ferromanyetik özelliğe sahip olan SS430 malzemesi) ve 25mm x 25mm kare karşıt-kesitten oluşan bir kanala 4 Teslaya kadar manyetik alan şiddeti uygulayarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sıvısı olarak Pb-Li

kullanmışlardır. $B=2T$ 'dan büyük olduğu zaman, her iki malzemedeki MHD davranışlarının benzer olduğunu vurgulamışlardır. Bununla birlikte, SS430 malzemesi %8 daha fazla elektriksel iletkenliğe sahip olmasına rağmen, SS316L malzemesi ile karşılaştırıldığında (sadece $Tesla=1$ için) basınç düşümünün SS430 den daha düşük olduğunu not etmişlerdir.

Literatürde MHD laminar zorlanmış taşınımın yanında türbülanslı akış problemlerinde çokça yer aldığı bilinmektedir. Yüksek Re sayılarının ısı transferini arttırmada çok etkili bir yöntem olduğu görülmektedir. Çalışma sıvısı olarak genellikle sıvı metal akışkanlardan oluşan MHD türbülanslı zorlanmış taşınım örneklerinden bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Takeuchi vd. [39], dairesel bir boruda Flibe (Li_2BeF_4) sıvısının üzerinde MHD türbülans akışı deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, bir boru içinde parçacık görüntüleme tekniğini (PIV) kullanarak, manyetik alan altında sıvı potasyum hidroksit çözeltisinin türbülanslı akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Türbülans yoğunluğu ve Reynolds'un $Ha = 20$ için kayma gerilmesi ile ilgili olarak, deneysel veriler ile DNS arasındaki farklılıkların olduğunu göstermişlerdir.

Rao ve Sankar [40], hem dikdörtgen hem de küresel kesitli iki farkı kanalda lityum sıvı metalin, akış ve taşınım ısı transferi karakteristikleri üzerinde MHD etkilerini görmek için çeşitli simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın manyetik alan şiddetini 0-1T arasında seçilmiş olup, Ha sayısı ve Stuart sayısını (etkileşim parametresi, N) sırasıyla, 0-700 ve 0-50 olarak seçilmiştir. Yalıtımsız kanalda, taşınım ısı transferinin manyetik alanın artmasıyla manyetik alana dik duvara yakın bölgede türbülans dalgalanmalarındaki azalmadan dolayı azaldığını, fakat manyetik alana paralel duvara yakın bölgede ise Nu sayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Yalıtılmış duvarda manyetik alana paralel duvara yakın alanlarda, Nu sayısında herhangi bir artışın görülmediğini de bildirmişlerdir.

Patel vd. [41], iki boyutlu kare karşıt-kesitli bir kanalda, kurşun-lityum sıvı metalinin MHD akış karakteristiklerini farklı Ha sayıları için nümerik olarak çözmüşlerdir. Elde edilen verileri analitik çözümlerle karşılaştırarak çalışmanın doğruluğunu test etmişlerdir. Analiz, manyetik indüksiyon metoduyla gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu hız ve sıcaklık profillerini yalıtımlı ve iletken kanal duvarları için sunulmuştur. Çalışmada, kaldırma etkisinin %1.5 ile basınç düşümünü azalttığını ifade etmişlerdir.

Swain vd. [42], manyetohidrodinamik etkileri görmek için hem deneysel hem de sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, paslanmaz bir çelik kanal içerisinden

geçen kurşun-lityum sıvı metal kullanılmıştır. Sayısal çalışmada Fluent kodunun MHD modülünü kullanmışlardır. Analizde, dirseğin her iki bacağının uygulanan manyetik alana dik olduğu dönemeçte akış dağılımının hızla simetrik hale geldiğini tespit etmişlerdir.

Zhang vd. [43], dairesel boru arasından akan sıvı metal MHD akışın üzerinde temas direncinin etkisini, farklı Ha sayıları için sayısal olarak incelemişlerdir. Veriler, diğer deneysel ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların diğer yöntemlerle elde edilen veriler ile uyum içinde olduğu anlaşılmıştır. Sıvı metal ve katı duvar ara yüzündeki temas direncinin, sıvı metal blanket şartları altında MHD basınç düşümü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, temas direnciyle azalan MHD basınç düşümünün derecesi duvarın iletkenlik oranıyla belirlendiği ve azalan derecenin duvar iletkenlik oranının artmasıyla daha da artacağını tespit etmişlerdir.

Li vd. [44], dairesel bir kanalda üniform olmayan manyetik alan altında, yüksek sıcaklıklı PbLi sıvı metal akışın basınç düşümünü deneysel ve üç boyutlu nümerik sonuçları içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, farklı Ha sayıları için x yönü boyunca basınç düşümü ve basınç düşümü-Re sayısı ilişkisini gösteren grafiksel sonuçlar sunulmuştur. Mıknatısın giriş ve çıkışındaki sıvı metal akışın farklı bölmeleri için, bu iki bölgedeki karşıt bölümlerdeki basınç dağılımlarının farklı olduğunu göstermişlerdir.

Albest-Chico vd. [45], tamamen gelişmiş türbülans sıvı metal akışın geçtiği bir boruya manyetik alan uygulayarak MHD etkilerini deneysel ve üç boyutlu sayısal olarak çözmüşlerdir. Düşük, orta ve güçlü manyetik alanların hepsinin türbülanslı akışın hızını geciktirdiğini rapor etmişlerdir.

Aşağıda önceki araştırma sonuçları özetlenen sıvı metal akışkanların dışında, bazı değişik akışkan tiplerinin MHD türbülanslı zorlanmış taşınım olaylarının literatür özetlerine yer verilmiştir. Çalışmalar hem deneysel hem de sayılar sonuçları kapsamaktadır. Bunlardan,

Takeuchi vd. [46], büyük çaplı dairesel bir borunun içinde, erimiş tuzun akış ve ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Akış hareketini görüntülemek için parçacık görüntüleme tekniği (PIV) kullanılmıştır. Çalışmada, kaldırma kuvvetinin etkisini azaltmak için değeri 5000 ile 25000 arasında değişen yüksek Re sayıları seçilmiştir. Elde ettikleri sonuçları gelecek çalışmalarda referans olarak kullanılması tavsiye edilmiştir.

Xu vd. [47], dikdörtgen bir kanalın içerisine engeller yerleştirerek, akış yönünde Ha duvarı ve kenar duvarlarındaki (kanalın merkezi boyunca) basınç dağılımlarını üç boyutlu

nümerik olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak kanalın içine yerleştirilen engellerin MHD basınç düşümünü azalttığı rapor edilmiştir.

Yamamoto vd. [48], iki boyutlu bir kanalda MHD etkilerini, ısı transferi ile birlikte DNS (direkt nümerik simülasyonlar) ve k-epsilon türbülans modellerini kullanarak sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmada, inceleme parametreleri olarak kayma gerilemelerinin değişimi, ortalama hız profilleri, Reynolds kayma gerilmeleri profilleri, ortalama sıcaklık profilleri, normal-duvar türbülans ısı akıları, türbülans Pr sayısı profilleri ve türbülans kinetik enerji profilleri incelenmiştir. Ha sayısı 0 ile 16 arasında değiştirilmiş ve elde edilen sonuçları literatürdeki farklı modellerle kıyaslamışlardır. Ha sayısının etkisinden dolayı, Ha = 16 değeri için akışın laminar olduğunu gözlemlemişlerdir.

Smolentsev vd. [49] tarafından, beş farklı makalenin analizinden oluşan bir inceleme (review) çalışması sunulmuştur. Bunlar; iki boyutlu tamamen gelişmiş laminar sürekli MHD akış, üniform olmayan manyetik alandaki üç boyutlu sürekli gelişen MHD akış, quasti-iki boyutlu MHD türbülans akış, üç boyutlu MHD akış ve yerçekimi etkisindeki taşınım ısı transferi MHD akış çalışmalarından oluşmaktadır. 1990'a kadar hem dikdörtgen hem de karmaşık geometrilerde aynı Ha sayıları kullanılırken, bu tarihten sonra iki geometrideki Ha sayılarının farklılaştığını grafiksel olarak sunmuşlardır.

Yamamoto ve Kunugi [50], Pr sayısı 25 ve yüksek Re sayılarındaki türbülanslı kanal akışlarında, MHD ısı transferini DNS yöntemiyle farklı Ha sayıları (Ha=0, 20, 28) için modellemişlerdir. Çalışmada, kanal merkezine yakın ani türbülans sıcaklık dağılımları, ani türbülans hız dağılımları, etkileşim parametresi N ve Nu sayısı ilişkisi ve ortalama sıcaklık profilleri ile ilgili veriler grafik olarak verilmiştir. Tasarım koşulları altında yaklaşık %20 kadar ısı transferi bozulmasının olduğunu belirtmişlerdir.

1.1.3. Nanoakışkanlarda MHD Zorlanmış Taşınım

Bu bölümde, bazı araştırmacılar su, etilen glikol ve gaz yağı gibi temel akışkanlara, akışkanın termal iletkenliğini yükseltmek ve akışkanı daha iyi kontrol etmek için Al_2O_3 , Cu, CuO, Ag, TiO_2 gibi nano parçacıklar ekleyerek analizler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, genel olarak nano akışkan zorlanmış taşınımında nano parçacıkların etkisiyle akışkanın daha iyi kontrol edildiği ve ısı transferinin arttığı sonucuna varmışlardır. 1994' te ilk defa Choi tarafından, nano parçacıklarla sıvıların termal iletkenliklerinin artması yönünde yapılan çalışma ile birlikte, günümüzde hala birçok araştırma bu nano parçacıkları

alternatif ısı transferini arttırma olgusu olarak çalışmaktadır. Bu farklı nano akışkanlar literatürde genişçe yer bulmaktadır. Manyetik alan altındaki bu çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Sheikholeslami vd. [51], en küçük kareler yöntemi ve Galerkin metoduyla manyetik alana maruz kalan yarı poroz bir kanalda, laminar nano akış problemini analitik olarak çözmüşlerdir. Yazarlar, elde ettikleri sonuçları dördüncü mertebe Runge-Kutta metoduyla karşılaştırmışlardır. En küçük kareler yöntemi ve Galerkin metoduyla elde edilen sonuçların birbirinden yok denecek kadar az farklı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın ana sıvısı olarak su ve etilen glikol kullanılırken, nano parçacık olarak da bakır ve gümüş kullanılmıştır. Çalışmada boyutsuz hız profilleri üzerinde nano parçacık hacim oranı, Ha sayısı ve Re sayısının etkisi incelenmiştir. Re sayısının artmasıyla hız sınır tabaka kalınlığının azaldığını, Ha sayısının artmasıyla bu kalınlığın arttığını, ayrıca bakır- etilen glikol nano akışı ile hız profillerindeki en büyük artışın elde edildiği tespit edilmiştir.

Karimipour vd. [52], bir mikro kanala enine manyetik alan uygulayarak zorlanmış laminar MHD nanoakışın ısı transferi ve akış karakteristiklerini nümerik olarak incelemişlerdir. İki boyutlu nümerik çalışmayı FORTRAN yazılımı kullanılarak farklı fiziksel sınır şartları için gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın ana sıvısı olarak su tercih edilirken, nano parçacık olarak Ag ve Al_2O_3 seçilmiştir. Isı transferi üzerinde bu iki nano parçacığın akış içerisindeki davranışı kıyaslanmıştır. Çalışmayı, boyutsuz duvar kayma katsayıları (0.01, 0.05, 0.1), farklı Ha sayıları (0, 20, 40), farklı Re sayıları (10, 100) ve sabit nano hacim oranı ($\phi=0.04$) gibi fiziksel büyüklükler için oluşturmuşlardır. Ag nin sabit kayma katsayısında (0.05), her iki Re değeri için X koordinatı boyunca yerel Nusselt sayısının Ha değerlerinin artmasıyla arttığı ve kanalın sonuna doğru bu değerlerin Ha sayısının artmasıyla azaldığını rapor etmişlerdir. Isı transferini arttırmak için, düşük Re sayısında ($Re = 10$) Ag nin yerine Al_2O_3 – su nanoakışının tercih edilmesi ve Re sayısının daha büyük değerleri için ($Re = 100$) termal iletkenlik katsayısının daha büyük olan nano parçacıkların tercih edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Hatami vd. [53], üçüncü mertebe newtonyen olmayan akış olarak kabul edilen kana, nano parçacık olarak altın ekleyerek MHD etkilerini görmek için sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Problemi poroz bir hacimde çözmüşlerdir. MHD parametrelerinin artmasıyla, hız profillerinin manyetik alan etkisinden dolayı azaldığını gözlemlemişlerdir.

Sheikholeslami vd. [54] gerçekleştirdikleri sayısal çalışmada, sıcak eliptik engelli geçirgen bir geometri içerisindeki MHD nanoakışkan akışını simüle etmek için

mezoskopik bir yöntem kullanmışlardır. Simülasyon Lattice Boltzmann yöntemi (LBM) tarafından gerçekleştirilmiştir. Brownian hareketinin etkisi nanoakışkan modelinde açıklanmıştır. Çalışmada Reynolds sayısı Re , nanofluid hacim oranı (ϕ), Darcy sayısı (Da) ve Hartmann sayısının (Ha) akış üzerindeki rolleri gösterilmiştir. Sonuçlar, akışkan hızının Ha 'nın artışıyla azaldığını ortaya koymaktadır.

Ellahi [55], bir boru içerisinde MHD ve sıcaklığa bağlı viskozite etkisini newtonsal olmayan nanoakışı kullanarak farklı modeller için (Reynolds modeli ve Vogel's modeli) analitik olarak çözmüştür. Boru sıcaklığının akışkan sıcaklığından daha yüksek tutulan problem HAM yöntemiyle çözülmüştür. Çalışmada, nano yoğunluğunun artmasının ısı transferini arttırdığı fakat MHD parametresinin artmasıyla hız profillerinde önemli düşüşler meydana geldiğini gözlemlenmiştir.

Zaidi ve Mohyud-Din [56], dar dikey bir yarık arasından geçen tamamen gelişmiş iki boyutlu sıkıştırılmaz nano akış karakteristikleri üzerinde MHD etkilerini Runga-Kutta-Fehlberg metoduyla nümerik olarak analiz etmişlerdir. Akış sıcaklığının thermophoresis parametresinin artan değerleri için arttığını, Bi sayısının akışkan sıcaklığını arttırdığı ve Lorentz kuvveninin akışkan ile ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Malvandi ve Ganji [57], oluşturdukları iki boyutlu nümerik çalışmada, dairesel bir mikro kanala dıştan manyetik alan uygulayarak kanal içindeki su/alüminyum nano sıvısının kayma akışı üzerinde Brownian hareketi ve termoforez (thermophoresis) etkisini incelemişlerdir. Nano parçacık göçünün, kanalın ısıtılan duvarların kenarından kanalın merkezine doğru hareket ettiği, ısı transferi oranının kayma parametresiyle artan bir eğilim gösterdiğini ve duvardaki daha pürüzsüz hız gradyentinden dolayı basınç düşümünün azaldığını vurgulamışlardır.

Hatami vd. [58], yatay esnek düz bir plaka üzerinde MHD Al_2O_3 -su nanoakışın zorlanmış taşınım sınır tabaka problemini, Homotopy Analysis Metodunu (HAM) kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında HAM ve sayısal metot arasında yaptıkları kıyaslamada, HAM metodunun bu tür problemlerin çözümü için tam ve yüksek verimli bir metot olduğunu göstermişlerdir. Boyutsuz hız ve sıcaklık profilleri üzerinde manyetik parametre ve nano parçacık miktarının etkisini incelemişlerdir.

Yukarıda bahsedilen nano parçacıkların dışında manyetik özelliği bulunan ve daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olan Fe_3O_4 ve Fe_2O_3 gibi bazı parçacıkların temel akışkanlara eklenmesiyle oluşan ve ferrofluid olarak adlandırılan sıvılarla ilgili literatürde

yer alan bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir. Literatürden bu akışkan tiplerinin ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerinde çok etkili olduğu anlaşılmıştır.

Aminfar vd. [59], dikey bir halkada, manyetiklenme özelliğine sahip kaynayan ferrofluidin zorlanmış taşınım (manyetik akış) kritik ısı akısı üzerindeki manyetik alanın etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyde temel akış olarak su, nano parçacık olarak Fe_3O_4 kullanılmıştır. Sonuçlar, uygulanan manyetik alanın hem saf su hem de manyetik akışın kritik ısı akısı değerlerinde bir artışa neden olduğu görülmüştür.

Selimefendigil ve Öztop [60], ters yüzölü dik kademeli bir geometri içinde manyetik dipol etkisi altında, dönen bir silindirin akış karakteristiklerini ve ısı transferini iyileştirmek için nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Akışkan olarak ferrofluid sıvısını kullanmışlardır. Çalışmada, Reynolds sayısı (Re), silindirin dönme açısı ve manyetik dipol gibi karakteristiklerin etkisi incelenmiştir.

Aminfar vd. [61], kare karşıt-kesitli dikdörtgen bir kanalda deniz suyu ve % 4 Fe_3O_4 içeren bir ferrofluid (manyetik nano akış) akışın hidro termal davranışını nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışma, kontrol hacim tekniği iki fazlı karışım modeli ile üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Manyetik alan, kanala yatay (pozitif ve negatif yönde), dikey ve aynı anda her iki yönde olmak üzere üç farklı durum için uygulanmıştır. Yazarlar, artan Re sayısının aksel olarak uygulanan manyetik alan etkisini önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir.

Aminfar vd. [62], kare karşıt-kesitli dikdörtgen dikey bir kanalda su ve % 4 Fe_3O_4 içeren bir manyetik nano akışın (ferrofluid) hidro termal davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Kanalin içinden kanala paralel bir telden elektrik akımı geçirilmesiyle manyetik alan elde edilmiştir. Çalışma için, iki fazlı karışım modeli ve kontrol hacim tekniği kullanılmıştır. Hız gradyanları kanal duvarının yanında arttığı ve bundan dolayı yerel Nu sayısının arttığını belirlenmiştir. Yazarlar ayrıca, Re sayısının artmasıyla, yerel Nu sayısı üzerindeki üniform olmayan manyetik ekinin azaldığını göstermişlerdir. Yine Re sayısı için, dik uygulanan manyetik alanın etkisinin, aksel olarak uygulanan manyetik alanın etkisinden daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir.

Sheikholeslami vd. [63], değişken dış manyetik alan altında kapak-odaklı yarı bir halkada ferrofluid (Fe_3O_4 -su) sıvısının zorlanmış taşınım ısı transferi karakteristiklerini incelemişlerdir. Kontrol hacmine dayanan sonlu eleman metodunu hem ferrohidro dinamik hem de manyetohidro dinamik etkiler düşünülerek problemin yönetici denklemleri çözülmüştür. Elde edilen sonuçlardan Kelvin kuvvetlerinin etkilerinin yüksek Re sayıları

için daha baskın olduğu ve Re sayısı ile manyetik sayının ısı transferini doğrudan etkilediği sonucuna varmışlardır.

Bennia ve Bouaziz [64], 0.014 m ve 1.7 m çapa sahip bir boruya manyetik alan kuvveti uygulayarak, Fe_3O_4 – su nano akışkanın zorlanmış taşınımın akış ve ısı transferini incelemişlerdir. Borunun dış tarafı sabit ısı akısına maruz bırakılmıştır. Analiz ANSYS-Fluent ticari yazılımı yardımıyla farklı Re sayıları ve farklı büyüklükteki nano parçacıklar için tek ve çift faz karışım modelini kullanarak çözmüşlerdir. Çalışmada Re 7000 iken manyetik alan şiddeti değerleri 0T, 2T, 5T, 7.5T ve 10T olarak seçilmiştir. Sürtünme faktörü ve Nu sayısının indüksiyon ve elektrik potansiyel kullanılarak manyetik alanın artmasıyla arttığını, manyetik alan kuvvetinin artmasının Lorentz kuvvetinden dolayı hız profillerini azalttığını belirtmişlerdir. Dahası ortalama Nu sayısı ve sürtünme faktörünün nano parçacık hacim oranı ve manyetik alanın artmasıyla arttığını göstermişlerdir. Sonuç olarak ısı transferi ve sürtünme faktörünün, nano parçacık hacim oranı, manyetik alan kuvveti ve elektriksel iletkenliğin artışına bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

Gedik vd. [65], bir boru içerisinde akan kararsız, viskoz ve sıkıştırılamaz akış şartlarında elektriksel iletkenliği olan iki fazlı (katı-sıvı) bir maddeye dış manyetik alan ve elektrik alan uygulamışlardır. Çalışmalarında, birinci faz olarak demir tozu, ikinci faz olarak saf su kullanılmıştır. Bu çalışmanın özgünlüğü olarak, manyetik alana ilaveten elektrik alanın da bir parametre olarak uygulanması gösterilmiştir. Akış üzerinde uygulanan manyetik alanın akış hızını azalttığı gözlemlenmiştir. Fakat elektrik alan tek başına uygulandığında elektrik alanın yönüne bağlı olarak, hız yönlerinde herhangi bir değişikliğin görülmediğini göstermişlerdir.

Yapılan literatür çalışmaları ışığında, temel akış, nano akış ve sıvı metallerin dışında Magnetorheological (MR) sıvılarına da çalışma sıvısı olarak raslanmaktadır. MR sıvıların çok yüksek manyetik alan kuvvetleri altında katılaşma özelliğini göstermesi bu akışkanları ferrofluid vb. akışkanlardan ayırmaktadır. Bununla ilgili Gedik vd. [66], dıştan manyetik alan uygulanan iki sabit paralel plaka arasında, magnetorheological (MR) sıvısının iki boyutlu simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Plakalara üniform manyetik alan, akış yönüne dik olarak uygulanmıştır. Çalışma için yönetici denklemlerin çözümünde ANSYS-Fluent ticari kodu kullanılmıştır. Manyetik alan uygulanmış, paralel plakalar arasındaki sıvıyı tanımlayan farklı denklemleri, manyetik indükleme denklem metodunu kullanılarak Fluent MHD modülü yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür. Çalışmada farklı manyetik

alan değerleri için hız ve basınç dağılımlarının sayısal özömleri elde edilmiştir. Sonuç olarak, MR akışına uygulanan manyetik alanın, manyetik alanın artışına bağlı olarak akış hızını düşürdüğü gözlenmiştir.

1.1.4. MHD Doğal Taşınım

MHD doğal taşınım olayı, zorlanmış taşınımında olduğu gibi ısı transerinin artırılması veya azaltılması elektronik cihazlar ve nükleer reaktörlerin soğutulması gibi mühendislik uygulamalarında araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Literatürde nano parçacık katkılı MHD doğal taşınım çalışmaları yazarlar tarafından daha çok nümerik olarak çalışılan bir konudur ve analizleri genel olarak bir oyuk içinde gerçekleştirmişlerdir. Zorlanmış taşınımdan farklı olarak, MHD doğal taşınım problemlerinde manyetik etkinin ısı transferini daha çok azalttığı tespit edilmiştir. MHD doğal taşınımında ferrofluid doğal taşınım üzerine yapılan çalışmalardan bazıları aşığıda özetlenmiştir.

Literatürde, aynı zamanda ferrofluid zorlanmış taşınım çalışmalarının yanında ferrofluid doğal taşınım olaylarına da sıkça rastlanmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşığıda özetlenmiştir.

Kefayati [67], bir dış manyetik kaynak varlığında lineer olarak ısıtılmış bir oyukta ferrofluid doğal taşınımın ısı dağılımının etkisini LBM yardımıyla nümerik olarak çalışmıştır. Çalışma sıvısı olarak gazyağı ve nano ölçekli kobalt parçacıklarının eklenmesiyle oluşan kolloid karışımı kullanılmıştır. Sonuçlar, eşitli Ra sayıları için ferromanyetik parçacıkların artması ısı transferini azalttığını göstermiştir.

Sheikholeslami ve Ganji [68], sinüsoidal sıcak duvar ile yarı halka bir oyukta ferrofluid (manyetik nano akışkan) akış ve ısı transferi üzerinde, dıştan uygulanan manyetik alanın etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Hem ferrohidrokinamik (FHD) hem de manyetohidrokinamiğin etkileri düşünölerek elde edilen yönetici denklemler, kontrol hacmi sonlu elemanlar metodu yardımıyla özölmüştür. Akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerinde Ra sayısı, nano parçacık hacim oranı, FHD'den kaynaklanan manyetik sayı ve MHD 'den kaynaklı Ha sayısının etkisi araştırılmıştır. Nu sayısının, Ra sayısı ve nano parçacık oranının artmasıyla arttığını ve Ha sayısının artmasıyla azaldığı vurgulanmıştır. Yazarlar ayrıca, düşük Ra sayısı için ısı transferi artırımının, Ha sayısının artan bir fonksiyonu iken, manyetik sayısının da azalan bir fonksiyonu olduğunu ve bu durumun yüksek Ra sayısı için ters bir durum ifade ettiğini ortaya koymuşlardır.

Sheikholeslami ve Gorji-Bandpy [69], dış manyetik alan uygulanmış ve alttan ısıtılmış bir hacimde doğal taşınım problemini LBM kullanarak nümerik olarak çalışmışlardır. Çalışmanın sonuçlarını literatürdeki bazı deneysel ve nümerik sonuçlarla karşılaştırmış ve sonuçların diğer çalışmalarla uyum sağladığını gözlemlemişlerdir. Çalışmada parametre olarak Ra sayısı, manyetik katsayı ve ısı akısı kullanılmıştır. Sonuçlar, ısıl termal tabaka kalınlığının Cobaltın (Co) hacim oranının artmasıyla arttığını ve Nu sayısının, Ra sayısı ile artarken nano parçacık büyüklüğüyle azaldığını göstermiştir.

Bundan sonraki literatür araştırmaları ferrofluid dışında kalan CuO, TiO₂ ve Al₂O₃-su vb. bazı nano akışkanların davranışını kapsamaktadır. Bunlar aşağıda sunulmuştur.

Sheikholeslami vd. [70], eliptik bir silindirde suya nano parçacık karıştırılmış ve manyetik etki uygulanmış akışın doğal taşınım ısı transferi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Hesaplamaları, Ha sayısı, Ra sayısı, nano parçacık oranı ve silindirin iç açısı gibi farklı parametrelere bağlı olarak gerçekleştirmişlerdir. Ortalama Nu sayısının nano parçacık hacim oranı, Ra sayısı ve eğim açısıyla artarken, Ha sayısının artmasıyla azaldığını vurgulamışlardır.

Bourantas ve Loukopoulos [71] çalışmalarında, mikropolar bir nanoakışla dolu eğimli kare bir geometri içerisinde MHD doğal taşınım akışı nümerik olarak incelemiştir. Hız-girdap formüllerindeki yönetici denklemlerini çeşitli Ra sayısı, Ha sayısı, farklı nano parçacık miktarı, farklı eğim açıları ile manyetik alan yönü için sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak ısı transferi ve akış karakteristiklerinin uygulanan manyetik alan tarafından güçlü bir şekilde etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

Sheikholeslami vd. [72], içinde ısıtılmış bir üçgen olan silindirik yatay bir oyukta Al₂O₃-su nano akışın ısı transferi ve manyetohidrodinamik doğal taşınımın LBM simulasyonunu nümerik olarak yapmışlardır. Nano akışın termal iletkenliği ve efektif viskozitesi KKL bağıntısıyla hesaplanmıştır. Yazarlar, akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerinde nano parçacığın etkisini, Ha sayısı ve Ra sayısının etkisini incelemişlerdir. Ra sayısının artmasıyla Nu sayısının arttığı ve Ha sayısının artmasıyla Nu sayısının azaldığını belirtmişlerdir.

Sheikholeslami vd. [73], iç silindiri ısıtılmış dıştaki soğuk tutulan bir halkada, nano akış kullanarak MHD doğal taşınım ısı transferini incelemek için LBM yöntemini ile nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Farklı Ha sayısı, Ra sayısı, nano parçacık miktarı ve en-boy değerleri için bazı nümerik sonuçlar elde edilmiştir. Ra sayısının azaltılmasıyla ısı transferi iyileştirme oranının arttığı ve Nu sayısının Ra sayısı ve nano

parçacık miktarı üzerinde doğrudan bir etkiye sahipken Ha sayısı ile ters bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Mejri vd. [74], yan duvarları sinüsoidal olarak ısıtılmış içi nano akış dolu kare bir oyukta manyetik alan uygulayarak doğal taşınım ve entropi üretimini incelemişlerdir. Oyuğun alt ve üst duvarları adyabat olarak tutulmuştur. Akış ve sıcaklık alanı probleminin çözümü için LBM metodunu, entropi üretimini hesaplamak için de sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Sıvı akış, ısı transferi ve entropi üzerinde farklı Ra sayısı, Ha sayısı, nano parçacık ve faz sapma etkisi incelenmiştir. Tüm faz sapmalarında akış ve ısı transferi, Ra sayısı ile artarken Ha sayısının artmasıyla azaldığı görülmüştür.

Mahmoudi vd. [75] tarafından, üniform olmayan termal sınır şartlarında üniform ısı üretimi / ısı absorpsiyonuna sahip içinde nano akış olan açık bir oyukta MHD doğal taşınımın analizini LBM yöntemini kullanarak nümerik olarak çözülmüştür. Çalışma sıvısı olarak Al_2O_3 -su nano akış seçilmiştir. Ra sayısı, Ha sayısı, ısı üretimi/soğurması katsayısı ve nano parçacığın etkisi araştırılmıştır. Isı transfer oranının Ha sayısının artmasıyla azaldığı ve Ra sayısının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, nano parçacıkların etkisinin yüksek Ra sayılarında daha etkin olduğu ve bu etkinin ısı soğurmasına göre ısı üretimi için daha önemli olduğu belirtilmiştir.

Sheikholeslami vd. [76], kontrol hacmi sonlu eleman metodu ile nano akış dolu bir oyukta akış karakteristikleri ve doğal taşınım ısı transferi üzerinde manyetik alanın etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Oyuğun içinde sabit ısı akısına maruz olan bir silindir yerleştirilmiştir. Nu sayısının eklenen nano parçacık miktarı, Ra sayısı ve en/boy oranının artmasıyla arttığı, fakat Ha sayısının artmasıyla bu niceliklerin azaldığını gözlemlenmiştir. Ayrıca ısı transferi artım oranının, Ha sayısı ve en/boy oranının artmasıyla arttığı, ancak bu oranın Ra sayısı ile ters bir bağıntıya sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Sheikholeslami vd. [77], içi nano akış dolu L-şekilli açılı bir oyukta doğal taşınım ısı transferi üzerinde MHD etkisini sonlu eleman temeline dayanan kontrol hacmini KKL modelini kullanarak nümerik olarak çözmüşlerdir. Nu sayısının Ra sayısı ve nano parçacığın hacim oranının artmasıyla artarken, Ha sayısı ve eğim açısının artmasıyla azaldığını belirterek, ısı transferindeki artışın ise Ha sayısı ile Ra sayısı arasında ters bir etkiye sahip olduğunu savunmuşlardır.

Sheikholeslami vd. [78], içinde nano-akışkan bulunan eksantirik bir yarı halkada MHD doğal taşınım problemini LBM ile çözmüşlerdir. Nano akışkanın etkili termal

iletkenlik ve viskozitesini sırasıyla Maxwell-Garnetts ve Brinkman modeli ile hesaplamışlardır. Akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerinde dairesel iç silindirin pozisyonu, Ra sayısı, nano parçacık hacim oranı ve Ha sayısı gibi bazı parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. Nu sayısının, nano parçacık ve Ra sayısı ile doğru orantılı iken, yüksek Ra sayısındaki iç silindir ile Ha sayısı ile ters bir bağıntıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, ısı transferi artırımının Ha sayısının artmasıyla arttığının, ancak Ra sayısının büyümesiyle azaldığı sonucuna varmışlardır.

Sheikholeslami vd. [79], içinde nano akış bulunan alttan ısıtılmalı kare bir oyukta doğal taşınım ısı transferi ve MHD CuO-su nano akışın üzerinde manyetik alanın etkisini incelemek için nümerik bir çalışma oluşturmuşlardır. Yönetici denklemleri çözmek için Lattice Boltzmann metodunu kullanılmış ve nano akışın efektif termal iletkenliği ile viskozitesini KKL bağıntısıyla hesaplanmıştır. Nu sayısı, ısı kaynağı uzunluğu, nano parçacık hacim oranı ve Ra sayısı ile artarken, Ha sayısının artmasıyla azaldığını özetlemişlerdir. Ayrıca çalışmada, ısı transferi artırımının, Ha sayısı ve ısı kaynağı uzunluğuyla doğru orantılıyken, Ra sayısı ile ters orantılı olduğunu göstermişlerdir.

Ghasemi vd. [80], alt ve üst tarafı yalıtımlı, bir tarafı soğuk, diğer tarafı sıcak (bu taraf manyetik alana maruz bırakılmıştır) ve içinde Su-Al₂O₃ nano akışkan bulunan bir oyukta MHD doğal taşınım etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Sürekli, iki boyutlu, laminar, radyasyon etkisi ile Joule ısıtma etkileri ihmal edilen problem Patankar's SIMPLE algoritmasını kullanılarak kontrol hacim yöntemi yardımıyla çözülmüştür. Ha sayısının artmasının ısı transferi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu ve ısı transferi artmasının Ra = 10⁵ değeri hariç bütün Ra değerleri için doğru orantılı bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Freidoonimehr vd. [81], nano akışkan içinde geçirgen ve gergin bir dik duvardan geçen kararsız MHD doğal taşınım akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Adi diferansiyel denklemler, çekim tekniğine dayanan dördüncü mertebe Runge-Kutta metodunun kullanılmasıyla nümerik olarak çözmüşlerdir. Sonuçları, nano parçacık hacim oranı, kararsızlık parametresi, manyetik parametre ve emme parametresi gibi bazı parametrelerin etkisini; yüzey sürtünme katsayısı, dört farklı nano parçacık etkisi, yerel Nu sayısı, hız bileşenleri ve sıcaklık dağılımları için grafik olarak tartışmışlardır. Nano parçacık olarak seçilen Al₂O₃ ve Cu'nun yüzey sürtünme katsayısının minimum ve maksimum değerinin elde edildiği ve ayrıca, seçilen Cu ve TiO₂ nano parçacıklarından sırasıyla en büyük ve en küçük yerel Nu değerinin elde edildiğinin vurgulamışlardır.

Mahmoudi vd. [82], trapez bir geometride sabit manyetik alan etkisinde Cu-su nanoakışkanı kullanarak doğal taşınım ısı transferi ve entropi üretimini sayısal olarak incelemişlerdir. Yönetici denklemlerin çözümü için kontrol hacim yöntemi kullanılırken, basınç çözümleri için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Hesaplamaları farklı Ra sayısı, Ha sayısı ($0 \leq Ha \leq 100$) ve nano parçacık hacim oranı ($0 \leq \phi \leq 0.05$) için gerçekleştirmişlerdir. Nano parçacık katkısıyla entropinin azaldığı ve genellikle manyetik alanın artmasıyla entropi üretiminin arttığını tespit etmişlerdir.

Sheikholeslami vd. [83], Lattice Boltzman Metodunu (LBM) kullanarak yarı halka bir kanal içinde Al_2O_3 -su nano akışın ısı transferi üzerinde MHD etkilerini nümerik olarak incelemişlerdir. Nanoakışın viskozitesi ve termal iletkenlik etkisini Koo-Kleinstreuer-Li (KKL) bağıntısı ile tespit etmişlerdir. Nümerik incelemeyi Ha sayısı, Ra sayısı ve nano parçacık miktarı gibi farklı parametreler için gerçekleştirmişlerdir. Nanoparçacık miktarının artmasıyla Nu sayısının arttığı ve Ra sayısının Ha sayısının azalan bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılmıştır.

Sheikholeslami vd. [84], kontrol hacmine dayalı sonlu elemanlar metodunu, gözenekli bir ortam içinde su temelli nanoakışkan radyatif ve konvektif ısı transferini simüle etmek için uygulamışlardır. Gözeneksiz ortam için Darcy olmayan modeli kullanmışlardır. Ha sayısı, nanoakışkan hacim oranı, radyasyon parametresi (Rd), Darcy sayısı, dalgalanma sayısı ve nanoakışkan davranışı üzerinde Rayleigh sayısının etkileri gösterilmiştir. Nanoakışkanın termal iletkenliği, önceki deneysel bağıntı ile tahmin edilmiştir. Veriler, sıcaklık değişiminin, Rayleigh ve Darcy sayısının artmasıyla arttığını, ϕ , Rd, Ha'nin yükselmesiyle azaldığını göstermektedir.

Literatürde, içinde nano parçacık bulunmayan saf akışkanların MHD doğal taşınım olarak çalışıldığı birçok çalışma mevcuttur. Yine bu çalışmalarda ısı transferinin, uygulanan manyetik alandan olumsuz etkilendiği görülmüştür. Bunlarla ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

Hasanuzzaman vd. [85], trapez bir geometride doğal taşınım üzerine manyetik alanın etkisini görmek için sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Geometrinin eğim açısı, Ha sayısı ve Ra sayısı gibi farklı parametrelerin etkisini görmek ve çözümü gerçekleştirmek için sonlu eleman metodunu kullanmışlardır. Ha sayısını (manyetik alan kuvvetini) arttırmak, oyukta akış gücü ve ısı transferini azalttığını belirtmişlerdir.

Kumar ve Singh [86], manyetik alan altında yarı-sonsuz dikey bir plakada elektriksel iletkenliğe sahip kararsız (sürekli olmayan) bir akış için bazı parametrelerin etkisini analiz

etmişlerdir. Problem Crank-Nicolson tipi implisit sonlu farklar metodu yardımıyla nümerik olarak çözülmüştür. Ortalama yüzey sürtünme katsayısının manyetik parametre ve manyetik Pr sayısı ile orantılı olarak arttığı, ancak ortalama Nu sayısının bu iki parametrenin artmasıyla azaldığı görülmüştür.

Afify [87], gözenekli (poroz) bir ortamda izotermal olmayan dikey bir plaka boyunca, Darcy olmayan MHD doğal taşınım üzerindeki akış olayını, termal tabakalaşma, Hartmann-Darcy sayısı ve viskozite değişiminin etkisini üç farklı akış modeli için nümerik olarak incelemiştir. Problem sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Çalışmada, yerel Nusselt sayısı, sıcaklık ve hız profilleri için sonuçlar sunulmuştur. Local Nu-Darcy sayısının, Ha sayısının artmasıyla azaldığını rapor etmiştir.

Öztop vd. [88], Galerkin sonlu eleman metodunu kullanarak bir oyuk içine yerleştirilmiş iki tane yarı silindirik izotermal borunun, doğal taşınım üzerinde manyetik alan etkisini incelemek amacıyla nümerik bir çalışma oluşturmuşlardır. Çalışmayı farklı Ha sayıları, Ra sayıları ve borular arasındaki mesafe için gerçekleştirmişlerdir. Oyukta kullanılan borular arasındaki mesafenin ısı ve akış alanını etkileyen önemli parametreler olduğunu ve Ha sayısı akış hareketini azaltırken, manyetik alanın ısı transferi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Di Piazza ve Ciofalo [89], karşıt kenarları diferansiyel olarak ısıtılmış içi sıvı metal ile dolu olan kübik bir oyukta, yerçekimine bağlı MHD doğal taşınım akışı üç boyutlu olarak CFX-4 ticari paket programı yardımıyla incelemişlerdir (100,200 ve 1000 olan Ha sayılarıyla) . Parametre olarak Pb-17Li kullanılmıştır. Elde edilen verilerin literatürdeki diğer verilerle uyumlu olduğunu ve artan Ha sayısının Nu sayısını azalttığı sonucuna varmışlardır.

Kahveci ve Öztuna [90], yatay olarak bir tarafı ısıtılmış, alt ve üst tarafı yalıtımlı ve orta yerine de bir duvar yerleştirilmiş bir oyukta MHD doğal taşınım ve ısı transferini analiz etmişlerdir. Yönetici denklemleri Polynominal Differantial Quadrature (PDQ) metoduyla iki boyutlu olarak çözmüşlerdir. Özellikle yüksek Ra sayıları için manyetik alanın, ısı transferi ve akışkanın önemli oranda bastırıldığını ve ortaya konulan duvarın, duvarın ısıtılmış tarafından uzaklaştırılmasıyla x-yönünde uygulanan manyetik alanın y-yönünde uygulanan manyetik alandan ısılattığı alan olarak daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Jha vd. [91], dikey iki paralel plakalı bir mikro kanalda MHD doğal taşınım etkisini araştırmışlardır. Ha sayısı, seyreltme parametresi, akış-duvar etkileşim gibi bazı

parametrelerin etkisi incelenmiştir. Seyreltme ve akış-duvar etkileşim parametrelerindeki artış akış hızını arttırırken Ha sayısındaki artışında akış hızının azalttığını, ayrıca yüzey sürtünme katsayısının Ha sayısı değerlerinin artmasıyla azaldığını ortaya koymuşlardır.

Sathiyamoorthy ve Chamkha [92], içinde elektriksel iletkenliğe sahip galyum bulunan bir oyukta doğal taşınım üzerinde manyetik alanın etkisini Penalty sonlu eleman yöntemiyle nümerik olarak incelemişlerdir. Kare oyuğun üst duvarı yalıtımlı, alt duvarı sıcak, diğer iki duvarı da lineer olarak ısıtılmış veya soğuk tutulmuştur. Her bir duvardaki Ha sayısının bir fonksiyonu olarak ortalama Nu sayısının etkisini gösteren değerler grafik olarak sunmuşlardır. Oyuktaki her hangi bir açı için manyetik alan uygulamasının oyuktaki taşınım ısı transferini azalttığı vurgulanmıştır.

Gajbhiye ve Eswaran [93], daraltılmış pürüzsüz dikdörtgen bir oyukta ısı transferi ve MHD akış simülasyonunu nümerik olarak araştırmışlardır. Problemde kullanılan yönetici denklemleri sonlu hacime dayalı ANUPARAVAHA programını kullanarak çözmüşlerdir. Oyuğun alt tarafı ısıtılırken üst taraf soğuk tutulmuş ve duvarları da izole edilmiştir. Manyetik alan hem dikey hem de yatay olarak uygulanmış ve uygulanan manyetik alanın bu iki durum için benzer etki gösterdiği tespit etmişlerdir. Ha sayısı 20 olduğu durumda akış hareketinin tamamen bastırıldığı, ayrıca Ra sayısının artmasıyla akış hızının arttığı, fakat Ha sayısının artmasıyla Nu sayısının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Dada ve Disu [94], iki dikey dalgalı duvar arasında gözenekli bir ortamda radyasyona maruz bırakılan viskoz sıkıştırılamaz bir MHD doğal taşınım akışın iki boyutlu ısı transferini araştırmışlardır. Diferansiyel denklemleri, diferansiyel dönüşüm metoduyla çözmüşlerdir. Sayısal hesaplamaların sonuçları, akışkanın sıvı ve ısı transferinin belirgin özelliklerini göstermek için grafik olarak sunulmuştur. Akışkan hızının Gr sayısı, termal radyasyon parametresi ve gözeneklilik parametresinin artmasıyla artarken, manyetik parametre ve ısı kaynağının artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Yazarlar, ayrıca sıcaklık profillerinin termal radyasyonunun artmasıyla arttığını fakat ısı kaynağındaki artışla azaldığını rapor etmişlerdir.

Pirmohammadi ve Ghassemi [95], içinde galyum bulunan eğimli kare bir oyuğun içinde taşınım ısı transferi üzerinde manyetik alanın etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Yönetici denklemleri çözmek için sonlu hacim kodu temeline dayanan PATANKAR's SIMPLER metodu kullanılmıştır. ısı transferi üzerinde Ha sayısı, Ra sayısını ve eğim açısının etkisi ile ilgili sonuçlar grafik olarak verilmiştir. Sonuç olarak, artan Ha sayısının taşınım ısı transferini azalttığını, $Ra = 10^5$ için Nu sayısının, eğim açısı

45° ye kadar arttığı ve 45° derecen sonra Nu sayısı değerinin azaldığı gözlemlenmiş ve $Ra = 10^5$, eğim açısı = 0 ve Ha sayısı = 70 değeri için ısı transferinin sadece iletim ile olduğu tespit edilmiştir.

1.1.5. MHD Karma Taşınım

Doğal ve zorlanmış taşınım arasındaki dikkate değer bir ısı transfer olayı da karma taşınım olayıdır. Açık ve kapalı oyuklar ile değişik kanal tiplerindeki MHD nano karma taşınım, doğal ve zorlanmış taşınımada adı geçen uygulama alanlarıyla uzun yıllardır araştırmacılar tarafından çalışılan bir konudur. Bu konu ile ilgili derlenen bazı çalışmaların sonuçları şöyle özetlenmiştir.

Selimefendigil ve Öztop [96], içi bakır-su nano akışkanla dolu, içinde dönen bir silindir olan üst kapağı hareketli kare bir oyukta MHD karma taşınımın etkisini incelemek için nümerik bir çalışma yapmışlardır. Yönetici denklemleri sonlu eleman metoduyla çözmüşlerdir. Akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerinde Ri sayısı, Ha sayısı, silindirin açısal dönme hızı ve nano parçacığın etkisi için akım çizgileri, izotermal profiller ve Nu sayısının dağılımlarını grafiksel olarak sunulmuştur. Ri sayısının artmasıyla ısı transferinin arttığını, Ha sayısının artmasıyla ortalama ısı transferinin azaldığını, eklenen nano parçacığın ısı transferini iyileştirdiği ve manyetik alanın alt duvarın sağ köşesine doğru ısı transferini arttırdığı için bunun yerel ısı transferini kontrol etmek için kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

Malvandi vd. [97], dikey bir halka boruda Al_2O_3 -su ile dolu nanoakışın MHD karma taşınım üzerinde nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Borunun iki tarafına ısı akısı uygulanmıştır. Nanoparçacık göçünün etkisini hesaplamak için Brownian hareket yöntemi kullanılmıştır. Isı transferi artırımında bir avantaj olarak görülen nanoakışın, manyetik alan varlığında ısı transferini azaltan bir parametre olduğu, fakat temel akışta Ha sayısının artmasıyla ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir.

Dhanai vd. [98], açılı bir silindir üzerinde hız ve termal kayma etkilerinin MHD karma taşınım nano akış ve ısı transferi karakteristiklerini nümerik olarak dördüncü mertebe Runga-Kutta-Felberg metodunu kullanarak çözmüşlerdir. Çalışmada, yüzeyde kayma sınır koşulu ve viskoz yayılma etkilerini birleştiren Buongiorno'nun nano akış modeli düşünülmüştür. Yüzey sürtünme, hız, sıcaklık ve ısı transferi gibi fiziksel karakteristikler grafik olarak verilmiştir. Isı transferi hızının termal kayma parametresinin

artmasıyla azaldığı ve yüzey sürtünme katsayısının manyetik alan ile arttığı sonucuna varmışlardır.

Literatürde içinde nano parçacık bulunmayan ($\phi = 0$) çeşitli akışkanların karma taşınım problemleri de bulunmaktadır. Farklı geometrilerle açıklanan bu çalışmalarda akışkan hareketi ve ısı transferinin uygulanan manyetik alan ile genel olarak azaldığı sonucuna varılmıştır. Bu araştırmacılar Nasrin ve Alim [99], dış duvarları yalıtılmış sekizgen bir oyukun içerisine ısı üreten bir boru yerleştirerek MHD doğal ve zorlanmış taşınım ile ilgili nümerik bir çalışma yapmışlardır. Nümerik çalışma Galerkin kontrol hacmi sonlu eleman metodu kullanılarak oluşturulmuştur. Ha sayısı, Joule (J) ısıtma parametresi ve Ri sayısının farklı değerleri için akışkanın maksimum sıcaklığı ve ortalama Nu sayısının izotermal ve akım çizgileri sunulmuştur. Joule ısıtmanın akım çizgileri üzerinde önemli bir rol oynadığı, Ha sayısının artmasıyla termal ısı tabakanın azaldığı ve ısı transfer hızının artan Ha sayısı ve Joule ısıtma parametresiyle azaldığı sonucuna varılmıştır.

Rahman vd. [100], alt tarafı açık bir oyuk olan yatay bir kanalda (ters T harfi şeklinde olan) çift pasif karma (double-diffuse) taşınım üzerinde joule ısıtma ve manyeto hidrodinamiğin ortak etkisini sonlu eleman metodunu kullanarak nümerik bir analiz oluşturmuşlardır. Çalışmada, akım ve sıcaklık çizgileri ile yoğunluk ve konsantrasyon üzerinde Ri sayısı, Ha sayısı, joule ısıtma, kaldırma oranı (Br) ve Le sayısının etkisi incelenmiştir. Le sayısının yoğunluk ve konsantrasyon konturları üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olurken, akım ve izotermal konturları üzerinde çok az etkiye sahip olduğunu, ayrıca ortalama Sherwood (Sh) sayısı açısından kütle transferinin Br ve Le sayısının artmasıyla arttığı ve Ha sayısı ile joule ısıtma parametresinin yükselmesiyle azaldığını gözlemlemişlerdir.

Ahmed vd. [101], yaptıkları sayısal çalışmada, kare bir oyukta karşıt sıcaklık gradyentleri ile sürgülü eğimli bir kapağın laminar manyetohidrodinamik akışa etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, oyukun alt ve üst kenarları izole edilirken, yan taraflarına üniform olmayan sıcaklık değişimleri tanımlanmıştır. Sonuçları, Richardson sayısı, duvarın eğim açısı ve Ha sayılarının belirli aralıklarındaki değerleri için elde etmişlerdir.

Pekmen ve Tezer-Sezgin [102], karşıt sınır eleman yöntemini kullanarak iki farklı geometri için nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir (biri ters basamak şeklinde olan oyuk, diğeri kademeli bir kanal). Farklı Re sayıları, manyetik Reynolds sayısı (Rem), Ha sayısı ve Ra sayısı için sonuçlar elde edilmiştir. Her iki problemde ortaya çıkan ana sonuç, Ha sayısı arttığında sınır tabaka oluşumu ve Rem 'deki artışla indüklenen manyetik

alandaki karışıklıkların artmasıdır. Ayrıca Nu ve Ra sayılarının orantılı olarak arttığını gözlemlemişlerdir.

Kefayati vd. [103], bir duvarı lineer olarak ısıtılan kapak-odaklı kare karşıt-kesitli bir oyukta MHD karma taşınım akış etkisini Lattice Boltzman metodu ile (LBM) çözmüşlerdir. Çalışmada $Ha = 0-100$ ve $Ri = 0.01-100$ olarak değiştirilmiştir. Isı transferinin Ri sayısının artmasıyla arttığını, fakat Ha sayısının artmasıyla Nu sayısı ve Ri sayısının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Kefayati [104], dış alt duvarından manyetik alan uygulanan sinüsoidal sınır şartına sahip ve iki tarafı adyabatik olan bir oyukta karma taşınım ısı ve kütle transferini sonlu fark Lattice Boltzman metodunu kullanarak incelemiştir. Isı ve kütle transferinin Ri ve Ha sayısındaki artışla azaldığı fakat kütle transferinin Lewis (Le) sayısının büyümesiyle arttığı anlaşılmıştır.

Alam ve Khan [105], içinde ısıtılmış dairesel bir engel bulunan alt ve üst bölgesi yalıtımlı ve çıkış bölgesi manyetik alana maruz bırakılan koni şeklindeki bir borunun içinde karma taşınım MHD etkilerini, Galerkin ağırlıklı artıklar sonlu eleman yöntemiyle nümerik olarak çözmüşlerdir. Ortalama akışkan sıcaklığının Ha sayısının artmasıyla artarken Ri sayısı ve Pr sayısının artmasıyla azaldığını ve ortalama Nu sayısının Ri sayısı ile artarken Ha sayısı ile azaldığını rapor etmişlerdir.

Mukhopadhyay ve Mandal [106], dik poroz bir plaka üzerinde sürekli sıkıştırılmaz MHD karma taşınım sınır tabaka üzerinde hız ve sıcaklık kayma etkisini incelemişlerdir. Adi diferansiyel denklemleri azaltmak için kısmi yönetici diferansiyel denklemler kullanılmış ve lineer olmayan denklemler içinde nümerik bir yöntem tercih edilmiştir. Isı transferi oranının termal kayma değerinin artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda ısı transferinin Pr sayısının artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir.

Rahman vd. [107], içinde küre şeklinde bir engel bulunan kapak odaklı kare bir oyukta akış ve ısı transferi üzerinde manyetik parametre ve joule ısıtma parametresinin (J) etkisini incelemişlerdir. Problemi sürekli akış şartlarında iki boyutlu olarak Galerkin sonlu eleman metoduyla nümerik olarak çözmüşlerdir. Oyuğun alt ve üst tarafı yalıtılmışken, yan kenarlarından biri sıcak diğeri soğuk tutulmuştur. Manyetik alan sıcak duvar tarafına dik olarak uygulanmıştır. Nümerik çalışma, farklı Ha sayısı, Ri sayısı, J parametresi, ortalama Nu sayısı, sıcaklık dağılımı ile oyuğun engelli ve engelsiz durumu için gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, artan Ha sayısının Nu sayısını azalttığı, en yüksek Nu

sayısı ve akış sıcaklığının engelli durum için elde edildiği ve J parametresinin artmasıyla ortalama sıcaklığın arttığı rapor edilmiştir.

Azad vd. [108], manyetik alan ve Joule ısıtma etkisi altında bir oyuğun içinde akış ve sıcaklık alanı elde etmek için sayısal bir çözüm oluşturmuşlardır. Oyuğun üst tarafı düz, alt tarafı kavisli ve girişi çıkışından daha büyük seçilmiştir. Laminer karma taşınım ısı transferinin yönetici denklemlerini çözmek için sonlu eleman metodu kullanılmıştır. Ha sayısı ve Joule parametresinin ısı transferini azalttığı ve daha büyük ısı transferi değerlerinin, daha büyük Ri sayısı ve Pr sayıları için elde edildiği sonucuna varılmıştır.



2. MATERYAL ve METOT

2.1. Manyetik Alan

Manyetik alan, motor, jeneratör ve transformatör gibi enerjinin bir şekilden başka bir şekle dönüşümü veya transferi için aracı olarak kullanılan temel bir kavramdır. Manyetik alanın bu makinalardaki görevi dört prensip ile açıklanır.

- Akım taşıyan bir iletken etrafında manyetik alan oluşur.
- Zamanla değişen bir manyetik alan eğer bir sargıyı keserse sargıda bir gerilim indüklenir. Bu olay *transformatör* prensibini açıklar.
- Akım taşıyan bir iletken manyetik alan içinde bulunursa iletken üzerinde bir kuvvet üretilir. Bu olay *motor* prensibini açıklar.
- Manyetik alan içindeki bir iletken hareket ederse üzerinde gerilim endüklenir. Bu olay da jeneratör prensibini açıklar.

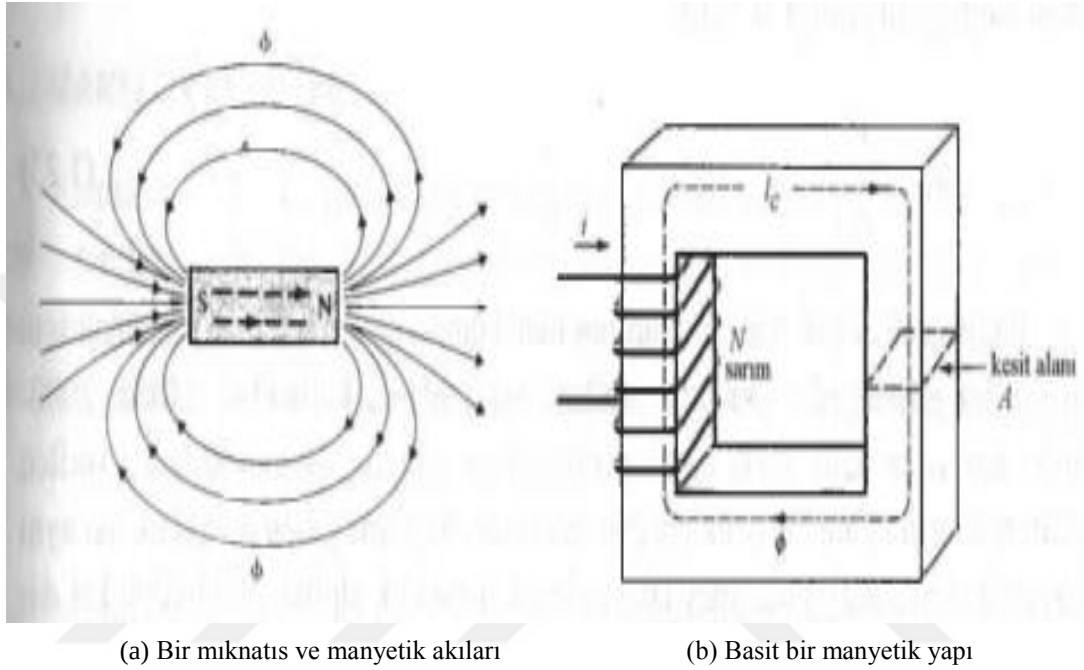
2.2. Manyetik Alanın Üretilmesi

Manyetik akı manyetik alanın başlıca karakteristiğidir. Manyetik akı, kuzey (N) ve güney (S) kutupları arasındaki kuvvet çizgileri olarak düşünülebilir. Manyetik akı ϕ sembolü ile gösterilir. SI sisteminde birimi Weberdir (Wb). Şekil 2.1 (a)'da gösterildiği gibi manyetik akı kuzey kutbundan çıkar ve güney kutbunun içine girer ve kuzey kutbuna döner. Diğer bir ifadeyle, manyetik akı veya manyetik kuvvet çizgileri sürekli ve kapalı bir döngü oluşturur. Bir nüve etrafında sarılı sargıdan geçen akım tarafından manyetik alanın üretilmesini açıklayan temel kanun Denklem 2.1'de verilen *Ampere Kanunu*'dur [109].

$$\oint H \cdot dI = I_{net} \quad (2.1)$$

Burada H manyetik alan şiddeti olup I_{net} akımı tarafından üretilir. SI sisteminde I amper (A) ve H amper-sarım/metre olarak ölçülür. Şekil 2.1 (b), dikdörtgen nüveyi ve nüvenin bir kolu üzerinde sarılı N sarımlı bir sargı bulunan manyetik yapıyı göstermektedir. Nüve, demir veya ferromanyetik malzemeler olarak bilinen belirli diğer

ferromanyetik metallerin alaşımından yapılmış ise, akım tarafından üretilen bütün manyetik akı halleri nüve içinde dolaşacaktır. Böylelikle, Ampere Kanunu'ndaki integralin yolu nüvenin ortalama yol uzunluğu l_c olacaktır. Akım taşıyan sargı telleri integralin yolunu N defa keser [109]. Böylece integral alanı içinden geçen akım I_{net} , manyetik alan şiddeti ile manyetik alan yolu uzunluğunun çarpımına eşit olur.



şekil 2.1. Manyetik akının retilmesi [109]

Bu tanımlamalardan sonra Ampere Kanunu (Denklem 2.2)

$$H l_c = N i \quad (2.2)$$

olarak yazılabilir. Uygulanan akım yüzünden nüve içinde üretilen manyetik alan şiddetinin genliği denklemi Denklem 2.2 düzenlenerek Denklem 2.3 elde edilir,

$$H = \frac{N i}{l_c} \quad (2.3)$$

olarak yazılır. Manyetik alan şiddeti H, bir anlamda akımın manyetik alanı meydana getirmek için gösterdiği çabanın bir ölçüsüdür. Manyetik alan şiddeti H ve bir malzemede birim kesitteki manyetik akı yoğunluğu B arasındaki ilişki Denklem 2.4'teki gibidir.

$$B = \mu H \quad (2.4)$$

Denklemleri ile verilir. Burada μ malzemenin manyetik geçirgenliği (Henry/m), B manyetik akı yoğunluğu (Wb/m^2) dir. Manyetik geçirgenlik malzeme içerisinde manyetik alanın geçişini kolaylaştırır. Boşluğun manyetik geçirgenliği μ_0 ile temsil edilir ve değeri bir sabittir ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$) [109].

Herhangi bir malzemenin geçirgenliği ile havanın geçirgenliğinin oranlanması bağlı geçirgenliği μ_r verir (Denklem 2.5).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.5)$$

Bağıl geçirgenlik malzemenin mıknatıslanabilme özelliğini kıyaslamak için uygun bir göstergedir. Örneğin modern makinalarda kullanılan çelikler 2000-6000 kat daha fazla bağlı geçirgenliğe sahiptir. Bunun anlamı, verilen akım miktarına göre bir çelik parçası üzerinde meydana gelen manyetik akı aynı boyuttaki hava aralığında meydana gelecek manyetik akıdan 2000-6000 kat daha fazladır. Havanın geçirgenliği ile boşluğun geçirgenliği aynıdır. Bu açıklamalardan sonra açıkça görülüyor ki motor veya transformatör nüvelerinde yer alan metaller, manyetik akının makine nüvesinde yoğunlaştırılması veya arttırılması yönünde çok önemli rol oynar. Demirin geçirgenliği havaya göre çok daha yüksek olduğu için Şekil 2.1 (b) 'deki manyetik yapıda akının büyük çoğunluğu nüve içerisinde kalacaktır. Çok az bir kısmı daha düşük geçirgenliğe sahip hava üzerinden yolunu tamamlayacaktır. Demir nüveden ayrılan küçük miktardaki akıya transformatörde kaçak akı denilir.

Şekil 2.1 (b)'deki gibi bir nüvede akı yoğunluğunun genliği Denklem 2.6'daki gibi verilir.

$$B = \mu H = \frac{\mu N i}{l_c} \quad (2.6)$$

Verilen bir nüve kesit yüzeyinden geçen toplam akı aşağıdaki gibi Denklem 2.7'de gösterilir.

$$\phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.7)$$

Burada dA birim yüzeyindeki artıştır. Eğer akı vektörü, $\mathbf{A}$ yüzeyinin düzlemine dik ise akı yoğunluğunun alan içindeki düzgün akı denklemi aşağıda Denklem 2.8’de ifade edilir.

$$\phi = BA \quad (2.8)$$

Sonuç olarak Şekil 2.1 (b)’deki manyetik devrede sargıdan geçen i akımından dolayı nüvede meydana gelen toplam akı Denklem 2.9’daki gibi yazılır [109].

$$\phi = BA = \frac{\mu N i A}{l_c} \quad (2.9)$$

Burada A nüve kesit alanını göstermektedir.

2.3. Manyetik Devreler

Denklem (2.6) ile ifade edilen manyetik akı, nüve etrafında sarılı sargıdan geçen akım tarafından üretilmektedir. Bu olay elektrik devresinde gerilimin devreden akım oluşumuna neden olmasına benzerdir. Şekil 2.2’de basit bir elektrik devresi ve bir manyetik devre verilmiştir. Şekil 2.2 (a)’daki basit bir elektrik devresinde gerilim aşağıdaki denklem yani Ohm Kanunu ($V = IR$) ile tanımlanır.

Elektrik devresinde gerilim veya elektromotor kuvvet (emk) akımın akmasını sağlar. Direnç ise devre akımını sınırlar. Elektrik devresine benzer olan Şekil 2.2 (b)’deki bir manyetik devrede ise gerilimin yerini manyetomotor kuvvet (MMK) alır. Bir sargıdan geçen akım ve sarım sayısı MMK (F) değerini Denklem 2.10 belirler.

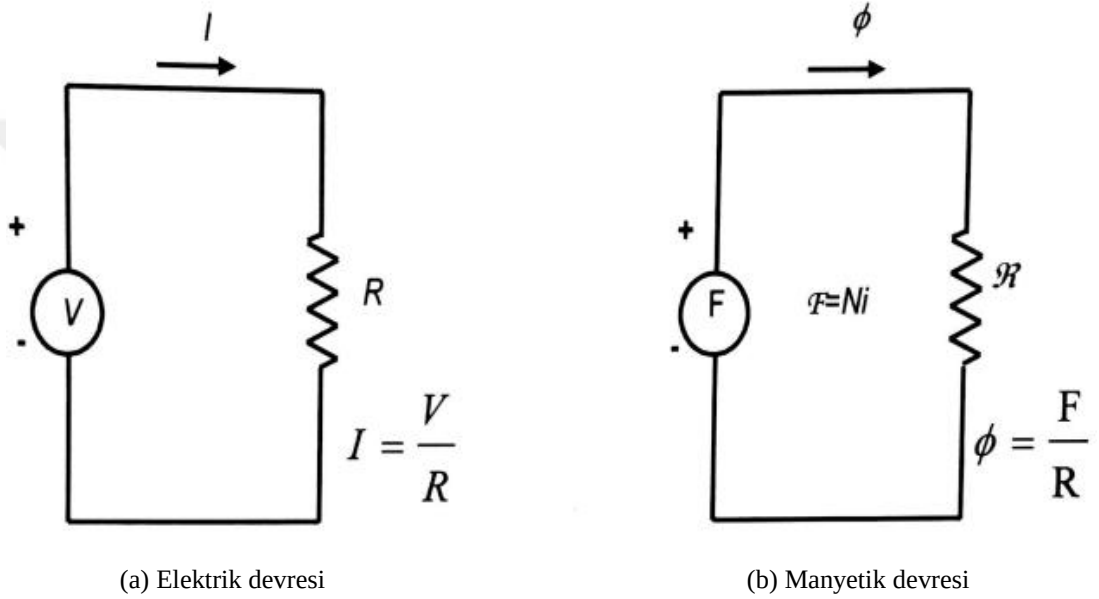
$$F = Ni \text{ (ampersarım)} \quad (2.10)$$

Manyetik devrede, uygulanan mmk devrede bir akı (ϕ) üretilmesini sağlar. MMK ile akı arasındaki ilişkiyi Denklem 2.11 verir.

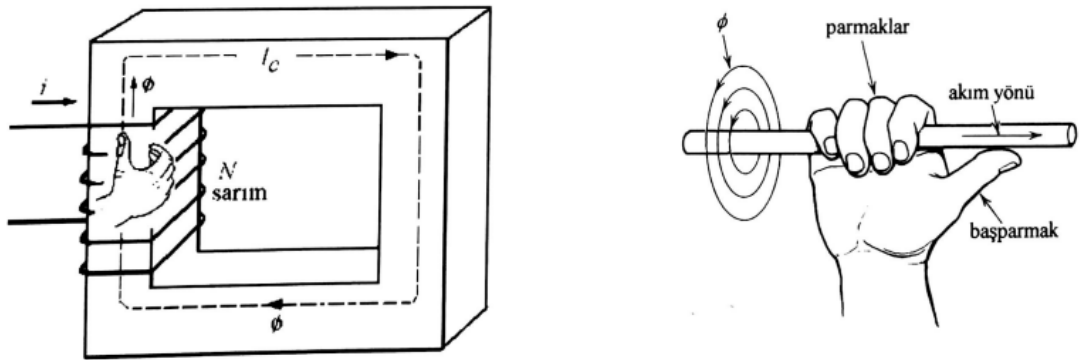
$$F = \phi R \quad (2.11)$$

ile ifade edilir. Burada R , relüktansı temsil eder ve birimi Ampere-sarım/Wb dir. Relüktans akıyı sınırlar, bu elektrik devresindeki dirence benzerdir.

Elektrik devresindeki gerilim kaynağına benzer olarak manyetik devrede MMK'nın da bir potansiyeli vardır. MMK kaynağının pozitif ucu manyetik akının çıktığı uçtur, negatif ucu ise manyetik akının tekrar kaynağa girdiği uçtur. MMK'nın yönü *sağ el kuralının* bir sargıya uyarlanmış şeklinden elde edilebilir. Şekil 2.3 (a)'daki manyetik yapıda sağ el parmakları sargıdan geçen akım yönünde sargıyı kavrar ise parmaklara dik tutulan başparmak akının ve dolayısıyla MMK'nın yönünü gösterir [109].



Şekil 2.2. Elektrik ve manyetik devrelerin karşılaştırılması [109]



(a) Bir sargıya sağ el kuralının uygulanması

(b) Bir iletkeni sağ el kuralının Uygulanması

Şekil 2.3. Bir manyetik devrede mmk kaynağı polaritesinin belirlenmesi [109]

Şekil 2.3 (b)'de gösterildiği gibi iletken sağ el ile tutulur ve başparmak akımın yönünü gösterirse diğer parmaklar da akımın yönünü gösterir.

Elektrik devresinde direncin tersi olarak ifade edilen kondüktansın da manyetik devrede bir karşılığı olup relüktansın tersidir ve permeans olarak adlandırılır. Permeans ile relüktans arasındaki ilişkiyi Denklem 2.12 verir.

$$P = 1/R \quad (2.12)$$

Olup, MMK ile akı arasındaki ilişki de,

ϕ = FP Olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.1 (b)'deki manyetik yapının relüktansını bulmak için önce nüve içindeki akı denkleminde yararlanılır (Denklem 2.13 ve 2.14).

$$\phi = Ni \frac{\mu A}{l_c} \quad (2.13)$$

$$\phi = F \frac{\mu A}{l_c} \quad (2.14)$$

Denklem 2.11 ve 2.14' ten nüvenin relüktansı aşağıda Denklem 2.15 ile yazılabilir.

$$R = \frac{l_c}{\mu A} \quad (2.15)$$

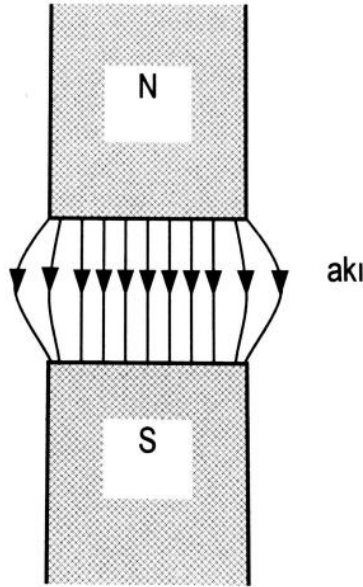
Manyetik devredeki relüktanslar için de elektrik devresindeki dirençlere uygulanan kurallar geçerlidir. Seri manyetik devrenin eşdeğer relüktansı aşağıda yazıldığı gibi Denklem 2.16 ile ifade edilir.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (2.16)$$

Bir nüvede manyetik akımın hesaplanması için hep kabüller yapılır ve bulunan değerler hep yaklaşık değerler olup yaklaşık %5 hata ile sonuçlar elde edilir [109]. Hesap sonucunun hassasiyetini etkileyen doğal nedenler vardır:

- Manyetik devrede bütün akımın bir manyetik nüve içinde tutulduğu varsayılır. Bu kabul çok gerçekçi değildir. Akımın bir kısmı havadan devresini tamamlar. Bu akıya *kaçak akı* denilmektedir.

- Relüktansın hesaplanmasında akının nüvenin her yerine dengeli dağıldığı kabul edilir. Nüve köşelerinde bu varsayımın çok doğru olmadığı bilinmektedir.
- Ferromanyetik malzemelerde geçirgenlik μ , malzeme içindeki akının artması ile non lineere şeklinde değişir. Sabit kabul edilen geçirgenlik relüktans değeri hesaplamanın sonucuna etki eder [109].
- Nüve içinde hava aralıkları var ise hava aralığının etkin kesit alan değeri, nüve kesit alanının her iki tarafından taşarak nüvenin kesit alanından daha geniş olacaktır. Hava aralığı kesit alanındaki bu fazlalık, hava aralığındaki manyetik alanın *saçak etkisi* tarafından meydana getirilir. Bu durum aşağıdaki Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



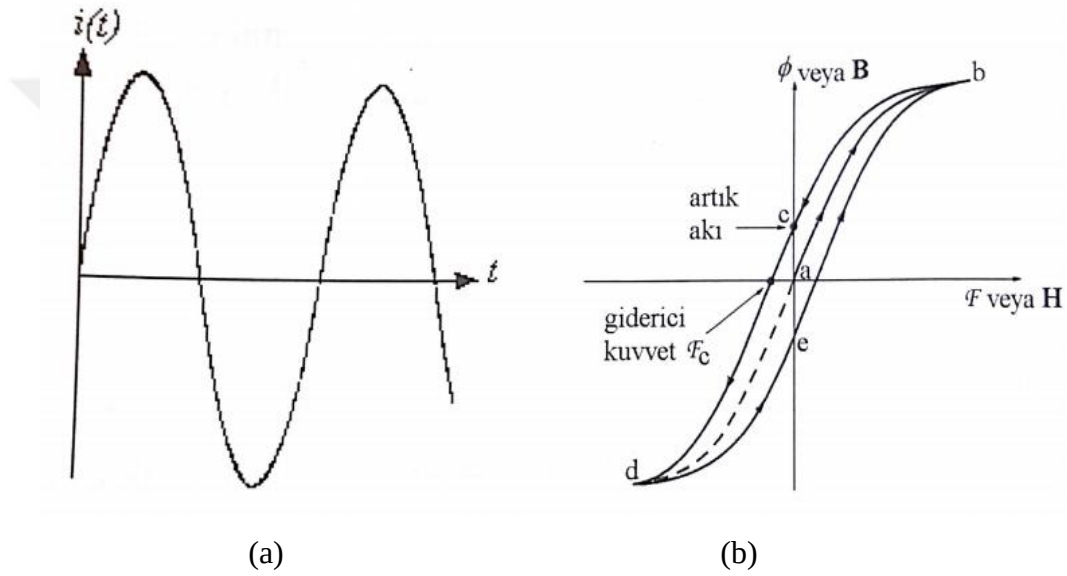
Şekil 2.4. Hava aralığındaki manyetik akının saçak etkisi [109]

2.4. Histerisis Çevrimi

Nüve üzerinde başlangıçta herhangi bir akının olmadığı kabul edilirse, uygulanan akım artırılırken nüvede oluşan akı Şekil (2.5) b’deki a-b yolunu izler. Ancak akım geriye doğru uzatıldığında akı yükselirken izlediği a-b yolunun yerine b-c-d yolunu izleyecektir. Akım tekrar artırılırsa nüve akısı d-e-b yolunu takip edecektir. Nüvede meydana gelen akının değeri sadece sargılara uygulanan akıma değil aynı zamanda nüvedeki akının daha önceki durumlarına bağlıdır. Akının önceki durumlardaki değerleri ve akının akı yollarını yeniden aynen izleyememesi *histerisis* olarak tanımlanır. Uygulanan akımın Şekil 2.5

(a)'daki sinüs alternatif akım gibi değişimine göre Şekil (2.5) b'deki gibi akının b-c-d-e-b yolunu izlemesi *histerisis çevrimi* olarak adlandırılır.

Eğer büyük bir MMK nüveye önce uygulanırsa ve sonra MMK kaldırılırsa nüvedeki akının yolu a-b-c olacaktır. MMK kaldırıldıktan sonrada nüvede akı kalacaktır, akı değeri sıfıra gitmeyecektir. Bu akı *kalıcı akı* veya *artık mıknatısiyet* olarak adlandırılır. Kalıcı mıknatıslar tamamen bu olaya göre üretilirler. Nüve içindeki akının sıfır yapılabilmesi için giderici MMK F_c (coercive force) olarak bilinen bir MMK'nın mevcut nüve akısına zıt yönde uygulanması gerekmektedir.



Şekil 2.5. (a) Nüveye uygulanan akım (b) histerisis çevrimi [109]

Histerisis olayındaki anahtar şudur. Harici manyetik alan kaldırıldığı zaman domenler (ferromagnetik malzeme içindeki küçük mıknatıslar) tekrar tamamen gelişigüzel hale dönmezler. Domenleri yönlendirmek için bir enerji gereklidir ve bu enerji harici manyetik alan kaynağı tarafından sağlanmaktadır. Harici manyetik alan kaldırıldığı zaman bütün domainlerin yönlerini eski hallerine döndürmek için bir enerji kaynağı kalmamıştır. Artık demir parçası bir kalıcı mıknatıs olmuştur. Çünkü domainlerin belirli yönde dizilimi devamlı haldedir.

2.5. Zamanla Değişen Manyetik Alanın İndüklediği Gerilim, Faraday Kanunu

Bu kısım manyetik alanın indüksiyon etkisi ile ilgilidir. Burada dikkate alınacak ilk etki de Faraday kanunu olarak bilinmektedir ve transformatörün de çalışma esasıdır.

Faraday kanunu, eğer akı bir sargının bir sarımını keser ise bu sarım üzerinde gerilim indüklenir demektir. Gerilim, akının zamanla değişim oranına eşittir [109]. Bu değişim sadece akının sinüsoidal olması ile sağlanıyorsa transformatör gerilimi; eğer sargı ve manyetik birbiriyle bağlı hareket yaparak bir akı değişimi oluyorsa hareket gerilimi indüklenen gerilimin adını belirler. Aşağıdaki gibi Denklem 2.17 ile ifade edilir.

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.17)$$

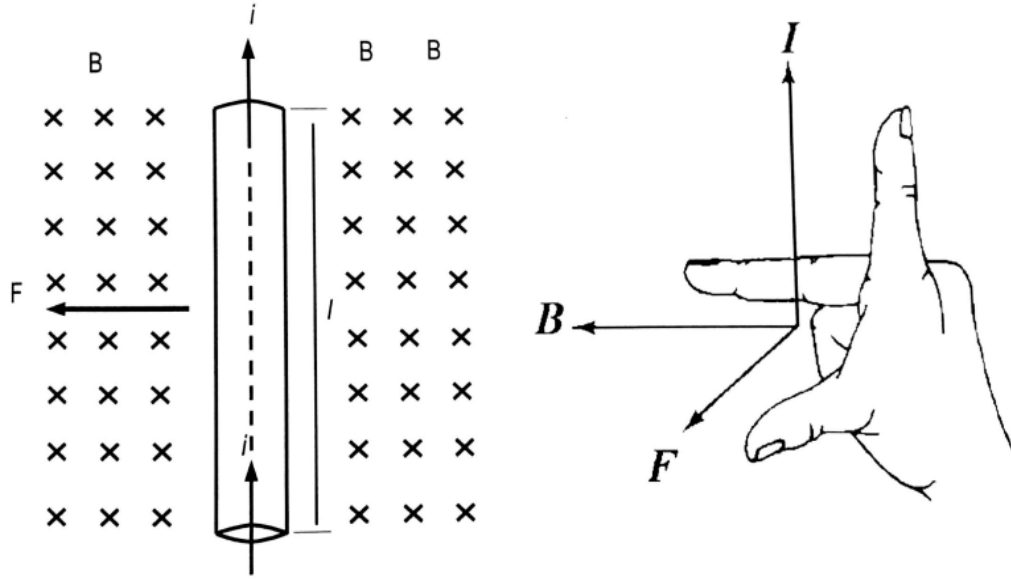
Burada e bir sargının bir sarımındaki endüklenen gerilimdir. ϕ , sarımları kesen akıdır. Eğer sargı N sarımlı (turlu) ise ve aynı akı bütün sarımları kesiyorsa sargının uçlarında endüklenen gerilim aşağıdaki gibi Denklem 2.18 ile ifade edilir.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.18)$$

Eşitlikteki (-) negatif işareti Lenz kanununun bir ifadesidir. Lenz kanununa göre, bir sargıda indüklenen gerilim, eğer sargı uçları kısa devre edilirse sargıdan bir akım dolaştıracak ve akımın üreteceği akı orijinal akının değişimine zıt yönde olacaktır. Endüklenen gerilim kendisini oluşturan değişikliğe karşı koyduğu için denklemde negatif işareti kullanılır ve zıt elektromotor kuvvet (emk) denilir.

2.6. Elektromanyetik Kuvvet

Manyetik alanın ikinci önemli etkisi çevrelediği iletkenler üzerinedir. Manyetik alan, manyetik alan içerisinde olan ve akım taşıyan bir iletken üzerinde bir kuvvet indükler. Bu kuvvete elektromanyetik kuvvet veya Lorentz kuvveti denir [109].



Şekil 2.6. Manyetik alan içindeki akım taşıyan bir iletken [109]

Şekil 2.6 akı yoğunluğunun düzgün dağılan manyetik akısı içinde bulunan bir iletkeni temsil etmektedir. B akı yoğunluğunun yönü sola doğrudur. İçinden i akımı geçen iletkenin uzunluğu l ile temsil edilmektedir. İletkende indüklenen kuvvet i iletken içindeki akım (amper), l iletkenin uzunluğudur (metre) ve B manyetik akı yoğunluğu vektörüdür (Denklem 2.19).

$$F = i(l \times B) \quad (2.19)$$

Endüklenen kuvvetin yönü sağ el kuralı ile belirlenir. Eğer sağ elin işaret parmağı I vektörünün yönünü gösterir ise ve orta parmak B ise akı yoğunluğu vektörünün yönünü gösterir ise, başparmak iletkende meydana gelen kuvvetin yönünü gösterecektir. Bu kuvvetin genliği aşağıdaki gibi Denklem 2.20 ile verilir.

$$F = ilB \sin\theta \quad (2.20)$$

Burada θ , iletken ile akı yoğunluğu vektörü arasındaki açıdır.

2.7. Ferromanyetik Nüvedeki Enerji Kayıpları

Bu tür nüvelerde Histerisis ve girdap akımı kayıpları olmak üzere iki çeşit kayıp enerji meydana gelmektedir.

2.7.1. Histerisis kayıpları

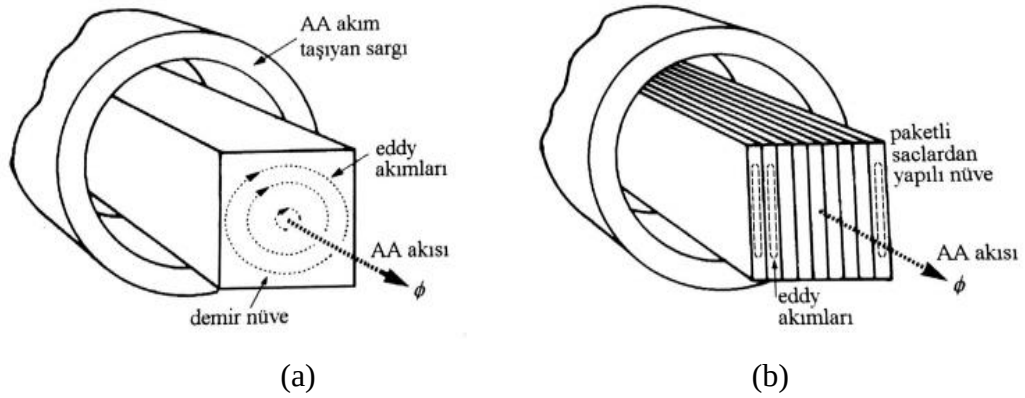
Demir içinde domenlerin yönünü değiştirmek için gerçekte bir enerjiye ihtiyaç duyulması, bütün makinalarda ve transformatörlerde ortak olan bir enerji kaybına neden olmaktadır. Bir demir nüveye uygulanan alternatif akımın her bir periyodu boyunca domenlerin yön değiştirmesi için harcanan enerjiye *histerisis kayıpları* denir. Histerisis çevrimini nüveye uygulanan alternatif akım şekillendirir histerisis çevriminin alanı her bir periyottaki enerji kayıpları ile orantılıdır. Dar bir aralıktaki histerisis çevrimi düşük histerisis kayıplarını, geniş bir aralıktaki histerisis çevrimi yüksek histerisis kayıplarını göstermektedir. Şekil 2.5 aynı zamanda histerisis kayıplarını temsil etmektedir. Bu kayıplar aşağıdaki Denklem 2.21 ile gösterilir [109].

$$P_h = K_h f B_m^n V \quad (2.21)$$

Burada P_h histerisis kayıplardır (W), K_h bir sabit olup manyetik malzemeye bağlıdır, n değeri deneysel olarak bulunur ve 1.5-2.5 arasında alınır, f , frekans (Hz), V nüvenin hacmidir (m^3).

2.7.2. Eddy (Girdap) Akımı Kayıpları

Nüve içindeki kayıpların diğer bir kaynağı da nüve içinde değişen manyetik alan tarafından üretilir ve *eddy akımı kayıpları* olarak adlandırılır. Faraday kanununa göre, zamanla değişen akı nüve etrafına sarılı sargılarda bir gerilim endüklediği gibi manyetik bir nüve içerisinde de bir gerilim endükler. Bu gerilimler Şekil 2.7 (a) 'da gösterildiği gibi nüve içerisinde akımın bir girdap halka şeklinde dolaşmasına neden olur. Bu olay su akıntısındaki girdaplara da benzetilir ve ismini de oradan almıştır.



Şekil 2.7. (a) Blok demir nüvedeki girdap akımları (b) paketli saclardan yapılmış nüvedeki girdap akımları [109]

Girdap akımları demir gibi iletkenlik özelliği olan malzemeler içinde dolaşır ve enerji nüve içinde harcanır. Kayıp enerji demir nüvenin ısınmasına gider. Girdap akımları yüzünden kaybolan enerji miktarı girdap akımlarının nüve içerisinde izledikleri yolların elektriksel iletkenliği ile orantılıdır. Nüvenin iletkenliğini azaltmak amacıyla girdap akımlarının yolu uzun kesiti dar olsun diye, alternatif akım ile değişken akıya maruz kalan ferromanyetik nüvenin izole edilmiş ince levhalardan yapılması klasik bir tekniktir Şekil 2.7 (b). Levhalar silisli saclardan imal edilir ki manyetik geçirgenlik etkilenmeden elektriksel iletkenlik düşürülsün.

Bu amaçla çalışmamızda deneylerde kullanılan nüve, silisli saclardan imal edilmesi tercih edilmiştir. Levhalar arasında yalıtım malzemesi olarak silis kullanılmaktadır [109]. Silisli saclardan yapılan nüvede girdap akımları için direnç arttırılmış olur ve böylece girdap akımı kayıpları azaltılır. Ayrıca girdap akım kayıpları uyartım frekansının karesi ve akı yoğunluğunun kareleri ile orantılıdır. Birim hacim başına ve nüvenin toplam girdap akımı güç kayıpları aşağıda sırasıyla Denklem 2.22 ve Denklem 2.23 ile gösterilir.

$$P_e = K_e(f \cdot B_m \cdot t_1)^2 \text{ (W/m}^3\text{)} \quad (2.22)$$

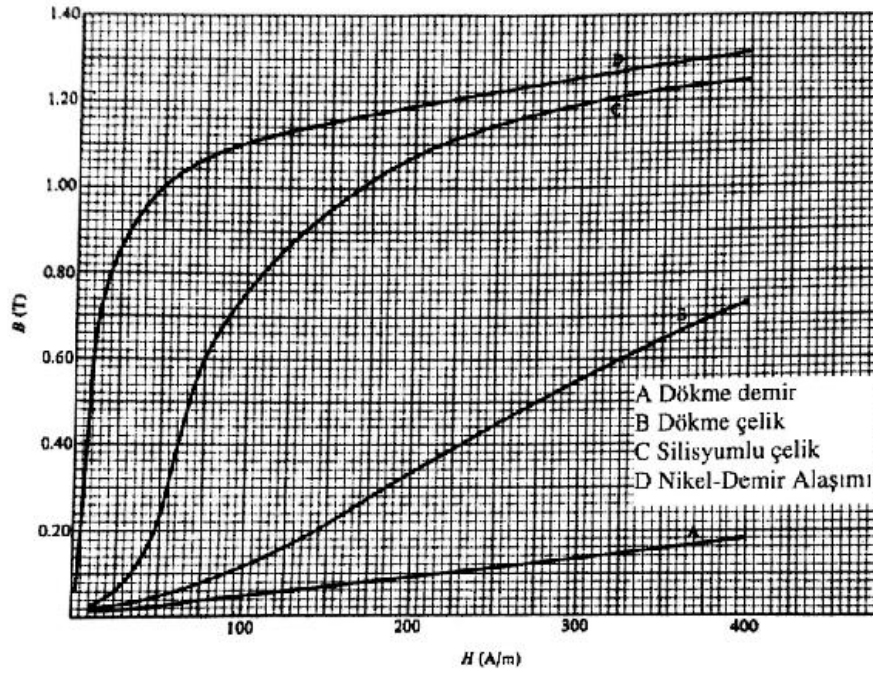
$$P_e = K_e(f \cdot B_m \cdot t_1)^2 V \text{ (W)} \quad (2.23)$$

Burada t_1 levha (sac) kalınlığı, K_e sabit olup manyetik malzemenin iletkenliğine bağlıdır. V manyetik nüvenin hacmidir (m^3).

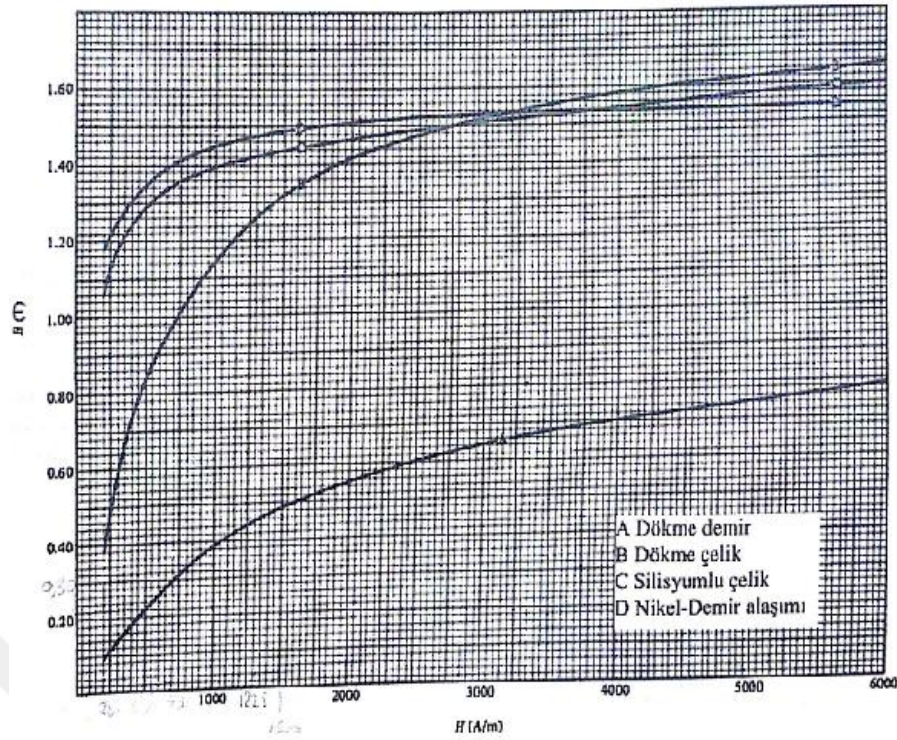
Hem histerisis hem de girdap akımı kayıpları nüvenin ısınmasına neden olurlar. Bu iki kayıp makine ve transformator tasarımında özellikle dikkate alınmalıdır [109].

2.8. B-H Eğrisi

Bir ferromanyetik malzeme, üzerine artan H değerleri uygulayarak ve karşılık gelen B akı yoğunluğu değerlerini ölçerek denenebilir. Bazı genel ferromanyetik malzemeler için manyetizasyon eğrileri ya da basitçe B - H eğrileri aşağıda Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da verilmiştir. Bağıl geçirgenlik, $\mu_r = B/\mu_0 H$ eşitliğinin kullanılmasıyla B - H eğrisinden hesaplanabilir [110].



Şekil 2.8. $H < 400$ A/m için B - H eğrileri [110]



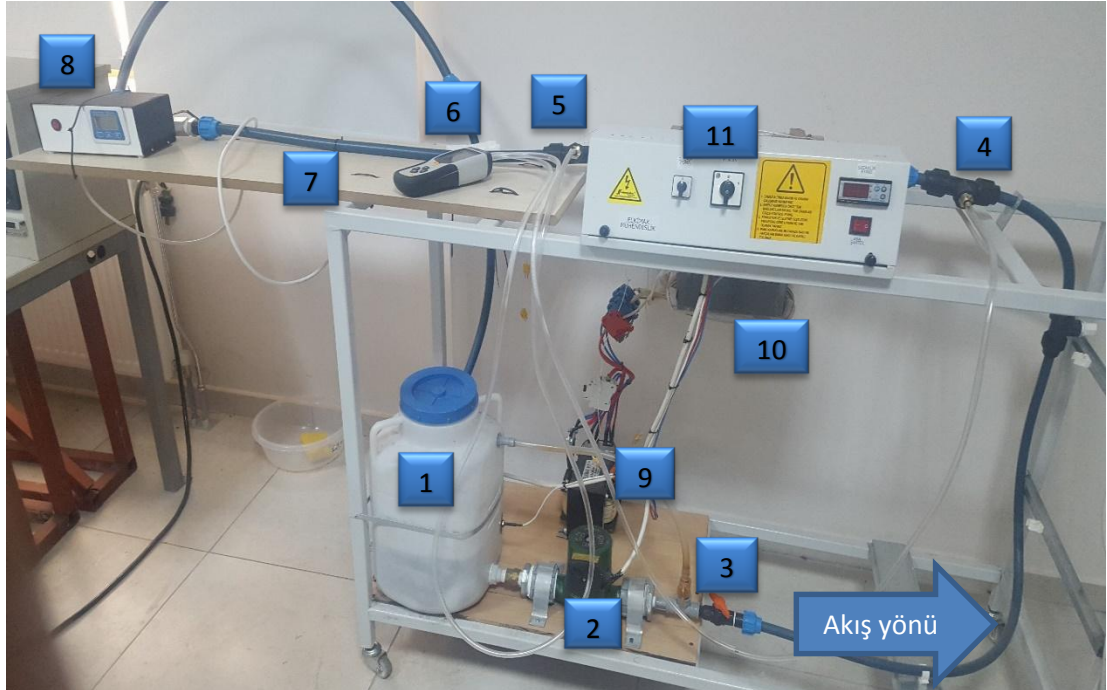
Şekil 2.9. $H > 400$ A/m için B-H eğrileri [110]

Buraya kadar olan kısımda çalışmanın teori kısmı açıklanmıştı. Bundan sonraki aşamada, tezin materyal ve metot kısmında yer alan deney setinin tasarımı, imalatı ve sayısal modelleme tanıtılacaktır. Kullanılan ölçü aletleri ve özelliklerine ayrıntılı olarak yer verilecektir. Aynı zamanda sayısal modellemeye ait ağ yapısı, ağ sayısı, ağ kalitesi ve sınır şartları detaylı olarak verilecektir. Akışkan ve katı malzemeye ait termodinamik ve elektriksel özelliklere de değinilecektir.

2.9. Deney Düzenegi

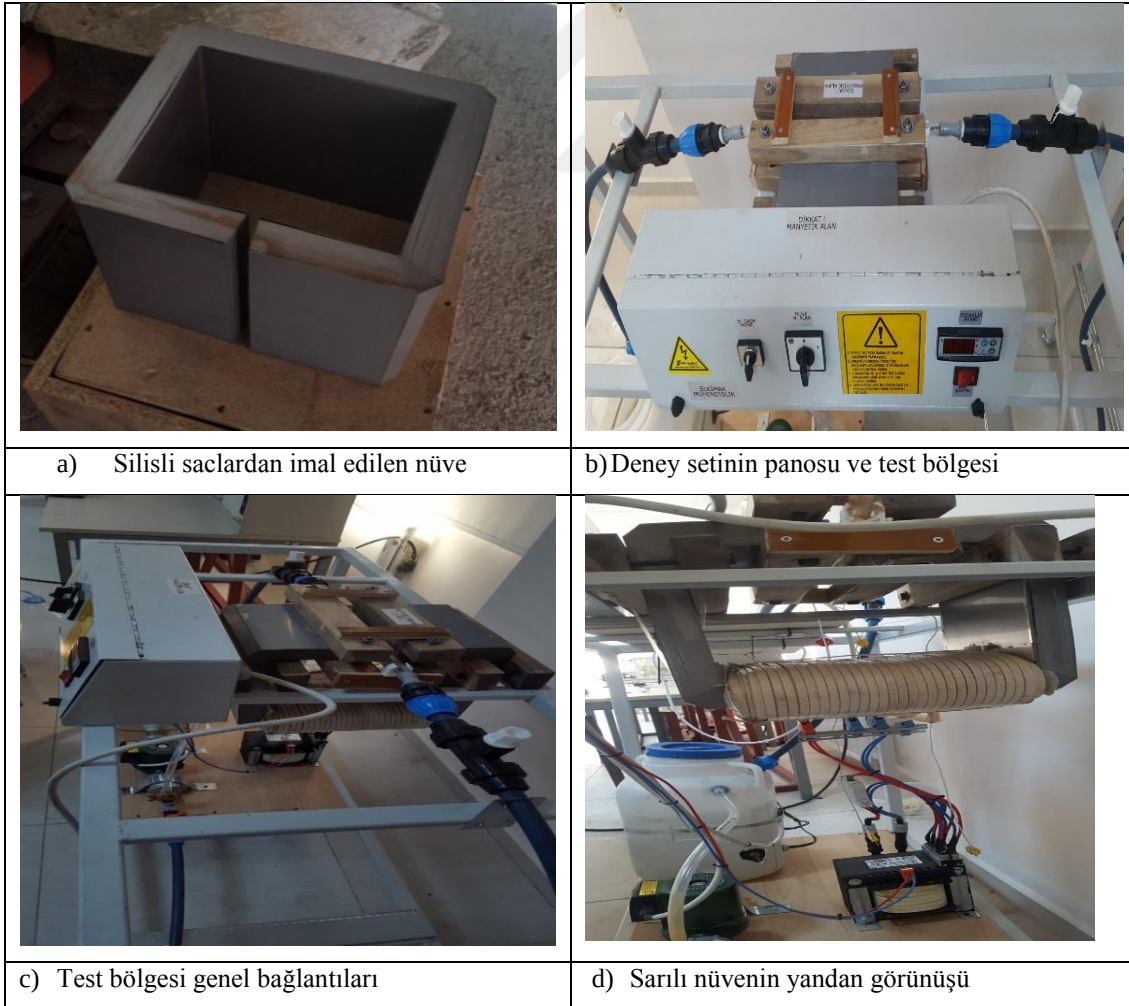
Deneylerde kullanılan deney seti Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Deney seti genel olarak bir tane akışkan deposu, bir tane üzerinde sargılar bulunan açık uçlu çekirdek nüve, sirkulasyon pompası ve akışkan taşıyıcı silindirik borulardan oluşmaktadır. Depoya doldurulacak farklı termo-fiziksel özellikteki akışkan pompa vasıtasıyla test bölgesi denilen 200 mm uzunluğa ve 20 mm genişliğe sahip olan çekirdek nüve arasından geçerek kapalı bir sistemle tekrar tanka geri dönmektedir. Çekirdek nüve girişi ve çıkışında sökülebilen bağlantı elemanlarıyla değişik çaptaki borular bağlanabilmektedir. Bu borulardan geçen akışkana, çekirdek nüveye sarılacak sargılar vasıtasıyla dış manyetik alan oluşturulmuştur. Manyetik alan şiddeti yaklaşık 1 Tesla (T) şiddetinde olacak şekilde

boşluklu çekirdek nüve imal edilmiş ve nüveye sargılar bağlanmıştır. Manyetik alan şiddeti test bölgesinde (çekirdek nüve içerisinden geçen boru) borunun merkezine yerleştirilen seyyar manyetik alan ölçer (Gaussmetre) probuyla ölçülmüştür. İstenilen manyetik alanın oluşturulması için sisteme verilmesi gereken akım miktarı sisteme bağlanan güç kaynağı ile sağlanmıştır. Güç kaynağı, manyetik alan şiddetini 0.3T, 0.6T ve 1T olarak üç farklı durum için ayarlanabilmektedir. Ancak şebeke elektriği ile en fazla 0.3T'ya kadar çıkılabilmektedir. Elektrik çarpmalarına karşı nüve iyice yalıtılmış ve sargılar su sızıntılarına karşı korunmuştur. Test bölgesinin içinden geçen akışkanın sıcaklığı, kanal boyunca kanalın giriş-çıkışı dahil borunun farklı yerlerine yerleştirilen K Tipi ısılıçiftler ile ölçülebilmektedir. Depodaki akışkanın sıcaklığı depoya yerleştirilen ısıtıcı rezistans sayesinde istenilen sıcaklık elde edilmiş ayrıca, dijital göstergeli kondaktörün ayarlanması ve termostat yardımı ile sıcaklık sabit tutulabilmektedir. Ancak karşılaştırma verileri için ısı transferi incelenme gereği duyulmamıştır. Test bölgesini giriş ve çıkışına basınç transmitörleri yerleştirilerek giriş ve çıkışındaki basınç farkı ölçülmüştür. Ancak sağlıklı ölçüm alınamadığından test bölgesinin çıkışı sökülerek açık olarak basınç değerleri ölçülmüştür. Akışkanın çıkış hızını ölçmek için borunun çıkışına dijital debimetre yerleştirilmiştir. Depodan çıkan akışkanın istenilen hızda yol alması için deponun çıkışına ayarlanabilen bir tane vana yerleştirilmiştir.



Şekil 2.10. Deney seti (1 Depo, 2 Pompa, 3 Valfler, 4-5 Basınç ölçüm yeri, 6 Basınç ölçer, 7 Akışkan taşıyıcı boru, 8 Debimetre, 9 Trafo, 10 nüve, 11 Elektrik panosu)

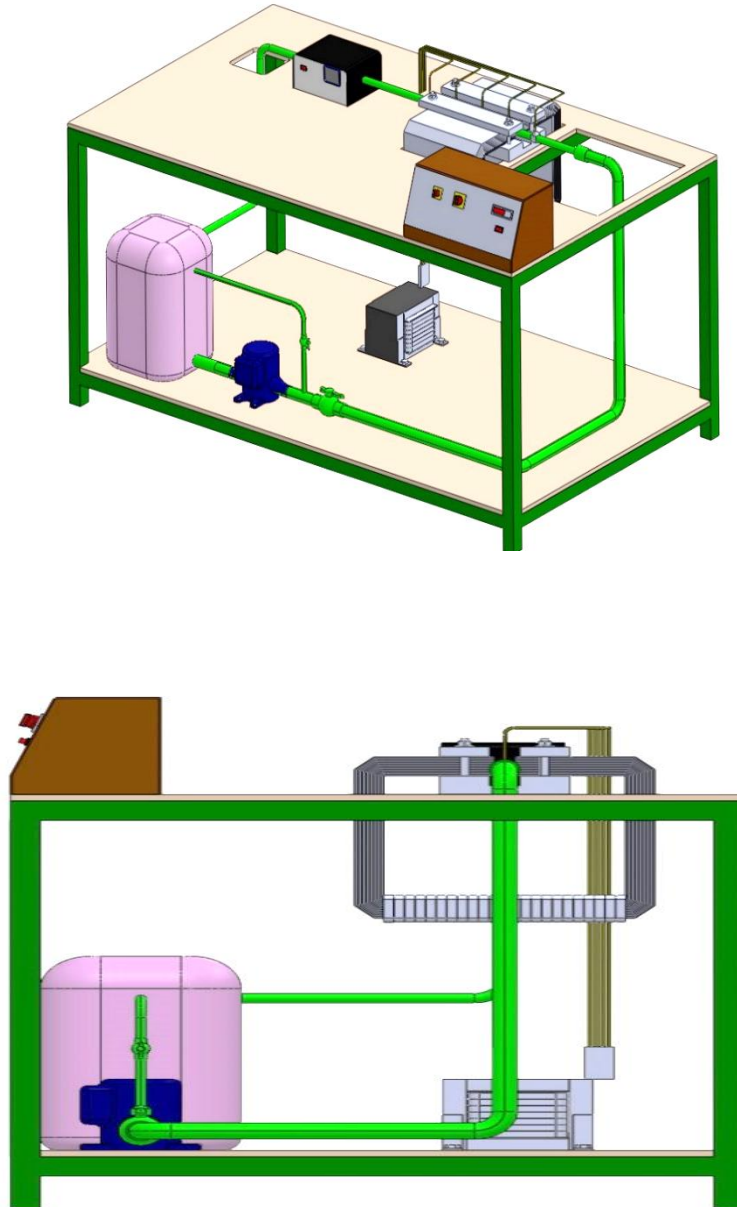
Laminer hızda çalışmak için vanadan geçen debinin az olacağından, bunun sonucunda meydana gelecek basıncın sirkülasyon pompasına zarar verme ihtimaline karşı suyun tekrardan depoya akması (akışkanın giriş bölümüne girmeden) için ayarlanabilen fakat genel olarak açık tutulan bir tane vana daha yerleştirilmiştir. Bu by-pass sayesinde akışkanın test bölgesine daha düzgün ve çalkantisız girilmesi de sağlanmıştır. Test bölgesi giriş uzunluğu akışkanın laminer olması için olması gereken uzunlukta imal edilmiştir. Giriş uzunluğu, $L_t = 0.05 \cdot Re \cdot D$ bağıntısına göre hesaplanmıştır. Depodaki akışkanı değiştirmek için deponun altına tahliye vanası takılmıştır. Akışkan değiştirilirken akış bu vanadan boşaltıldıktan sonra sistem tamamen saf su ile temizlenmiş ve daha sonra yeni akışkan depoya doldurulabilmektedir. Elektrik bağlantı elemanları, elektrik panosu ve sistemin diğer bütün parçalarının montaj halinde üzerinde bulunan masanın rahatlıkla yer değiştirilebilmesi için ayaklarının altına tekerlekler yerleştirilmiştir.



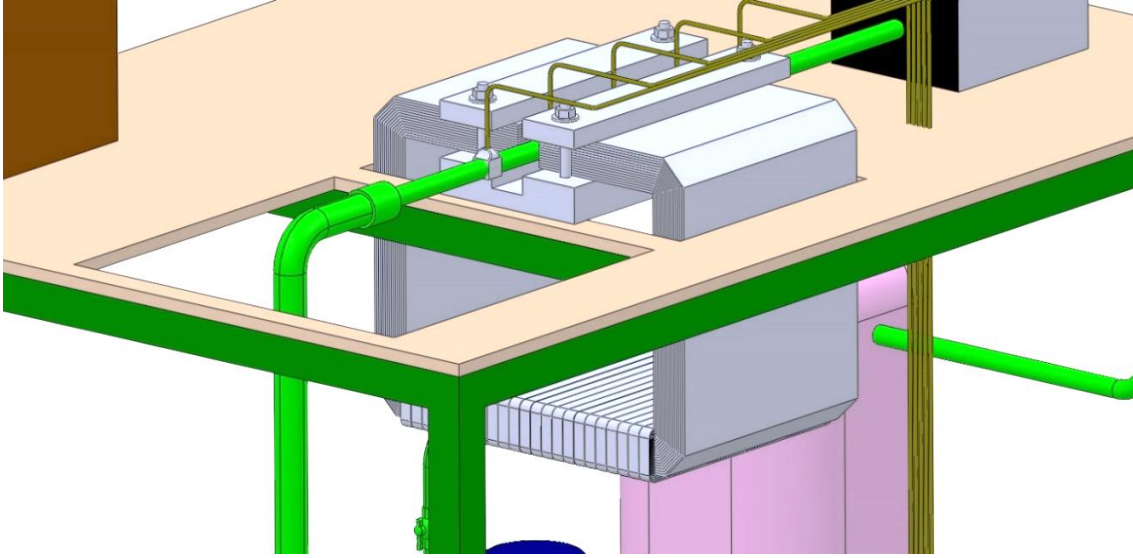
Şekil 2.11. Deney setinin bazı bölgelerinin yakından çekilmiş resimleri.

Şekil 2.11 (a)'da sargılar sarılmadan önce imal edilen boşuklu çekirdek nüveyi, Şekil 2.11 (b)'de deney setinin elektrik panosu ve test bölgesinin üstten görünüşü, Şekil 2.11 (c)'de deney setinin test bölgesine ait genel bağlantıları ve Şekil 2.11 (d)'de nüvenin yandan görünüşü ile nüveyi besleyen trafo ile bağlantıları görülmektedir.

Deney seti şematik olarak Şekil 2.12'de verilmiştir.



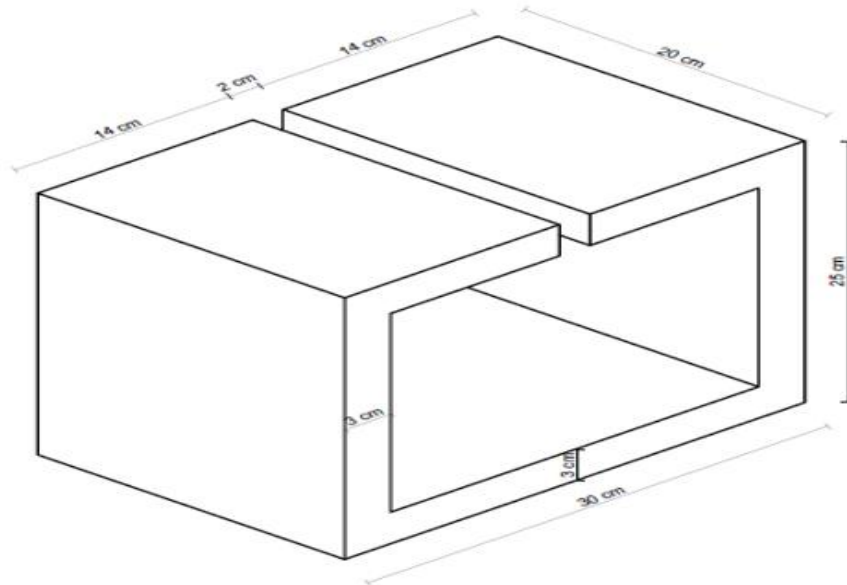
Şekil 2.12. Deney setinin şematik görünüşleri



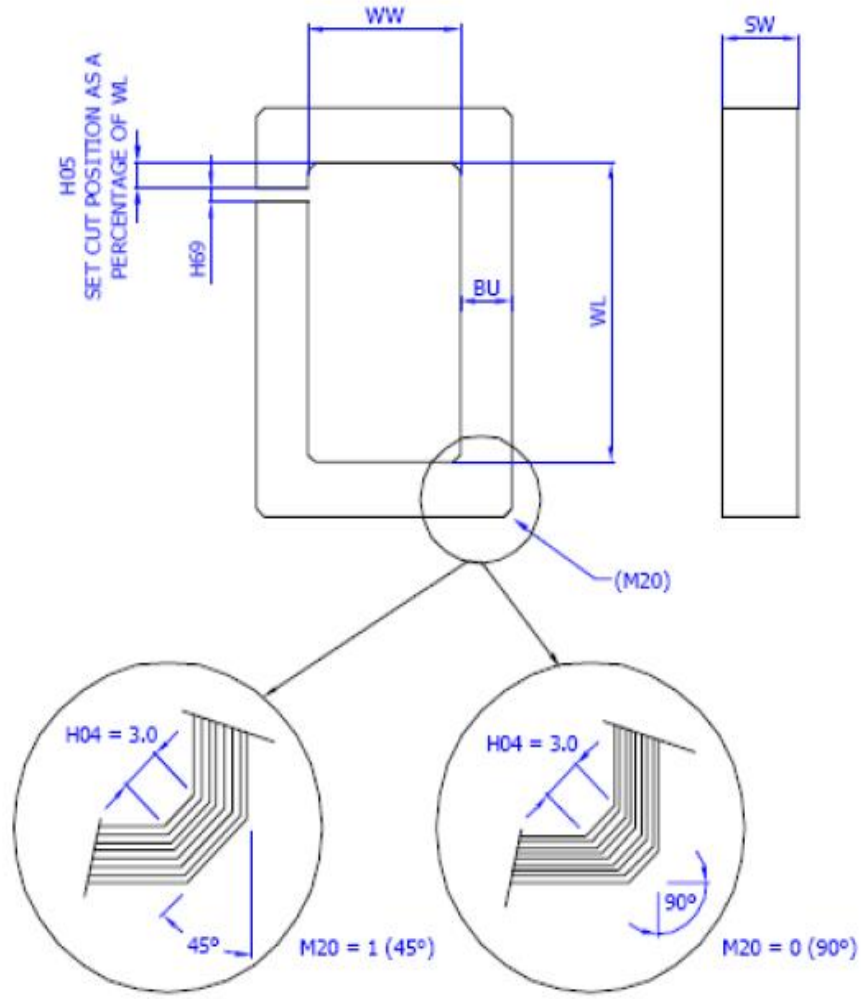
Şekil 2.12. Deney setinin şematik görünüşleri (Devamı)

2.10. Nüve Ölçüleri

Nüve ölçüleri aşağıda Şekil 2.13 ve Şekil 2.14 üzerinde gösterilmiştir. Nüvenin uzunluğu ve yüksekliği sırasıyla 30 cm ve 25 cm dir. Yatay uzunluğum tam ortasından 2 cm boşluk bırakılmıştır. Bu boşluktan çalışma sıvısını taşıyan boru geçmektedir. Nüve genişliği 20 cm olup bu uzunluk test bölgesi manyetik alan nüfuz etme uzunluğu, nüve kalınlığı da 3 cm olarak imal edilmiştir. Nüve ölçüleri Tablo 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.13. Nüve ölçüleri



Şekil 2.14. Nüve köşe uzunlukları ve açıları (Firma verileri)

Tablo 2.1. Nüve ölçüleri ve referans aralıkları

WL	240 mm	+0.5	-0.0
WW	190 mm	+0.5	-0.0
BUP	30 mm	+0.5	-0.0
SW	200 mm	+0.5	-0.0
M20 (1)	45 ⁰		
M20 (0)	90 ⁰		
H69	20 mm		
H04	30 mm		
H05	42 mm		
AĞIRLIK	42 kg		

Tablo 2.2. Nüveye ait sargıların fiziksel özellikleri ve elektrik değerleri

Toplam uzunluk X Kesit	145 m X 2*5 mm
Kablo kesit alanı	10 mm ²
Birinci kademe	12Volt, 32 Amper
İkinci kademe	12Volt, 64 Amper
Üçüncü kademe	12Volt, 96 Amper
Malzeme cinsi	Bakır (Cu)

2.11. Nüveye ait sargıların özellikleri

Nüvede kesit alanı 10 mm², kesiti 2*5mm ve uzunluğu 145 metre olan, bakır malzemeden oluşan kablo kullanılmıştır. Doğru akım esasına göre çalışan nüvenin birinci kademesi 12V – 32A, ikinci kademesi 12V – 64A ve üçüncü kademesi 12V – 96A ile çalışmaktadır. Nüveye ait sargıların özellikleri ve değerleri de Tablo 2.2’de verilmiştir.

2.12. Deneyde Kullanılan Ölçüm aletleri

Deneyler esnasında kullanılan ölçüm cihazları, markaları, modelleri, teknik özellikleri ve kullanım alanıyla ilgili gerekli açıklamalar Şekil 2.15’de bir arada verilmiştir.

	Markası ve modeli: CEM, DT-8890 Portatif ışıklı LCD dijital ekrana sahip manometre ile H₂O, psi, bar, mbar, kPa, inHg, mmHg, ozin, ftH₂O, cmH₂O, kgcm gibi farklı modlardaki basınç değerleri okunabilmektedir. Cihaz 9V pil veya adaptör ile çalışmakta ve usb girişi ile bilgisayara bağlanarak veri aktarımı yapılabilmektedir. Cihazın hassasiyeti $\pm$ %0,2 ve ölçüm aralığı 344.7 mbar’dır.
Basınç transmitter	

Şekil 2.15. Deneyler esnasında kullanılan ölçü aletleri



Markası: **PCE-MFM 3000**

Gövde aracılığıyla üretilen, nüve boşluğundaki manyetik alan şiddetini ölçmeye yarar. Şekilde görüldüğü gibi hem AC hem de DC olarak ölçüm gerçekleştirilebilmektedir. Hem statik hem de dinamik alanlarda ölçüm yapılabilmektedir. Ölçüm kotası 1 saniye olup, 0-50 °C de ve %85 bağıl nem ortamında ölçüm elde edilebiliyor. Giriş akımı 20.5 mA, ölçülebilir frekansı 50 Hz / 60 Hz. ve güç kaynağı 9 V Blok-Pil dir.

Statik Manyetik Alan ölçümü için (DC)

Ölçüm aralığı, Sektör 1: 0 - 150 mT / 0 - 1500 G

Sektör 2: 0 - 1500 mT / 0 - 15000 G

Çözünürlük, Sektör 1: 0,01 mT / 0,1 G

Sektör 2: 0,1 mT / 1 G

Hassasiyet, $\pm 10 \% + 10$ Dijit

Dinamik Manyetik Alan ölçümü için (DC)

Ölçüm aralığı, Sektör 1: 0 - 300 mT / 0 - 3000 G

Sektör 2: 0 - 3000 mT / 0 - 30000 G

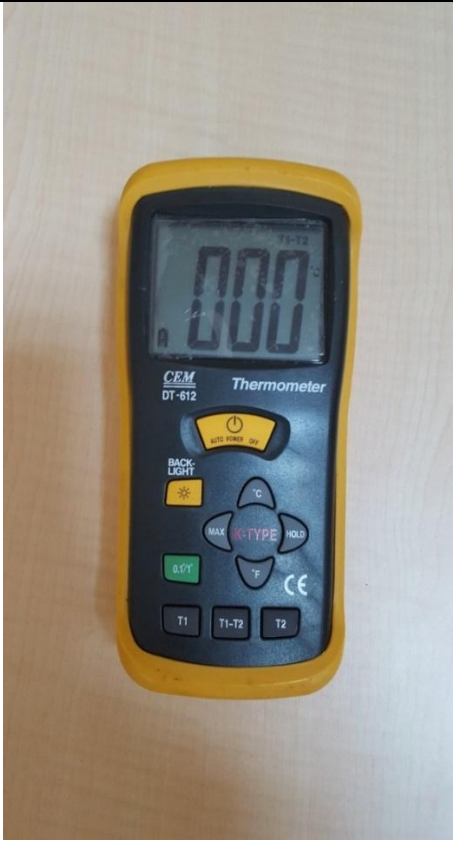
Çözünürlük, Sektör 1: 0,01 mT / 0,1 G

Sektör 2: 0,1 mT / 1 G

Hassasiyet, $\pm 10 \% + 10$ Dijit

Manyetik Alan Ölçer (Gaussmetre)

Şekil 2.15. Deneyler esnasında kullanılan ölçü aletleri (Devamı)

	Markası: US211 M Lite Ultisensor Kanala bağlanan aparatı sayesinde debi, sıcaklık ve basınç ölçülebilmektedir. Güç kaynağı: 5V DC (batarya/güç adaptörü), ancak sürekli çalıştığından pil ömrü kısa olmaktadır. Bu nedenle pil yerine elektrik bağlantısı yapılarak bu sorun ortadan kaldırılmıştır. Akışkanı Litre / dakika (LPM) cinsinden ölçmektedir. Aynı zamanda ölçülen toplam akışkan miktarını da Litre (L) olarak göstermektedir. Akışkan sıcaklığını °C ve °F olarak dijital ekranda verilmektedir. Sıfıra yakın debi değerlerini ölçme yeteneğiyle laminar çalışmalar için büyük avantaj sağlamaktadır. Hassasiyeti ± 0.04 L/m dir. Cihazın dijital ekranında hangi büyüklük ölçülecekse, cihaz o büyüklük için kurulmalıdır. Kurulum SET düğmesi vasıtasıyla birkaç saniye içerisinde yapılmaktadır.
	Markası: CEM DT-612 K tipi termometre ile tek ya da çift giriş yüksek doğrulukta hassas ölçüm imkanı sağlamaktadır. Güç kaynağı olarak 9V DC pil kullanılmaktadır. Ölçüm aralığı: -50 °C – 1300 °C (°F olarak da sıcaklığı gösterebiliyor) Çözünürlük: $\pm(0.5\%\pm 1)$ °C Doğruluk: 0.1 °C
Sıcaklık ölçer	

Şekil 2.15. Deneyler esnasında kullanılan ölçü aletleri (Devamı)

	Nano akış hazırlama kapları ile istenilen akışkan miktarının kusursuz olması hedeflenmiştir. Yarımlitre ve bir litrelik kaplar ile karışım oranı hassas bir şekilde oluşturulmuştur.
Nanoakış hazırlama kapları-saf sular-ultrasonik karıştırıcı	
	Markası: DENSI HZY serisi – 0.001 gr = 1mg 17 ayrı tartı biriminde otomatik ölçüm yapabilen analitik terazinin, şeffaf rüzgar koruyucu cam fanusa sahip olması sayesinde daha hassas ölçüm yapılmaktadır. Tarih zaman ve ortam sıcaklığını dijital ekranda anlık olarak göstermektedir. Elektrik kesilmesi halinde pil ile çalışması tartım işinin aksamadan gerçekleştirilmesi açısından önemli bir cihazdır.
Hassas dijital terazi	
	Markası- modeli: AND, SV-10 / SV-100 Yeni geliştirilen Tuning-fork Titreşim Yöntemi ile sensör plakalarını değiştirmeden yüksek doğruluk ve geniş ölçüm aralığı ile çalışmaktadır. Sinüs dalgası Vibro Viskozimetresi SV-10 / SV-100, iki sensör plakasını 30Hz sabit frekansta ve 1 mm'den daha az genlikte rezonans etmek için gerekli olan elektrik akımını tespit ederek viskoziteyi ölçmektedir. Elektromanyetik tahrik, sabit genlikte tutmak için sensör plakalarının titreşimini kontrol eder. Kuvvet olan sürüş elektrik akımı, sensör plakaları ve numune sıvısı arasında üretilen viskozitenin büyüklüğü olarak algılanır.
Viskozimetre	

Şekil 2.15. Deneyler esnasında kullanılan ölçü aletleri (Devamı)

Deneysel kısımda kullanılan nano akışkan Fytronix FY-100 ultrasonik sonikatör ile hazırlanmıştır. Karıştırma işlemi iki saat boyunca yapılmıştır. Nano akışkanlara nanoların kütlelerinin %20'si kadar citric asit katılarak karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan %2 Fe₃O₄ içeren nano akışkan aşağıda Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Deneyde kullanılan nano akışkan

2.13. MHD Akış Modeli ve Manyetik İndüksiyon Metodu

Sıvı akış alanı ve manyetik alan arasındaki bağlantı iki temel etki üzerinde anlaşılmaktadır. Bunlar, bir manyetik alandaki iletken bir malzemenin hareketinden dolayı elektrik akımının indüksiyonu ve manyetik alan etkileşimi ile elektrik akımının sonucu olarak Lorentz kuvvetinin etkisidir. Genel olarak indüklenen elektrik akımı ve Lorentz kuvveti onları oluşturan mekanizmalara karşı direnç gösterir. Elektromanyetik indüksiyona neden olan akımlar bundan dolayı Lorentz kuvvetinin bir sonucu olarak geciktirilmektedir. Elektrik indüksiyonu zamanla değişen bir manyetik alanın varlığında da oluşur. Bu etki Lorentz kuvveti tarafından akışkan hareketinin karıştırılmasıdır.

Elektromanyetik alanlar Maxwell denklemi (Denklem 2.24 – 2.27) ile tanımlanır:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.24)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.25)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (2.26)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.27)$$

Burada, $\vec{B}$ (Tesla) ve $\vec{E}$ (V/m) sırasıyla manyetik ve elektrik alan, $\vec{H}$ ve $\vec{D}$ ise sırasıyla manyetik ve elektrik alanlar için indüksiyon alanıdır. q (C/m³) elektrik yük yoğunluğu ve $\vec{j}$ (A / m²) elektrik akım yoğunluğu vektörüdür.

İndüksiyon alanı $\vec{D}$ aşağıdaki gibi Denklem 2.28 ile belirlenir.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.28)$$

Burada, ϵ dielektrik sabitidir. Sıvı metaller gibi yeteri kadar iletken olan ortamlarda, bilindiği gibi elektrik yükü yoğunluğu q ve deplasman akımı $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ihmal edilir [111-112].

Akış alanı ve elektromanyetik alan arasındaki etkileşim çalışmalarında, indüksiyondan dolayı akım yoğunluğu $\vec{j}$ yi bilmek önemlidir. Akım yoğunluğunu değerlendirmek için genel olarak iki yaklaşım kullanılabilir. Birincisi manyetik indüksiyon denkleminin arasında, diğeri ise elektrik potansiyeli denkleminin çözümü arasındadır.

Manyetik indüksiyon denklemi Ohm yasası ve Maxwell denkleminden türetilmiştir. Denklem akış alanı ve manyetik alan arasındaki bağıntıyı sağlar. Genel olarak Ohm yasası aşağıda verilen Denklem 2.29'daki akım yoğunluğu ile hesaplanır.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.29)$$

Burada, σ ortamın elektrik iletkenliğidir. Bir manyetik alan $\vec{B}$ 'deki akış hız alanı $\vec{U}$ için Ohm yasası Denklem 2.30 ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}) \quad (2.30)$$

Ohm yasası ve Maxwell denkleminden, indüksiyon denklemi (Denklem 2.31) ile gösterilir.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{U} \quad (2.31)$$

Çözülen manyetik alan $\vec{B}$ 'den, akım yoğunluğu $\vec{j}$, Ampere bağıntısı kullanılarak aşağıdaki gibi Denklem 2.32 ile hesaplanır.

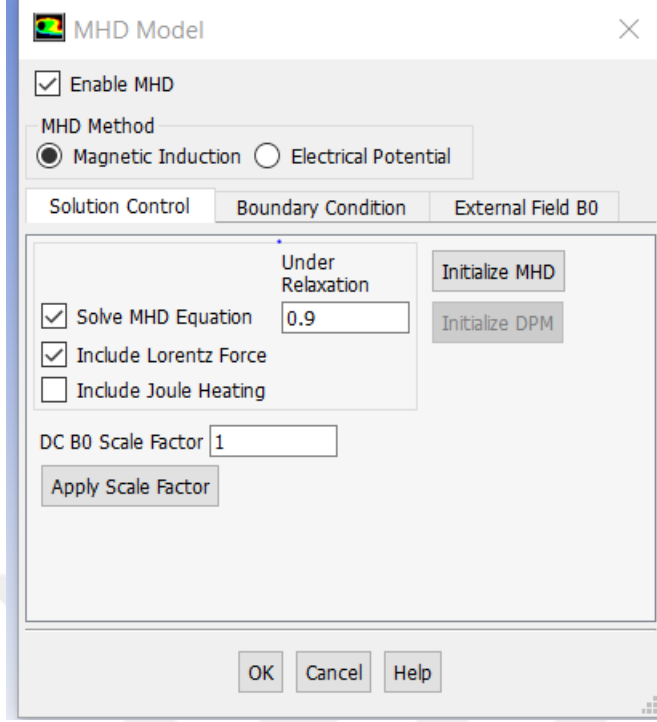
$$\vec{j} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \quad (2.32)$$

Genelde bir MHD probleminde manyetik alan B , dışarıdan uygulanan alan B_0 ve akışkan hareketinden dolayı oluşan indüklenen alan b şeklinde ayrışabilir. Kısacası manyetik alan B , akışa dışarıdan uygulanan manyetik alan B_0 ile indüklenen manyetik alan b 'nin toplamıdır. MHD problemlerinde genel olarak Denklem (2.33)'de verilen manyetik Reynolds sayısı ifadesi 1 den küçük olduğunda indüklenen manyetik alan dışarıdan uygulanan manyetik alanın yanında çok küçük kalacağı için ihmal edilir ve düşük manyetik Reynolds sayısı (Denklem 2.33) yaklaşımı şeklinde literatürde bulunmaktadır [113].

$$R_m = \mu_0 U L \ll 1 \quad (2.33)$$

Denklemde; μ_0 malzemenin veya akışkanın manyetik geçirgenlik katsayısı, U akışkan hızı ve L karakteristik uzunluktur.

Bu tez çalışmasında yöntem olarak, MHD modelde yer alan manyetik indüksiyon denkleminin çözümü tercih edilmiştir. Çözüme ait ANSYS Fluent MHD modeli penceresi aşağıda Şekil 2.17'de verilmiştir.



Şekil 2.17. ANSYS FLUENT MHD modeli

2.14. Genel Denklemler ve Nano Akışkan Formülleri

Bu bölümde sayısal kısma ait genel Denklemler, nano akışkana ait modellemeler ve Nusselt sayısının hesaplanmasına ait matematiksel bağıntılara yer verilmiştir [113].

Hidrodinamik (HD) momentum Denklemleri ($B = 0$), Denklem 2.34-39 ile hesaplanır.

r – bileşeni

$$\rho(V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2}) \quad (2.34)$$

θ - bileşeni

$$\rho(V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2}) \quad (2.35)$$

z – bileşeni

$$\rho(V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}) \quad (2.36)$$

Tek fazlı MHD akış modeli içinde aşağıdaki denklemler elde edilir:

r – bileşeni

$$\rho(V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} - \frac{V_\theta^2}{r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \rho(E_0 - B_0 v_r)B_0) \quad (2.37)$$

θ - bileşeni

$$\rho(V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} - \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} = - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} + \rho(E_0 - B_0 v_\theta)B_0) \quad (2.38)$$

z – bileşeni

$$\rho(V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \rho(E_0 - B_0 v_z)B_0) \quad (2.39)$$

Tek fazlı MHD akış modeli için enerji denklemi aşağıdaki Denklem 2.40 ile bulunur.

$$\rho C_p (\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z}) = k [\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}] + 2\mu \left\{ (\frac{\partial v_r}{\partial r})^2 + [\frac{1}{r} (\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r)]^2 + (\frac{\partial v_z}{\partial z})^2 \right\} + \mu \left\{ (\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta})^2 \right\} \quad (2.40)$$

$$+ \left\{ \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right\}^2 + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \right] + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right\} + \rho (E_0 - B_0 v_z) B_0$$

Manyetik alanın etkisinin olmadığı durum için, denklemlerde, $B = 0$ yazıldığında MHD yerine yine hidrodinamik (HD) denklemleri elde edilmiş olacaktır.

Nano akışkana ait yoğunluk, özgül ısı kapasitesi, akışkanın termal iletkenlik katsayısı, dinamik viskozite modeli, yerel Nu ve ortalama Nu formülleri aşağıda sunulmuştur.

Nano akışkanın yoğunluğu takip edilen Denklem 2.41 vasıtasıyla hesaplanır [6].

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (2.41)$$

Nano akışkanın özgül ısı kapasitesi aşağıdaki gibi Denklem 2.42 yardımıyla ile bulunur [6].

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_s \quad (2.42)$$

Nano akışkanın termal iletkenliği (k_{nf}) Maxwell-Garnets modeli ile aşağıda gibi Denklem 2.43 ile elde edilir [6].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (2.43)$$

Nano akışkanın elektrik iletkenliği aşağıdaki Denklem 2.44 ile hesaplanır [114].

$$\sigma_{nf} = (1-\phi)\sigma_f + \phi\sigma_s \quad (2.44)$$

Nano akışkanın viskozitesi Denklem 2.45'teki Brinkman [115] modeli ile bulunur.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (2.45)$$

Hartmann sayısı, aşağıdaki Denklem 2.46 ile belirlenir [114].

$$Ha=B_0R\sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf}\nu_f}} \quad (2.46)$$

Yerel Nusselt sayısı (Nu_x), duvar kenarındaki ısı dengesinden Denklem 2.47 yardımıyla elde edilir [114].

$$Nu_x = \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{(\partial T/\partial n)L_n}{(T_w-T_i)} \quad (2.47)$$

Burada kullanılan L_n , cidardan kanalın ortasına kadar olan mesafedir. Denklemde sıcaklıklar kanal duvar sıcaklığının akışkanın sıcaklığından daha büyük ($T_w>T_i$) olduğu durum içindir.

Ortalama Nusselt sayısı (Nu) kanal uzunluğu (L) boyunca yerel Nusselt sayılarının integrali alınarak aşağıdaki gibi Denklem 2.48 ile hesaplanır.

$$Nu=\frac{1}{L}\int_0^L Nu_x \, dx \quad (2.48)$$

2.15. Akış Hızının Deneysel Olarak Tespiti

Boru çapı boyunca akış hız değerleri, deneysel çalışmada ölçülen kütleli debilere göre aşağıdaki Denklem 2.61 veya Denklem 2.62'e göre hesaplanmıştır. Lagrange interpolasyon polinomu yöntemine göre bilinen üç noktaya ikinci dereceden bir polinom uydurulabilmektedir. Bu polinomun genel ifadesi (Denklem 2.49) [113]:

$$u(r)=ar^2+br+c \quad (2.49)$$

Şeklindedir ve a, b, c sabitlerinin değerlerini bulmak için aşağıdaki sınır şartları kullanılabilir Denklem (2.50). Buna göre,

$$\begin{aligned} r &= r_0; u = u_0 \\ r &= r_{+R}; u = u_{+R} \\ r &= r_{+R}; u = u_{-R} \end{aligned} \quad (2.50)$$

Üstteki sınır şartları kullanıldığında sırasıyla (Denklem 2.51, 2.52 ve 2.53):

$$u = ar_0^2 + br_0 + c \quad (2.51)$$

$$u_{+R} = ar_{+R}^2 + br_{+R} + c \quad (2.52)$$

$$u_{-R} = ar_{-R}^2 + br_{-R} + c \quad (2.53)$$

Eşitlikleri elde edilir. Eşitlik 2.51-2.53 denklem sistemi halinde çözülür ve a, b, c sabitlerinin elde edilen ifadeleri Eşitlik 2.49 da yerlerine yazılıp düzenlenirse,

$$u(r) = \frac{(r - r_{-R})x(r - r_{+R})}{(r_0 - r_{-R})x(r_0 - r_{+R})} xu_0 + \frac{(r - r_0)x(r - r_{+R})}{(r_{-R} - r_0)x(r_{-R} - r_{+R})} xu_{-R} + \frac{(r - r_0)x(r - r_{-R})}{(r_{+R} - r_0)x(r_{+R} - r_{-R})} xu_{+R} \quad (2.54)$$

Eşitlik 2.54 elde edilir. Eşitlik 2.54' te aşağıdaki işaretlemeler yapılır ve bu Eşitlik tekrar düzenlenirse (Denklem 2.55), Denklem 2.56 elde edilir.

$$\begin{aligned} r_0 &= 0; u_0 = u_{\max} \\ r_{-R} &= -R; u_{-R} = 0 \\ r_{+R} &= R; u_{+R} = 0 \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$u(r) = \frac{(r + R)x(r - R)}{(r_0 + R)x(r_0 - R)} xu_{\max} + \frac{(r - r_0)x(r - R)}{(-R - r_0)x(-R - R)} x0 + \frac{(r - r_0)x(r + R)}{(R - r_0)x(R + R)} x0 \quad (2.56)$$

$$u(r) = \frac{(r + R)x(r - R)}{(0 + R)x(0 - R)} xu_{\max} \quad (2.57)$$

$$u(r) = \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} \right) xu_{\max} \quad (2.58)$$

Laminer akış durumu için Eşitlik 2.57'deki, $xu_{\max}$ Denklem 2.59 ile bulunur ve Denklem 2.58'de yerine yazılırsa Denklem 2.60 ve 2.61 elde edilir.

$$U_{\max} = 2xu_{\max} = 2 \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (2.59)$$

$$u(r) = \left(\frac{R^2 - r^2}{R^2} \right) \times 2 \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (2.60)$$

$$u(r) = \frac{2}{\pi R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \times \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (2.61)$$

Denklem aşağıdaki gibi de gösterilebilir (Denklem 2.62).

$$u(r) = \frac{2}{\pi R^2} \frac{\dot{m}}{\rho} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2.62)$$

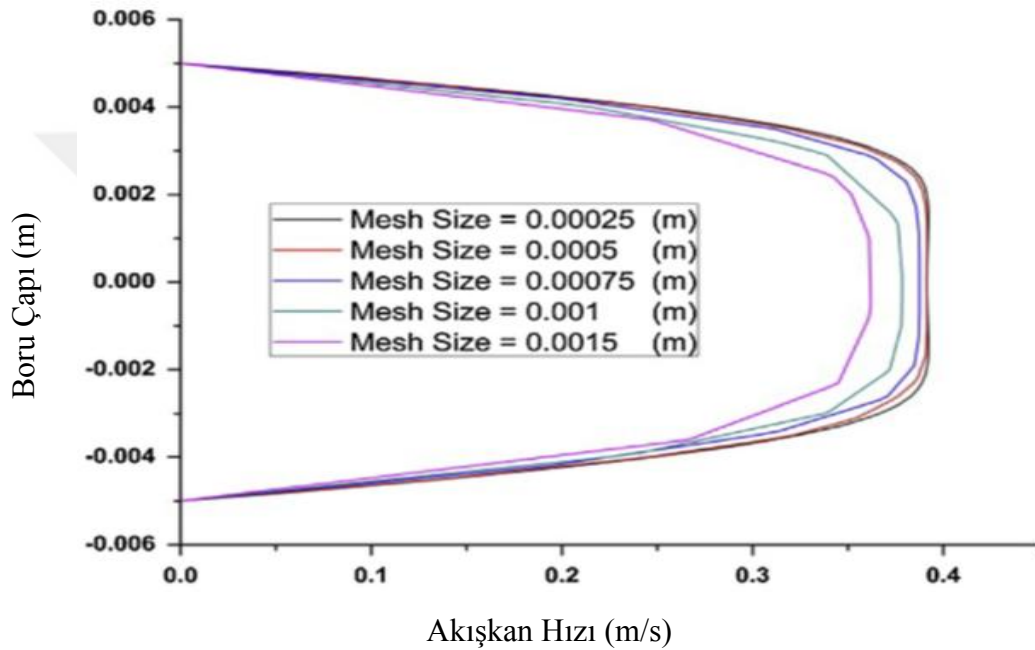
Denklem 2.60 veya Denklem 2.61'deki gerekli değerler yerine yazıldığında, boru çapı boyunca herhangi bir yerdeki hız değerleri belirlenebilmekte ve bu değerlere göre hız eğrisi oluşturulabilmektedir.

2.16. Literatür Doğrulaması (Kod Geçerliliği)

Çalışma sonuçlarının doğruluğunu test etmek için, literatürde yer alan başka bir çalışma ile olan benzerlik oranı karşılaştırılmıştır. Bulunan değerler kıyaslanarak çalışmanın geçerliliği ortaya konulmuştur.

Kod geçerliliği mevcut sayısal çalışmanın sonuçlarını doğrulamak için yapılmıştır. Bu amaçla basınç ve hız değerleri grafik olarak sunulmuştur. Bu, Recebli vd. [36] tarafından yapılan çalışma ile mevcut çalışma arasındaki grafiklerin kıyaslanması ile gerçekleştirilmiştir. Recebli vd. [36] tarafından yapılan çalışmada, içinde lityum sıvısı bulunan üç boyutlu silindirik bir boruya dış manyetik alan uygulayarak yapılmıştır. Laminer koşullarda çalışmak için $Re = 2250$ olarak seçilmiştir. Hem ısıtma hem de soğutma olarak çalışılan boruda, akışkan sıcaklığı ile cidar sıcaklığı arasındaki fark $\Delta T = 100K$ olarak seçilmiştir. Boruya üç farklı manyetik alan şiddeti ve manyetik alanın olmadığı durum şartları dşnlerek analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmamızda seçilen ağ büyüklüğü, çalışmanın doğruluğunu kıyaslamak için, seçilen çalışma ile aynı olacak şekilde seçilmiştir. Ağ büyüklüğü 0.0005 metreden sonra değişmediği halde daha hassas ölçüm almak için ağ büyüklüğü 0.00025 m olarak seçilmiştir. Ağdan bağımsız çalışma yapılması sayısal çalışmalar için oldukça önemli bir parametredir. Bu yönden ağ bağımsızlığına kavuşulması, deneysel çalışmalarda deney setinin tam olarak kurulmasına

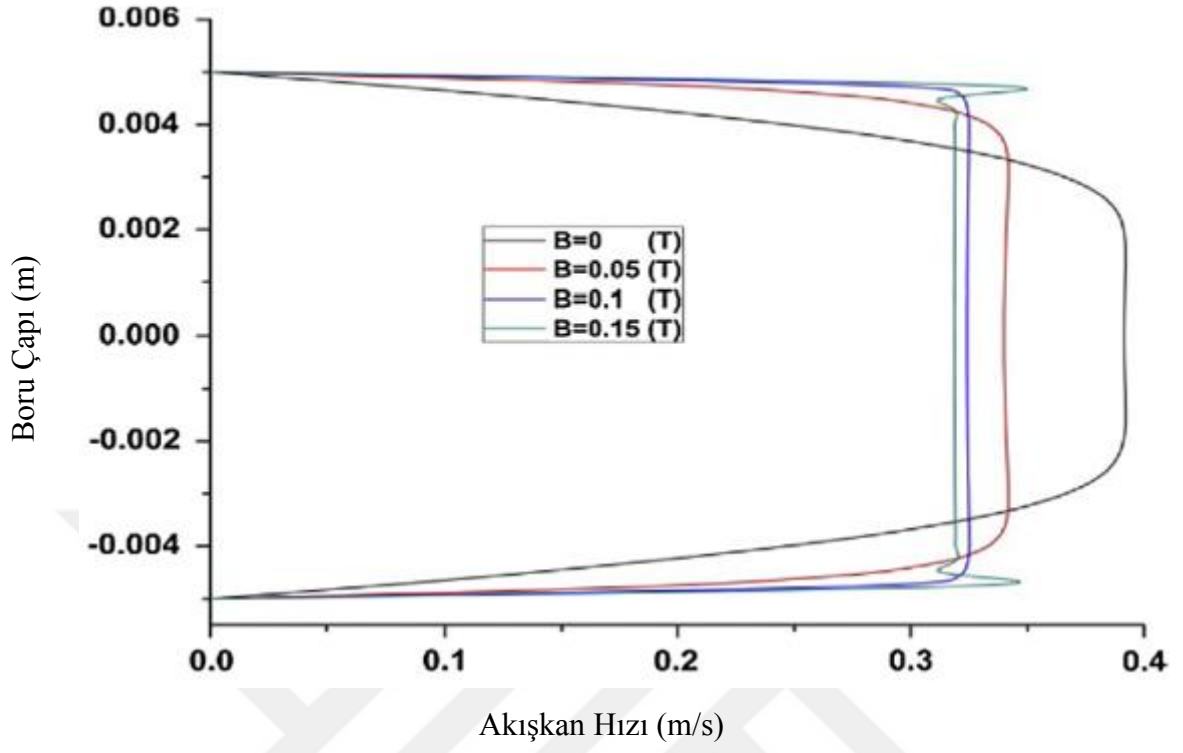
benzetilir. Deney seti, amaca uygun olarak tamamlanmadan çalışılmasının doğru olmayacağı gibi ağ bağımsızlığına ulaşmadan da sayısal çalışmaların yapılması doğru değildir. Literatürde ağ bağımsızlığını yapmayan bazı araştırmacılar, başka çalışmalardan faydalanılarak o çalışmalarda önerilen ağ tipi ve büyüklüğünü kullanmak suretiyle analizlerini gerçekleştirmektedirler. Kod geçerliği için kıyaslama yapılan çalışmaya ait ağ büyüklükleri aşağıda Şekil 2.18’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan Lityum sıvısının termo-fiziksel özellikleri ve diğer ayrıntılar için Kaynak [36]’ya bakılabilir.



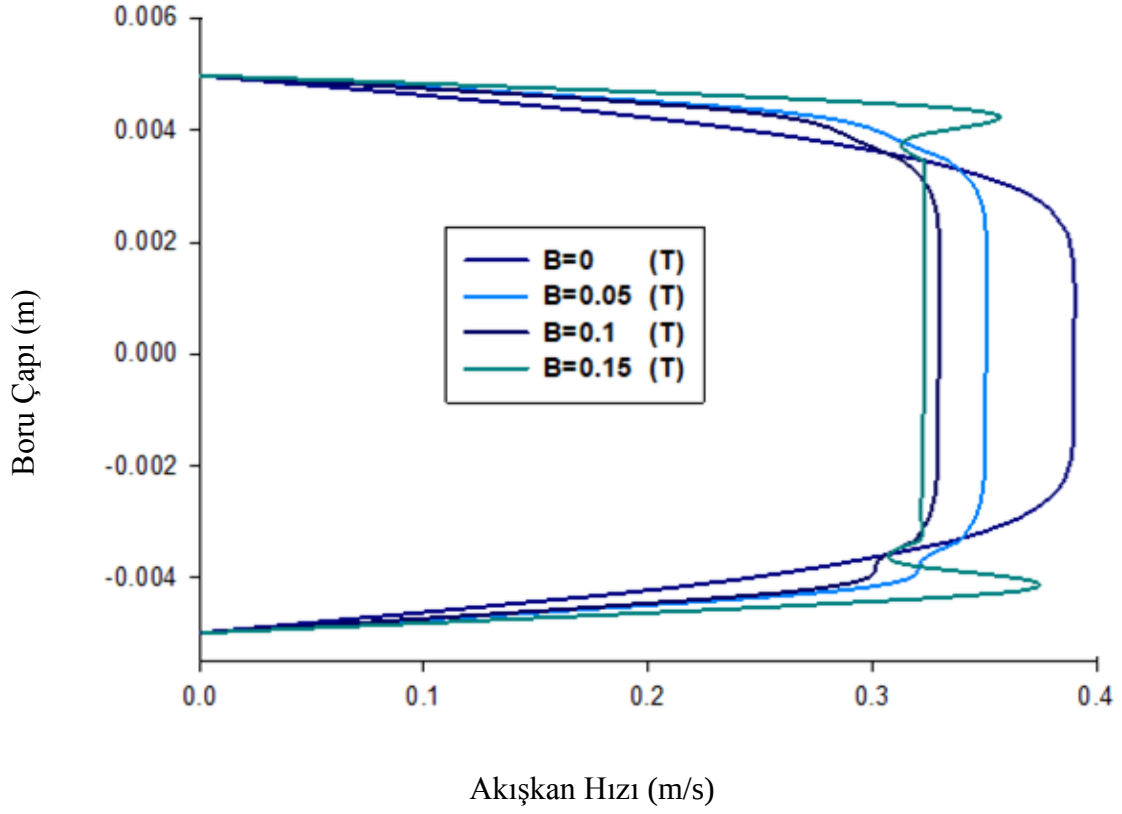
Şekil 2.18. Ağ çalışması için yerel hızların karşılaştırılması [36].

Şekil 2.19 ve Şekil 2.20’de Recebli vd. [36] tarafından yapılan çalışma ile mevcut çalışmada elde edilen hız ve basınç değerlerini göstermektedir. Bulunan sonuçlar kıyaslandığında hız ve basınç değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. $B = 0.15T$ ’daki değerlerde çok az bir kayma olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, kıyaslama için seçilen çalışmadaki boru et kalınlığı ve malzemenin cinsinin tam olarak verilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Manyetik alan kuvvetinin uygulanmadığı ve manyetik alan kuvvetinin en az olduğu durum için sonuçlar arasında herhangi bir farkın olmadığı görülmektedir.

Recebli vd. [36]

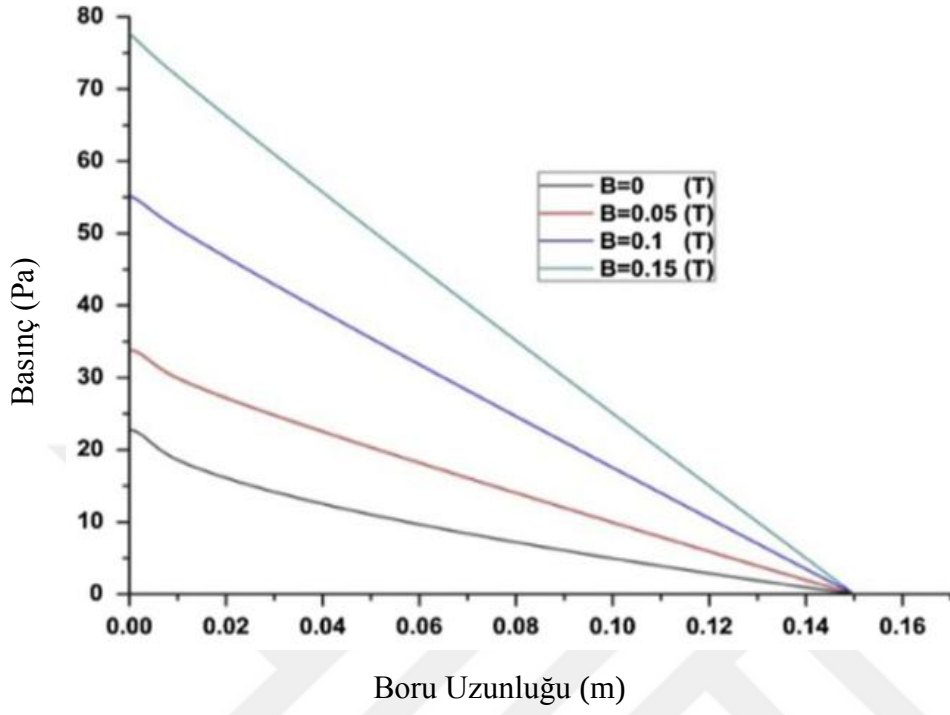


Mevcut çalışma

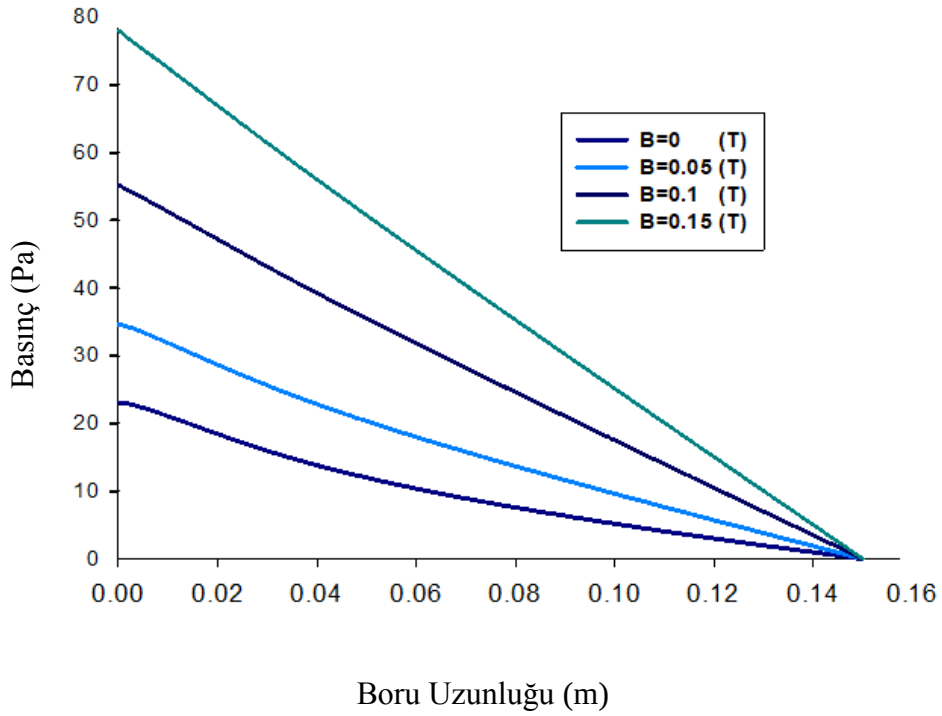


Şekil 2.19. Kanal boyunca Recebli vd. [36] tarafından elde edilen hız değerleri ile mevcut çalışmada elde edilen değerlerin karşılaştırılması

Recebli vd. [36]



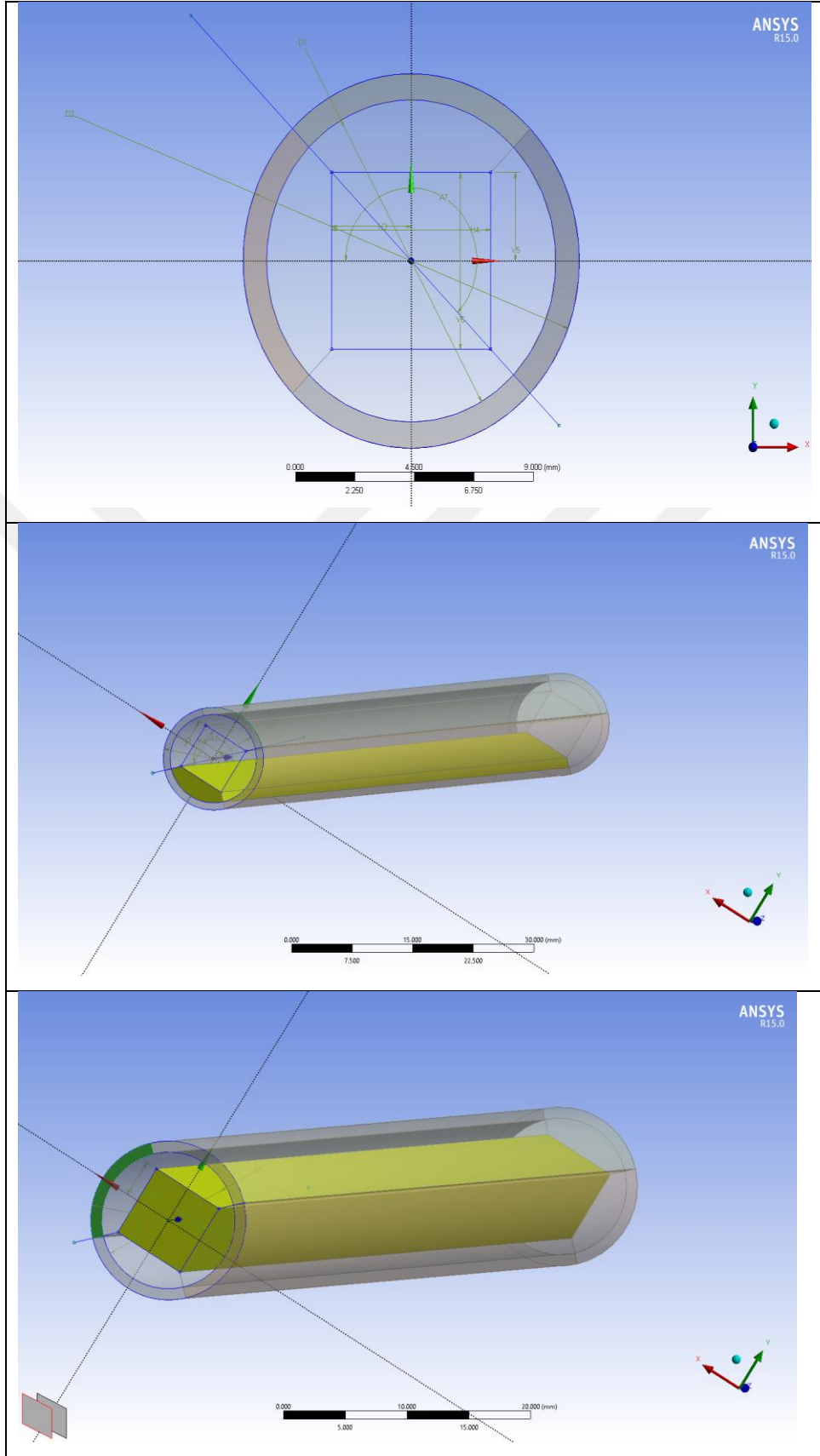
Mevcut çalışma



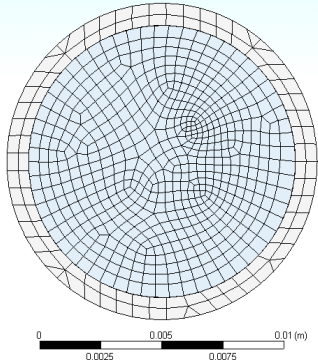
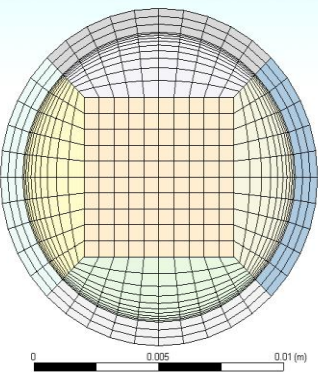
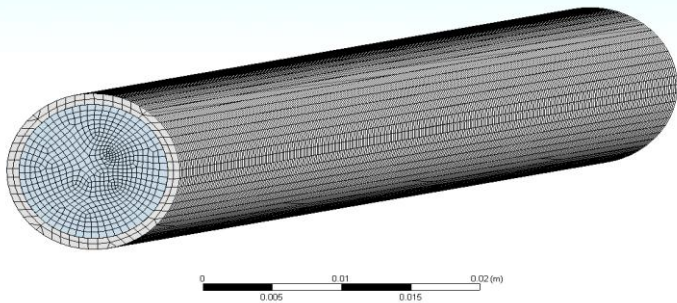
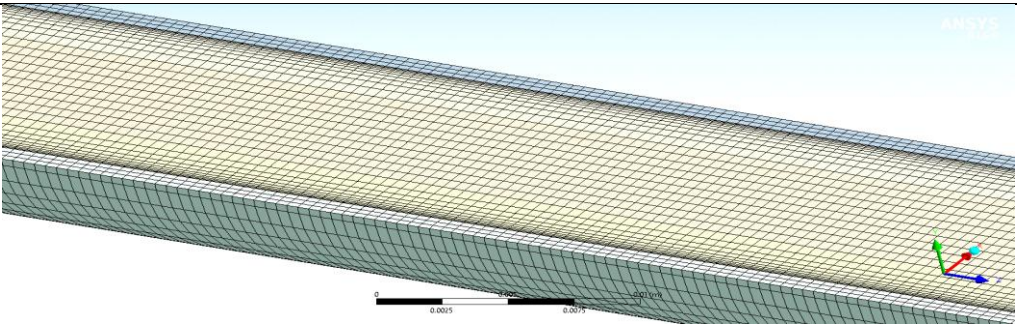
Şekil 2.20. Kanal boyunca Recebli vd. [36] tarafından elde edilen merkez basınç değerleri ile mevcut çalışmada elde edilen değerleri

2.17. Sayısal Modelleme, Ağ Yapısının Oluşturulması ve Ağ Kalitesi

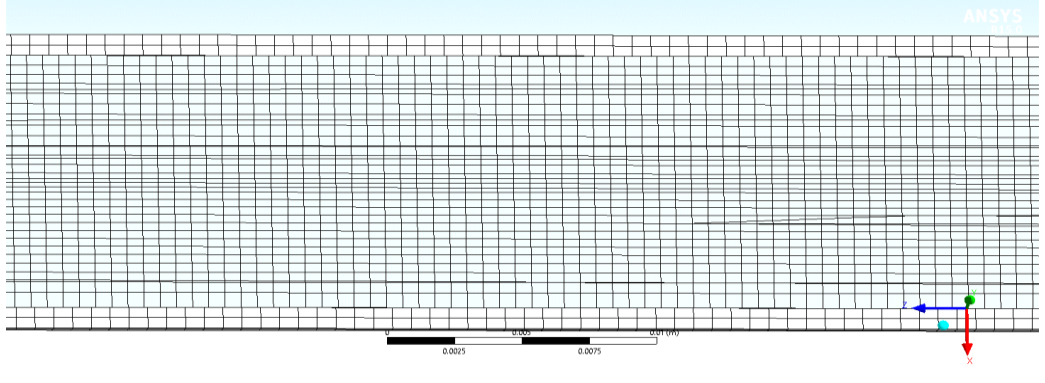
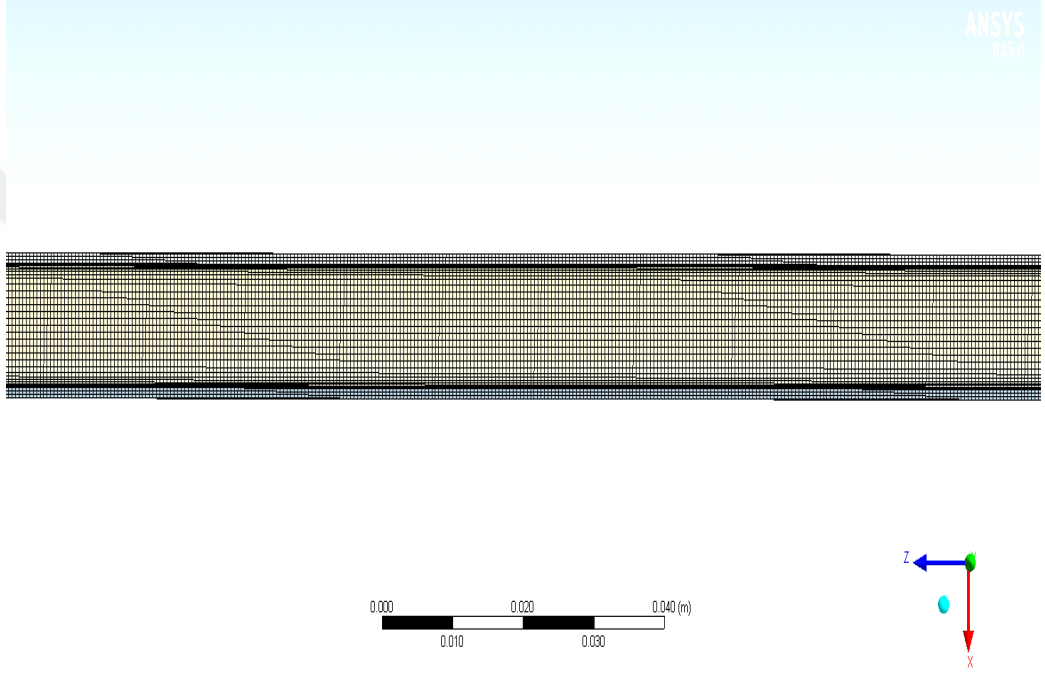
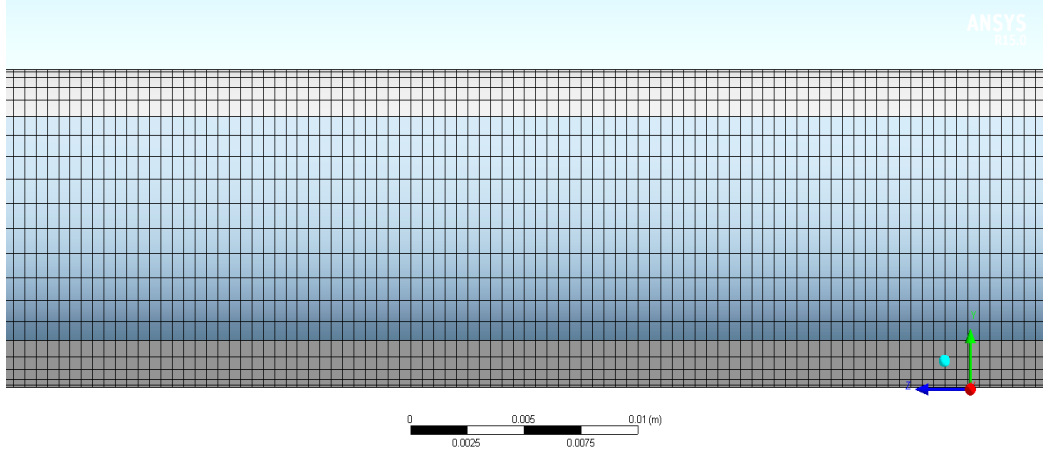
Sayısal modelleme için oluşturulan katı model ve ağ yapıları sırasıyla Şekil 2.21 ve Şekil 2.22’de verilmiştir. Quadratic ağ yapısı tipi tercih edilmiştir. Silindirik bir boru için model parçalara ayrılmış ve bu sayede daha düzgün ağ yapısı tayin edilmiştir. Modelleme için iki tane ağ yapısı oluşturulmuştur. Bunlardan biri deneysel sonuçlarla sayısal sonuçları karşılaştırmak için yapılan iki parçalı (plastik cidar ve akış alanı) diğeri de geriye kalan tüm sayısal analizlerde kullanılmak için yapılan tek parçalı boru geometrisidir. Birincisinin iki ayrı parçalı yapılmasının sebebi sayısal çalışmanın gerçeğe daha yakın olması (birebir gerçek boruya benzetilmesi), ikincisinin tek parçalı yapılmasının ısı transferi yönünden daha sağlıklı sonuçların alınmaya çalışılmasındandır. Bunun için bilgisayarın da özellikleri dikkate alınarak en iyi orthogonal kalite (1’e yakın olması önerilir) ve en iyi skewness değeri (0’a yakın olması istenir) elde edilmeye çalışılmıştır. Literatür incelemesi yapıldığında, genel olarak tek parçalı karışık ağ yapısıyla geometrilerin ağlarının oluşturulduğu görülmektedir. Bu genel olarak araştırmacıların kolay bir yol olduğu için başvurdukları bir yöntemdir. Ancak ağ yapısı çok yakından incelendiğinde, özellikle geometrinin iç tarafları kesilip incelendiğinde bunun çok sağlıklı bir yöntem olmadığı Şekillerden de anlaşılmıştır (Kaba ağ yapısı). Aynı şekilde bu çarpıklık sonuçlar için çizilen eğrilerdede kendini göstermektedir. Bunun için bu tezde daha zor ancak daha sağlıklı sonuçlar verebilen bölünmüş ağ yapısı kullanılmıştır. Bu konuyu daha iyi anlamak başka bir değişle bu iki ağ tipi arasındaki kalite farkını görebilmek için yaklaşık olarak aynı ağ sayısına sahip tek parçalı ve bölünmüş geometrideki ağ yapısına ait oluşturulan katı model ve ağ yapıları bir arada aşağıda sunulmuştur.



Şekil 2.21. Deneysel veriler ile karşılaştırmak için kullanılan plastik borunun katı modeli

Kaba ağ	
İnce ağ (Kullanılan ağ)	
Kaba ağ	
İnce ağ (Kullanılan ağ)	

Şekil 2.22. Deneysel çalışma ile kıyaslanacak sayısal çalışmanın ağ yapısı

Kaba ağ	
İnce ağ (Kullanılan ağ)	
İnce ağ (Kullanılan ağ)	

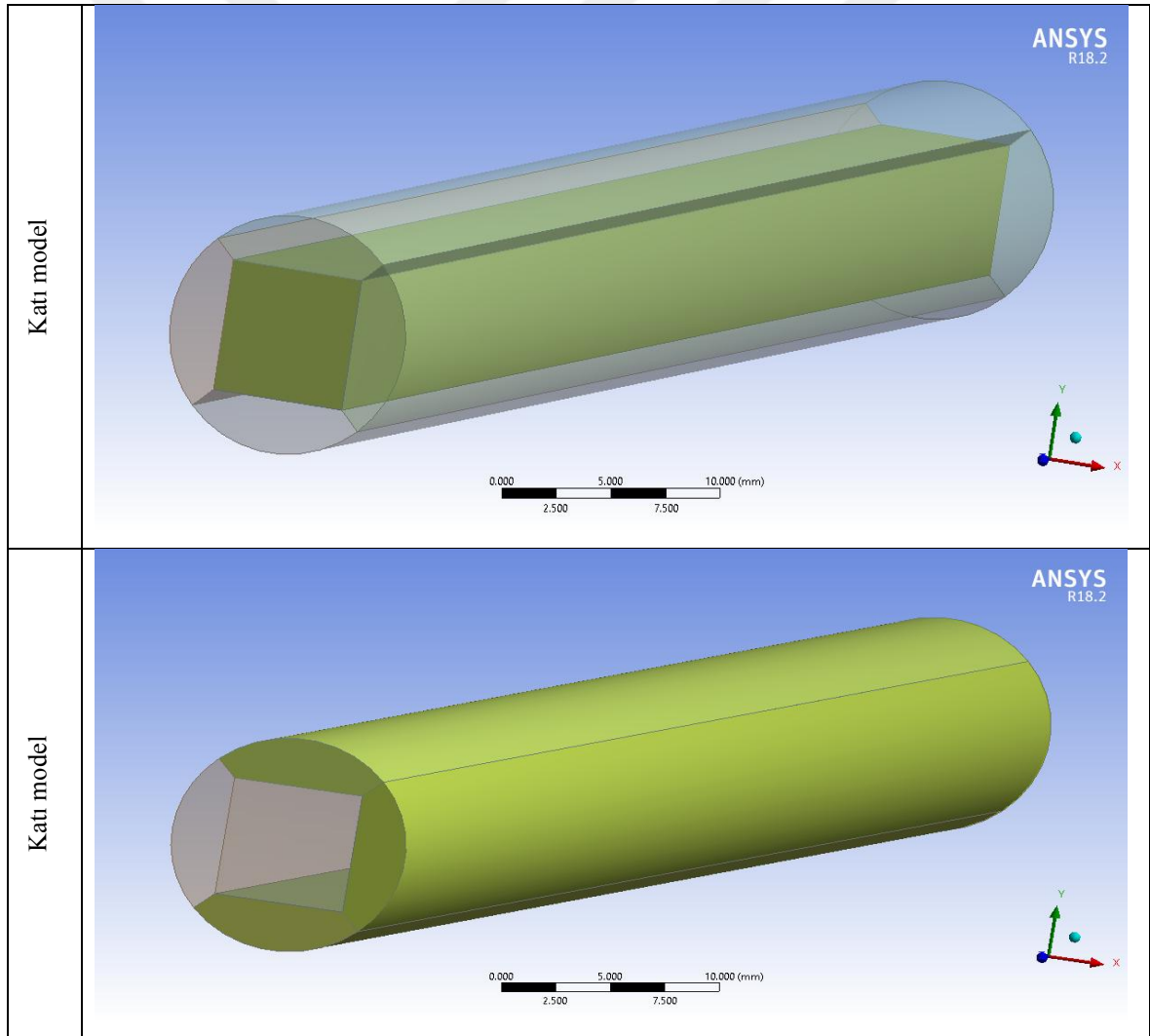
Şekil 2.22. Deneysel çalışma ile kıyaslanacak sayısal çalışmanın ağ yapısı (Devamı)

Şekillerden bölünmüş olan geometrilerdeki ağ yapısının çok daha düzgün olduğu açıkça görülmektedir. Ağ kalitesine ait sayısal veriler de aşağıda Tablo 2.3’te verilmiştir.

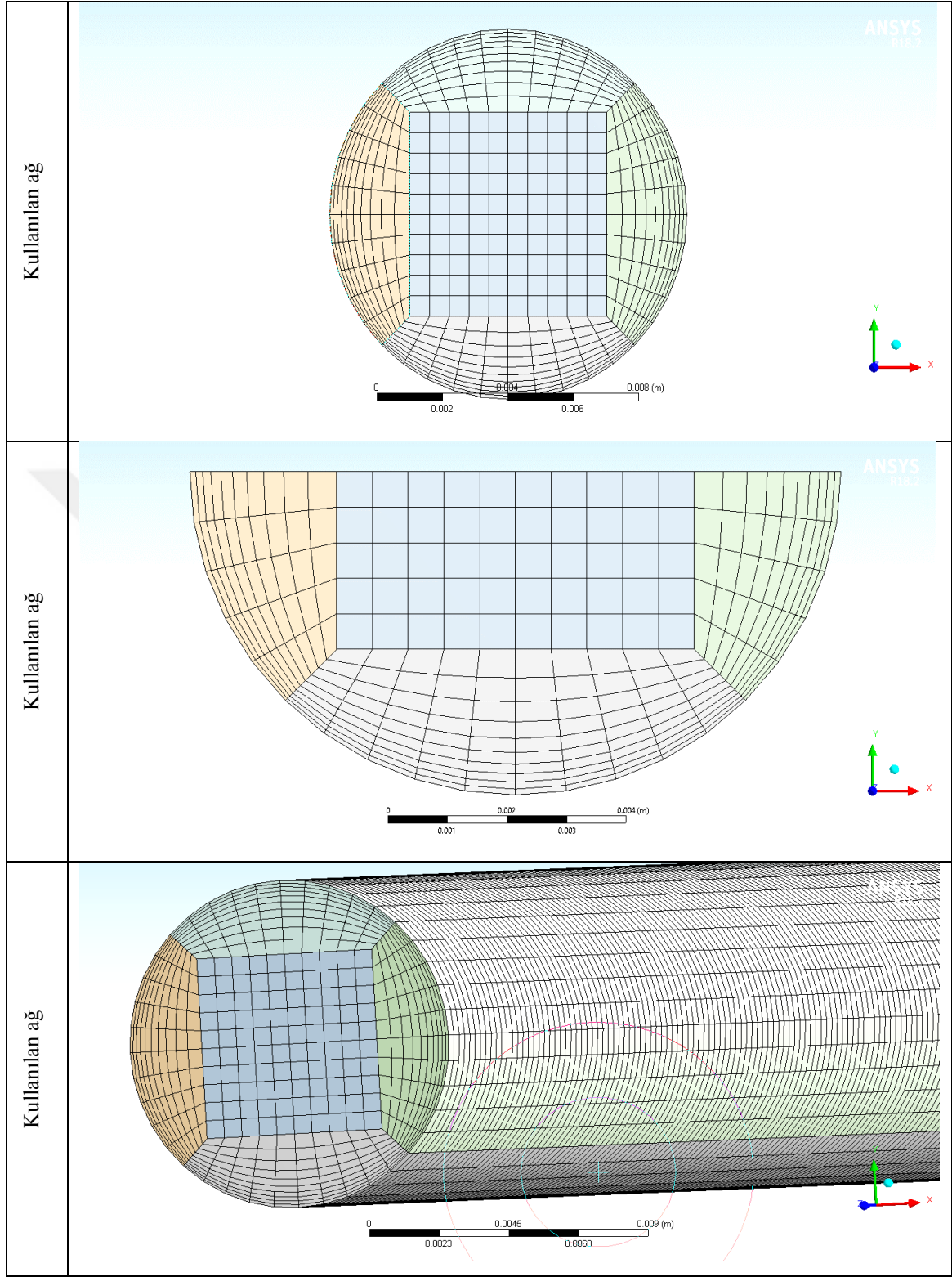
Tablo 2.3. Deneysel verilerle karşılaştırmak için oluşturulan modelin ağ yapısı bilgileri

Ağ verileri	Skewness (sapma)	Orthogonal Quality	Aspect oranı
Minimum	1.305×10^{-10}	0.558	1.2
Maksimum	0.500	1	28.192
Ortalama	7.8×10^{-2}	0.965	5.72
Nod sayısı	257000	Eleman sayısı	248000

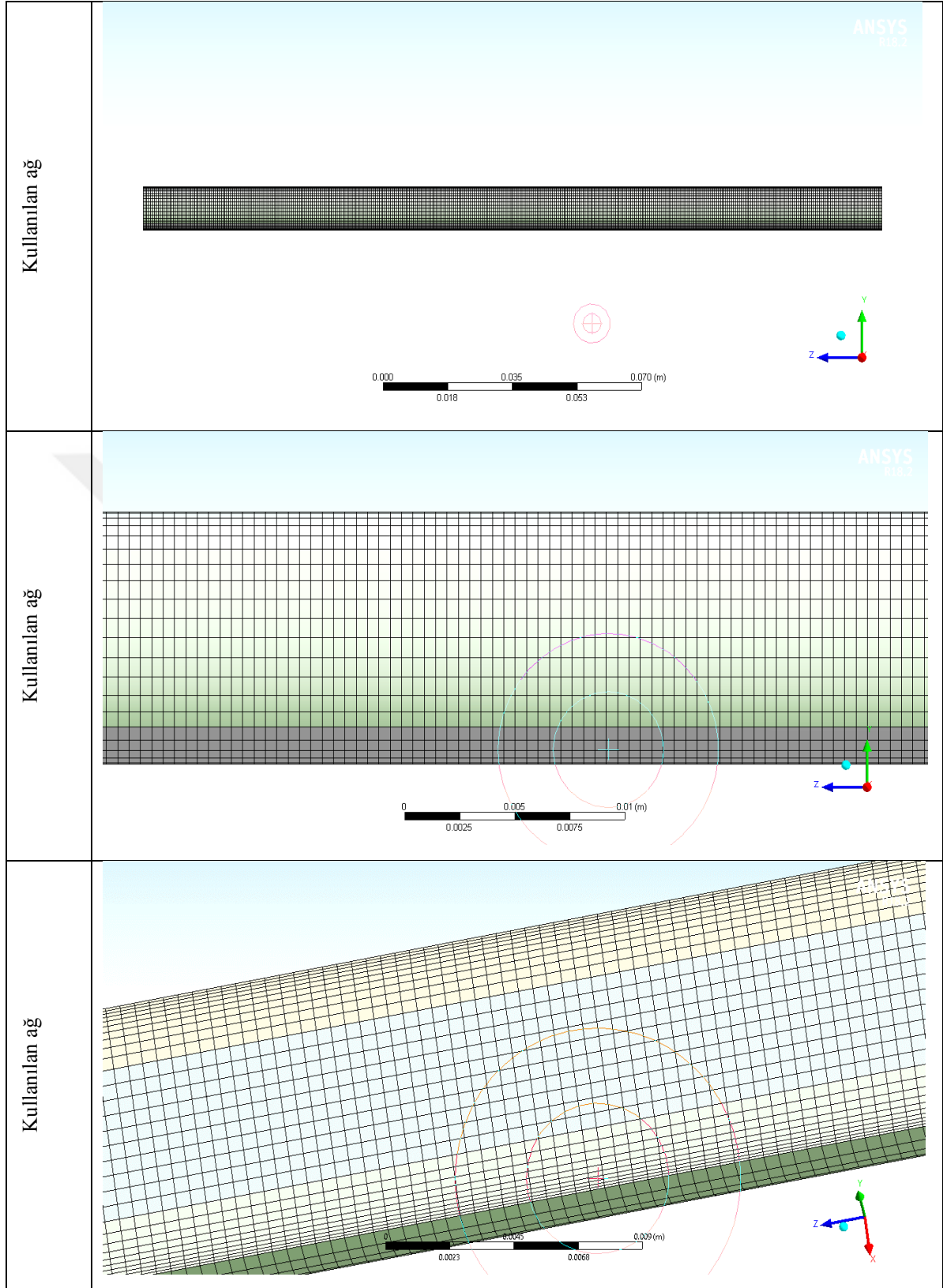
Deneysel olarak karşılaştırılan geometri dışında kalan sayısal analizler için oluşturulan model ve ağ yapısı aşağıda Şekil 2.23 ve Şekil 2.24’te sunulmuştur. Bu modelde de yine daha iyi olduğu anlaşılan bölünmüş geometrideki ağ yapısı kullanılmıştır.



Şekil 2.23. Sayısal modelleme için oluşturulan geometri



Şekil 2.24. Deneysel ile karşılaştırma dışındaki analizler için oluşturulan ağ yapısı



Şekil 2.24. Deneysel ile karşılaştırma dışındaki analizler için oluşturulan ağ yapısı (Devamı)

Bu ağ yapısına ait veriler aşağıda Tablo 2.4’te verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi sapma değeri 0’a yakın orthogonal kalite 1’e yakın (% 97116) ve ortalama aspect (en - boy) oranı 4.4573’tür. Nod ve eleman sayısında sırasıyla 202669 ve 194000’dir. Skewnes ve orthogonal kaliteye oluşturulan ağ yapısının kaliteli olduğuna karar verilmiştir.

Tablo 2.4. Deneysel karşılaştırma dışında oluşturulan ağ yapısının verileri

Ağ verileri	Skewness (sapma)	Orthogonal Quality	Aspect oranı
Minimum	1.3057e-010	0.77223	1.1417
Maksimum	0.5	1.0	15.317
Ortalama	8.8444e-002	0.97116	4.4573
Nod sayısı	202669	Eleman sayısı	194000

3. BULGULAR

Bulgular kısmında deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen veriler sunulmuştur. Burada Fe₃O₄-su nano akışkanı için birkaç parametrede deneysel sonuç elde edilmiş ve bu sonuçlar sayısal modelle karşılaştırılarak doğruluk derecesi test edilmiştir.

3.1. Deneysel Sonuçlar ve Sayısal Sonuçların Akışkan Hız karşılaştırmaları

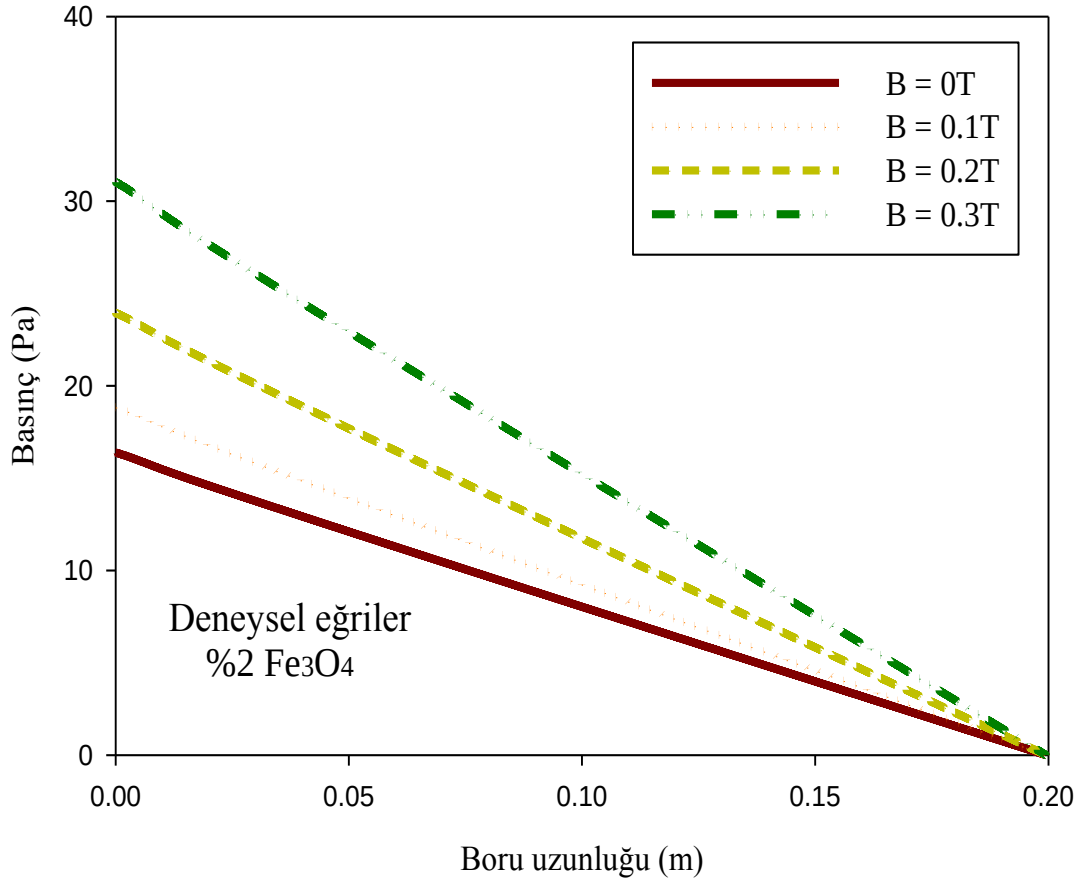
Çalışmanın deneysel kısmında, içinde elektriksel iletkenliği yüksek olan %2 Fe₃O₄ nano parçacık bulunan saf suyla hazırlanan nano akışkana dıştan manyetik alan uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda akışkan hızları debimetre ile ölçülmüştür. Deneylerde iç çapı 10.92 mm olan ½ inç standart plastik boru kullanılmıştır. Fırat Üniversitesi Kimya mühendisliği laboratuvarında bu akışkana ait viskozite ve yoğunluk sırasıyla 0.84x10⁻³ (kg/m.s) ve 1071 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Deneysel ölçümler sayısal ölçümler ile kıyaslanarak elde edilen bulgular aşağıda Tablo 3.1’de sunulmuştur. Tabloda aynı zamanda deneysel ve sayısal akışkan hızları arasında meydana gelen farklarda yüzde olarak belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde sayısal değerlerin daha yüksek olduğu ve manyetik alan kuvveti ile deneysel ve sayısal veriler arasındaki fark küçülmüştür.

Tablo 3.1. Sayısal ve deneysel olarak tespit edilen ortalama akışkan hızları ve fark değerleri

	B = 0T	B = 0.1T	B = 0.2T	B = 0.3T
Deneysel hız (m/s)	0.1456884	0.128888	0.120814	0.118864
Sayısal hız (m/s)	0.1532137	0.134534	0.125724	0.122381
% Fark	%5.1	%4.3	%4	%2.9

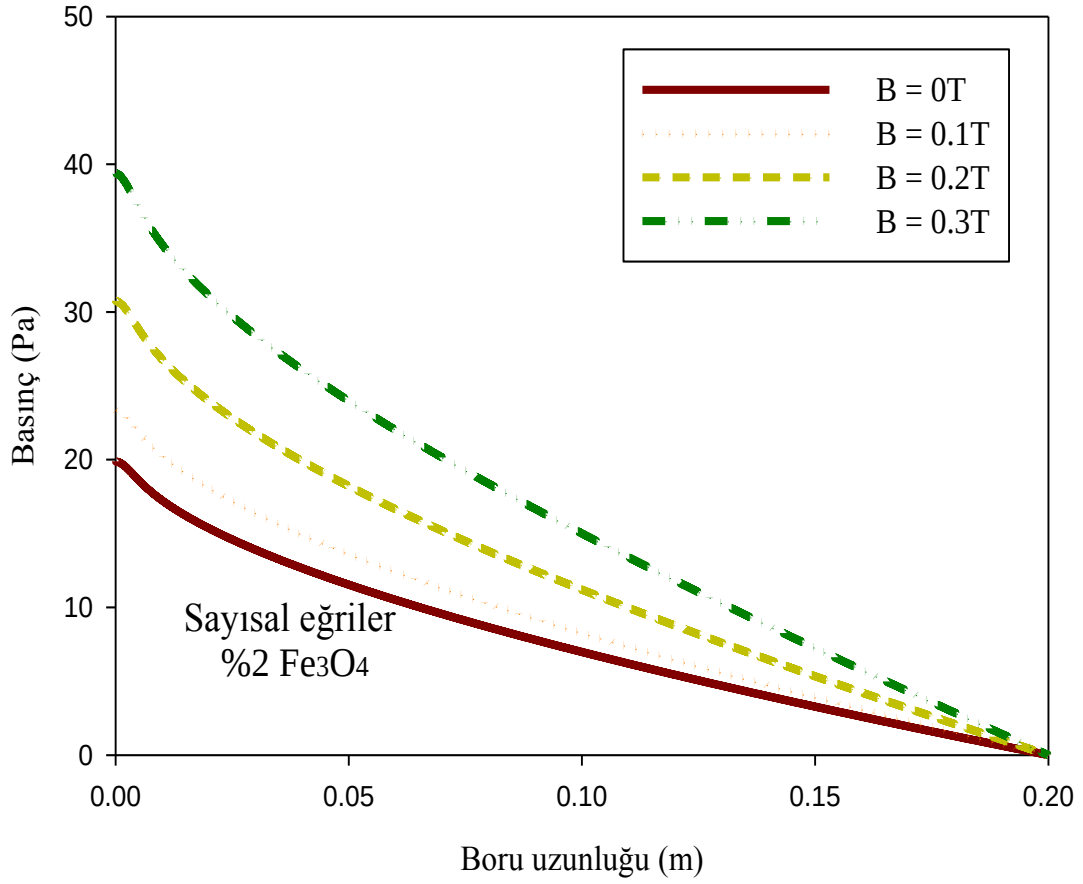
3.2. Deneysel Sonuçlar ve Sayısal Sonuçların Akışkan Basınç karşılaştırmaları

Deneysel olarak yapılan çalışmada 200 mm uzunluğundaki test bölgesinin giriş ve çıkışına bağlanan basınçölçer ile akışkanın manyetik alan kuvvetinin uygulanması sırasında meydana gelen basınç farkları ölçülmüştür. Sayısal analizde ise kanalın merkezi boyunca basınç değerlerinde meydana gelen değişimler elde edilmiş ve bu değerler birbirleri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 3.1. Farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe₃O₄-su nano akışkan için boru boyunca basınç farkının değişimi

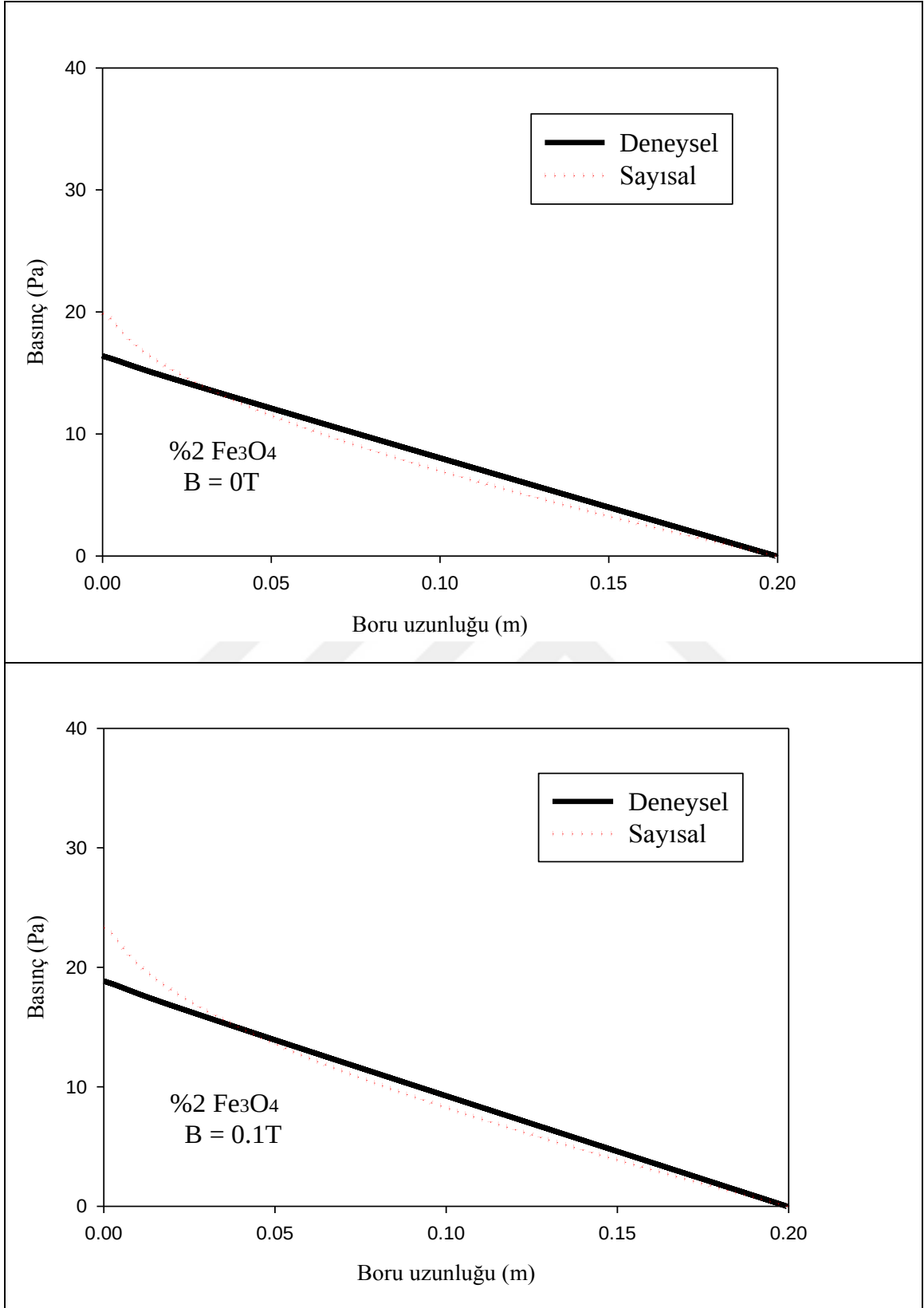
Farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe₃O₄-su nano akışkanına ait deneysel basınç değişimleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekilden manyetik alan kuvveti ile basıncın arttığı görülmektedir. Manyetik alanı kuvvetinin artmasına paralel olarak meydana gelen basınç değerleri arasındaki farkta büyümüştür. Aynı şartlarda sayısal olarak elde edilen verilerde aşağıda sunulmuştur.



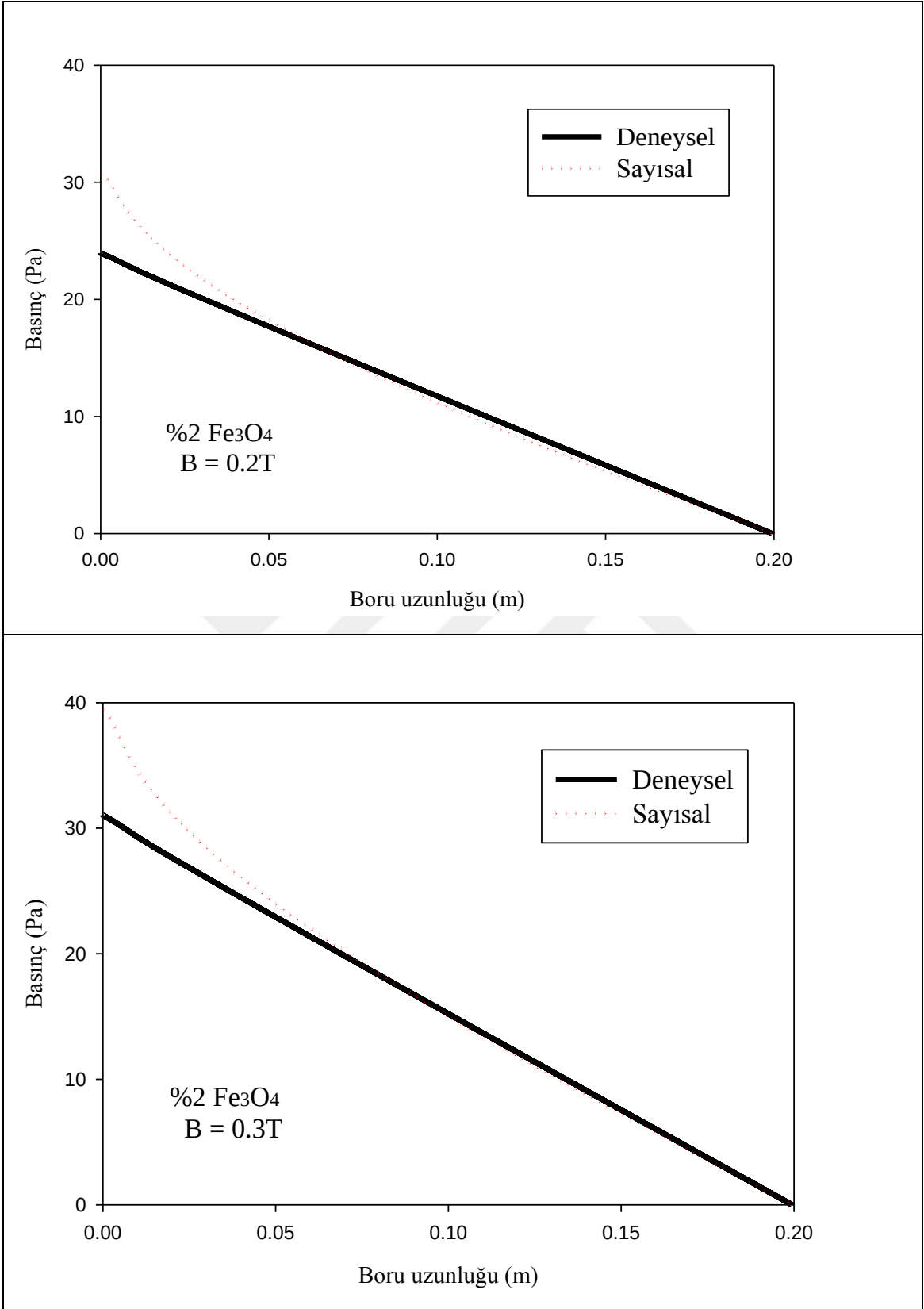
Şekil 3.2. Farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe_3O_4 -su nano akışkanına ait sayısal basınç değişimleri

Şekil 3.2’de farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe_3O_4 -su nano akışkanına ait sayısal basınç değişimleri tasvir edilmiştir. Deneysel sonuçlara benzer olarak basınç değerleri manyetik alan kuvveti ile artmıştır. Sayısal sonuçta kanalın merkezi boyunca ortalama her bir mm de bir ölçüm alındığı için verilerde meydana gelen değişim daha net olarak gözükmemektedir. Bütün durumlarda kanalın girişinden yaklaşık 0.05 mm mesafedeki uzunluğa kadar basınç değerlerinin büküldüğü görülmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki değişimleri daha iyi görmek için her bir manyetik alan değerinde ayrı ayrı olarak aşağıda verilmiştir.

Farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe_3O_4 -su nano akışkanına ait deneysel ve sayısal basınç karşılaştırmaları Şekil 3.3’te verilmiştir. Tüm manyetik alan şiddetlerinde basınç eğrilerinin birbirine benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.3. Farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe₃O₄-su nano akışkanına ait deneysel ve sayısal basınç değerlerinin karşılaştırmaları



Şekil 3.3. Farklı manyetik alan indüksiyonlarında $\phi = 0.02$ Fe₃O₄-su nano akışkanına ait deneysel ve sayısal basınç değerlerinin karşılaştırmaları (Devamı)

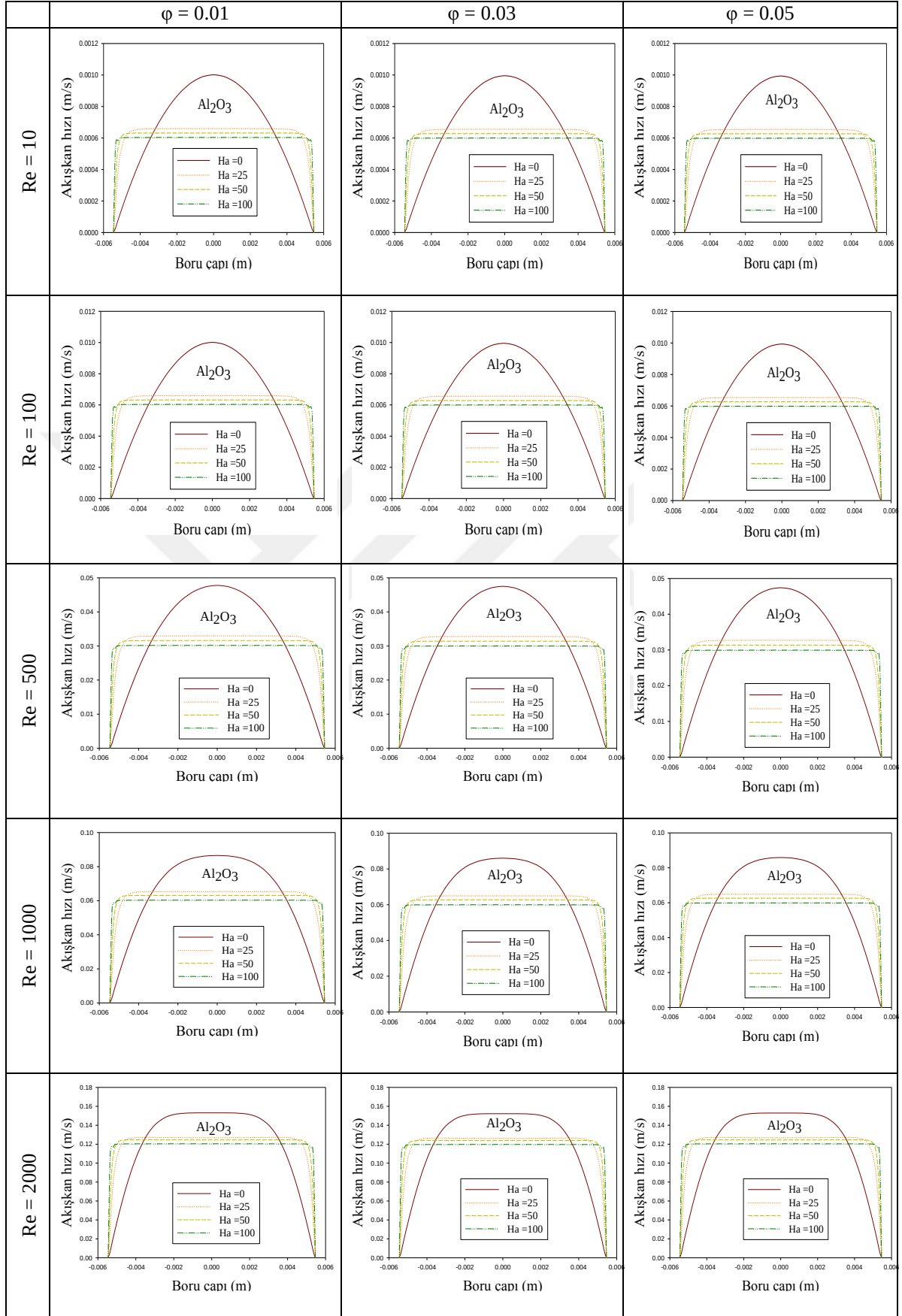
3.3. Al₂O₃, CuO ve TiO₂ – Su Nano Akışkanlarının Hız Profilleri

Bu bölümde, borunun çıkışından girişine doğru 20 mm mesafede boru çapı boyunca farklı akışkan tiplerinin hız değişimleri araştırılmıştır. Araştırma 3 farklı nano akışkan ile saf akışkan için yapılmıştır. Nano akışkan büyüklüğü 10 nm’ den küçük olduğu için akışkan tek fazlı olarak çözülmüştür. Çalışmada nano hacimsel oranı, Re sayısı ve Ha sayısının akışkan hızı üzerindeki etkisi ile meydana değişim grafiksel olarak sunulmuştur. Çalışmanın genel akışkanı olarak kullanılan bu nano akışkanlara ait elektrik ve termo-fiziksel özellikler Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu üç akışkan tipi için kanala giren akışkanın sıcaklığı 50 °C, cidar sıcaklığı 30 °C ve çıkış sıcaklığı 25 °C’dir.

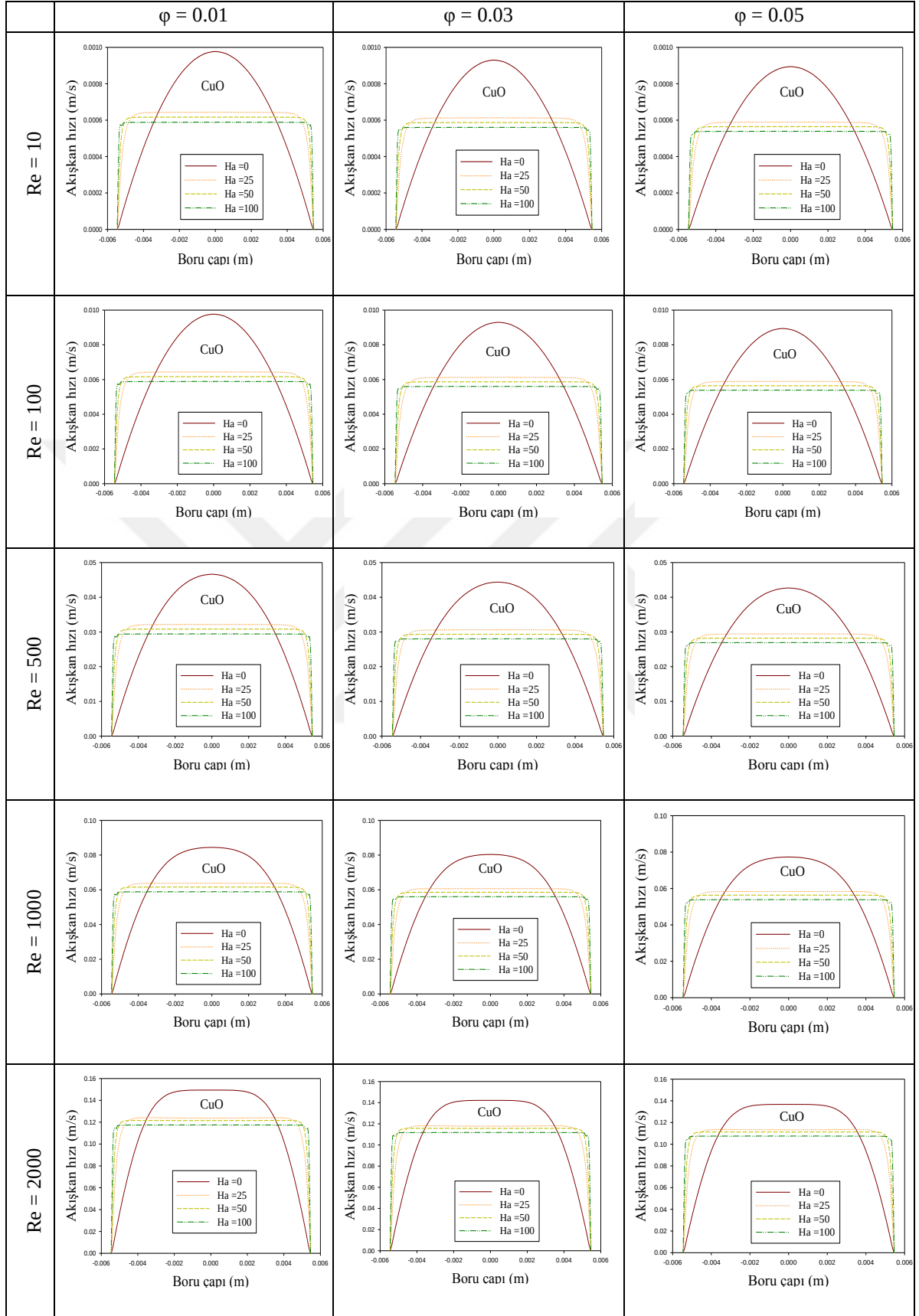
Tablo 3.2. Temel akış ve nano parçacıkların elektrik ve termo-fiziksel özellikleri

	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	k (W/mK)	μ (kg/(m.s))	σ (S/m)
Su (50°C) [116]	988.1	4181	0.644	0.000547	0.05
Al₂O₃ [117]	3970	765	25	---	10 ⁻¹²
CuO [117]	6500	540	18	---	10 ⁻¹⁰
TiO₂ [78]	4250	686.2	8.9538	---	1x10 ⁻¹²
Fe₃O₄ [118]	5180	670	9.7	---	0.74x10 ⁶

Çeşitli Re sayıları ve nano hacimsel oranlarında manyetik alan kuvvetinin boru çapı boyunca akışkan hızlarının karşılaştırmaları Al₂O₃ için Şekil 3.4’ te, CuO için Şekil 3.5’ te ve TiO₂ için Şekil 3.6’ da gösterilmiştir. Sonuçlar beş farklı Re sayısı ve üç farklı nano hacimsel oranı için elde edilmiştir.



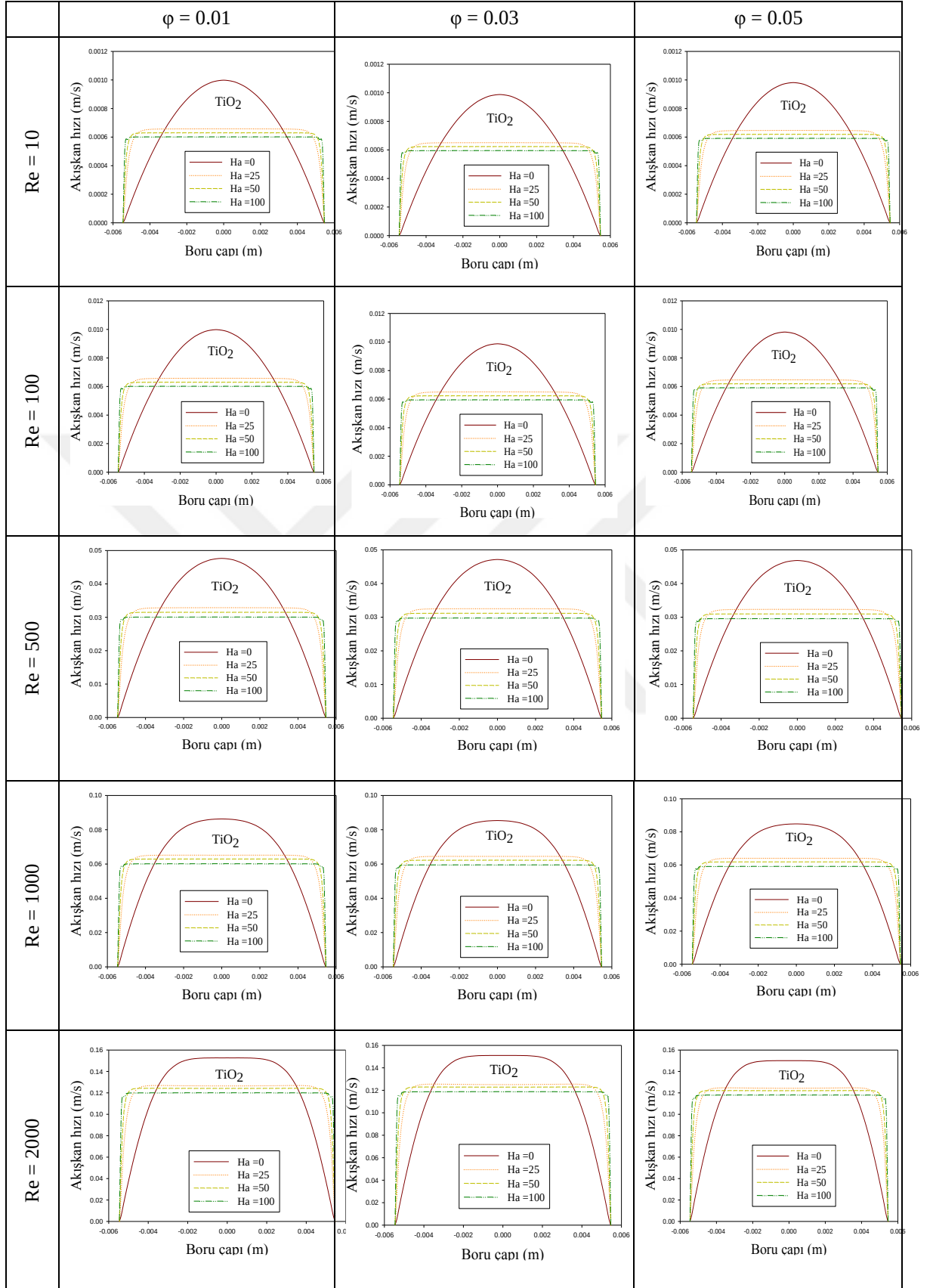
Şekil 3.4. Al_2O_3 – su nano akışkanının çeşitli Re değerleri ve nano hacimsel oranlarında manyetik alan kuvvetlerinin boru çapı boyunca akışkan hız profilleri



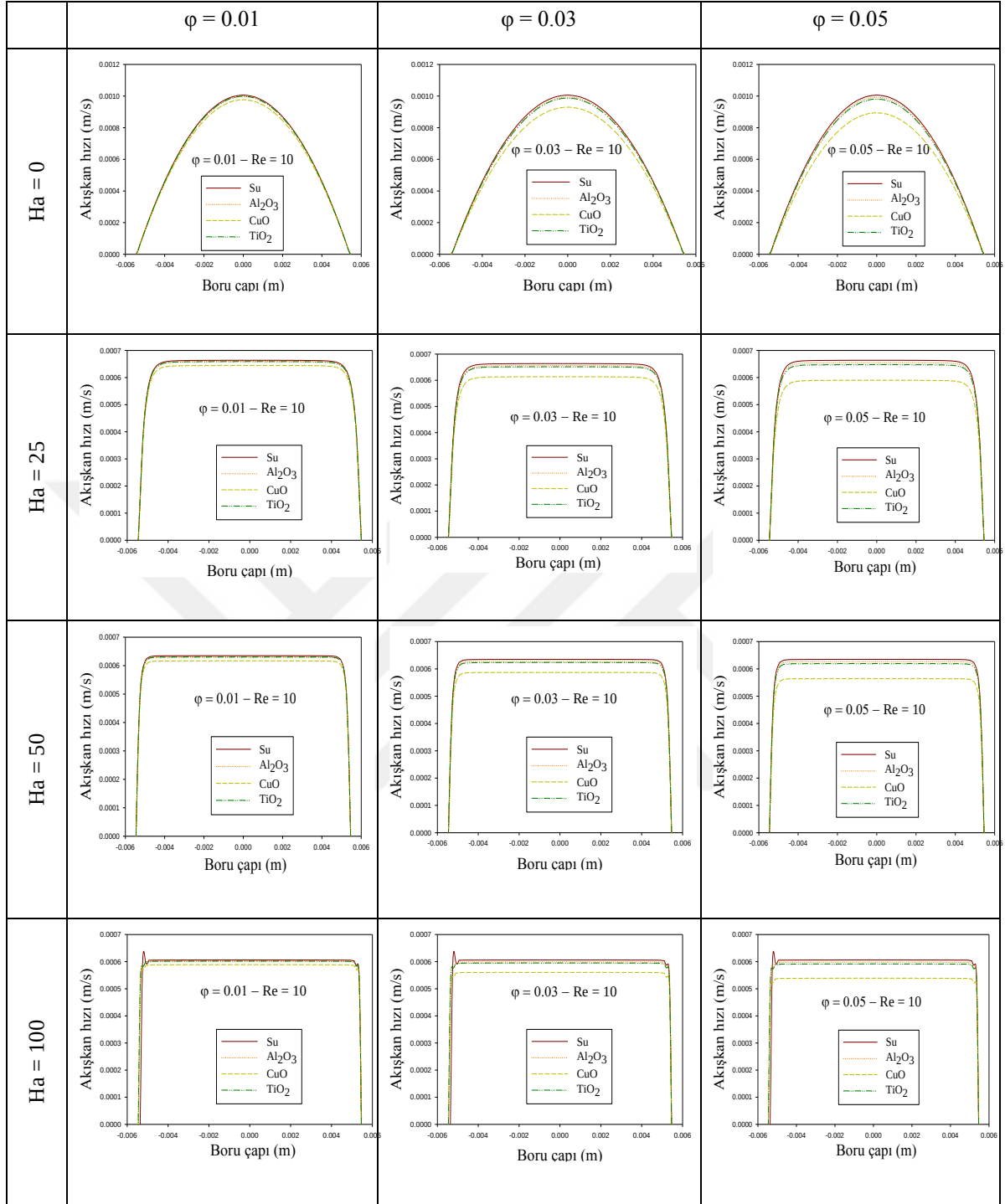
Şekil 3.5. CuO – su nano akışkanının çeşitli Re değerleri ve nano hacimsel oranlarında manyetik alan kuvvetlerinin boru çapı boyunca akışkan hızlarının karşılaştırmaları

Re sayıları sırasıyla $Re = 10, 100, 500, 1000$ ve 2000 ve nano hacimsel oranları da $\phi = 0.01, 0.03$ ve 0.05 olarak seçilmiştir. Hartmann sayıları ise $Ha = 0, 25, 50$ ve 100 olarak tercih edilmiştir. Burada laminar şartlarda, hem düşük Re sayısından yüksek Re sayısına geçerken hem de nano parçacığın etkisiyle akışkanın hareketinde nasıl bir değişimin meydana geldiği araştırılmıştır.

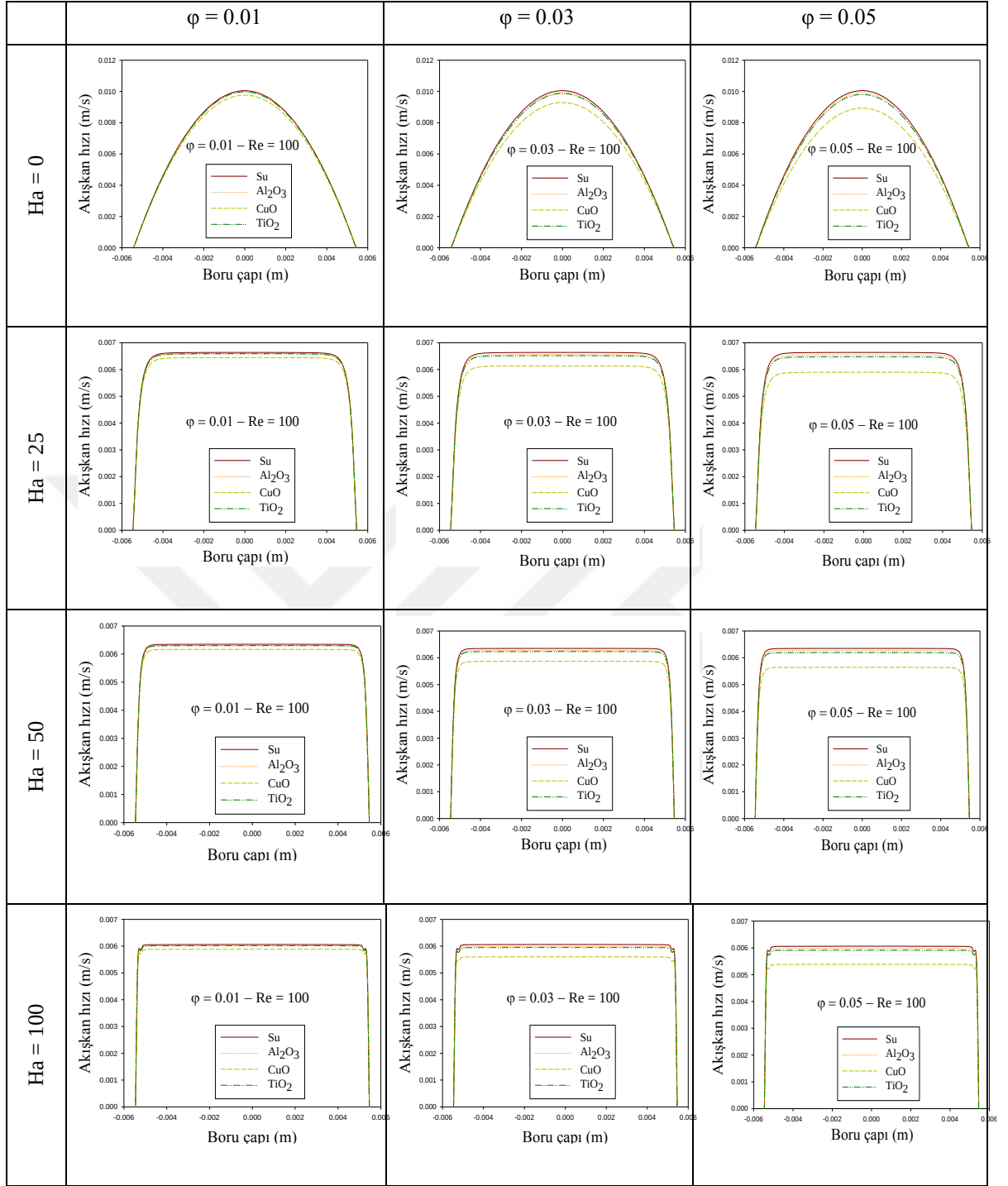
Şekillerde (Şekil 3.4-3.6), yukarıdan aşağıya artan Re etkisi soldan sağa nano parçacık etkisi görülmektedir. Burada, her bir grafik, manyetik alan etkisinin olmadığı ve üç farklı durumda manyetik alan kuvveti ile boru çapında meydana gelen hız değişimleri verilmiştir. Re sayısının artmasıyla hızlarda büyük bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Şekil (Şekil 3.4-3.6) ölçekleri, $\phi = 0.01$ Al_2O_3 -su nano akışkanı için incelendiğinde $Re = 10$ için $V = 0.0012$ m/s bu değer Re sayısının artması ile artarak $Re = 2000$ için $V = 0.18$ m/s değerini aldığı anlaşılmıştır. CuO ve TiO_2 içinde hız değerlerinin buna benzer fakat farklı değer aldığı görülmüştür. Ayrıca, Re sayısı arttıkça hız eğrilerinin daha çok düzleştiği görülmektedir. Tüm grafikler (Şekil 3.4-3.6 içindeki) için, kanala dıştan uygulanan manyetik alan şiddetinin akışkan hızını önemli oranda düşürdüğü belirlenmiştir. Buradaki düşüş nano parçacığın eklenmesi ile meydana gelen düşüşten daha büyüktür. Manyetik alan ile hızlardaki bu azalmaların nedeni Lorentz kuvvetinin geciktirici etkisindendir. Tüm grafiklerde (Şekil 3.4-3.6 içindeki) manyetik alan uygulandığında manyetik alanın olmadığı duruma göre hızlardaki düşüşün çok büyük olduğu, ancak manyetik alan altında iken bu alanın artması ile meydana gelen hız düşümünün daha az olduğu görülmektedir. Şekillerden (Şekil 3.4-3.6) den tüm hız profillerin aynı eğilimde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.6. TiO_2 – su nano akışkanının çeşitli Re değerleri ve nano hacimsel oranlarında manyetik alan kuvvetlerinin uygulanması ile boru çapındaki akışkan hız değişimleri



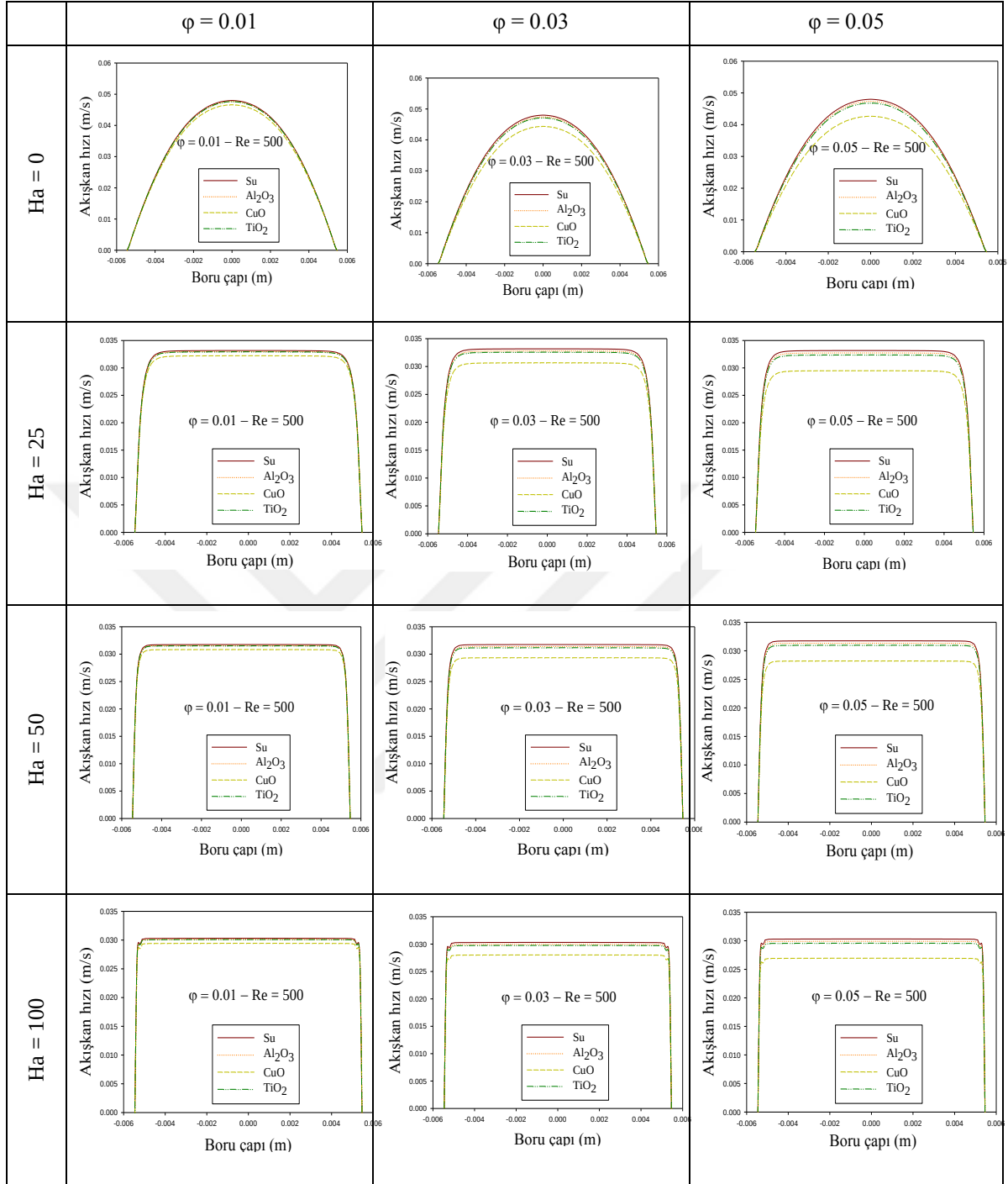
Şekil 3.7. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırılmaları (Re = 10)



Şekil 3.8. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırmaları ($Re = 100$)

Dört farklı Ha sayısı ve üç farklı nano akışkan hacimsel oranında çeşitli nano akışkan tiplerinin boru çapındaki hız değerleri $Re = 10$ için Şekil 3.7’de, $Re = 100$ için Şekil 3.8’de, $Re = 500$ için Şekil 3.9’da, $Re = 1000$ için Şekil 3.10’da ve $Re = 2000$ için Şekil 3.11’de verilmiştir. Tüm şekillerde (Şekil 3.7 - 3.11) soldan birinci sütunlar $\phi = 0.01$, ikinci sütunlar $\phi = 0.03$ ve en sağdaki sütunlar $\phi = 0.05$ nano akışkan hacimsel oranını göstermektedir. Aynı şekilde yukarıdan aşağıya birinci satır manyetik alan kuvvetinin olmadığı ($Ha = 0$), ikinci satırlar $Ha = 25$, üçüncü satırlar $Ha = 50$ ve dördüncü satırlar $Ha = 100$ olan manyetik alan altındaki farklı akışkan tiplerini göstermektedir. Bütün durumlarda (Şekil 3.7 - 3.11) akışkanların hızlarının birbirinden farklı olduğu anlaşılmıştır. Nano akışkan hacimsel oranının en fazla olduğu durumda akışkan hareketinin birbirinden farklılaşması daha belirgin olmuştur.

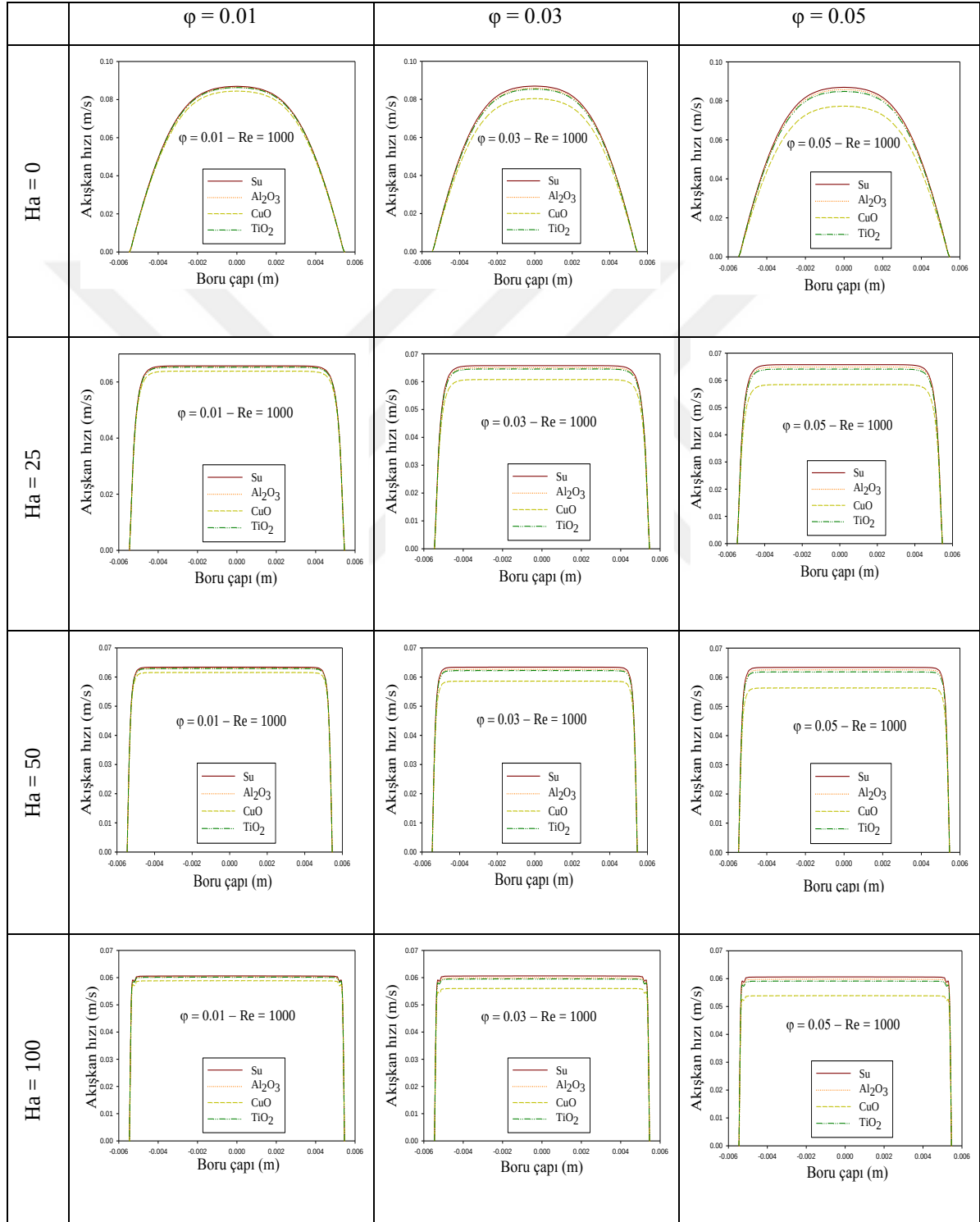
Burada akışkan tiplerinin termo fiziksel özelliklerinin birbirinden farklı olması ve katılan nano parçacık oranının artması, bu farklılaşma üzerinde önemli bir rol oynamıştır. $Ha = 0$ ’da hız eğrileri parabolik şekil almışken $Ha > 0$ değerleri için bu eğrilerin düzleştiği görülmektedir. Yine $Ha = 0$ durumlarında $Re = 10$, için hız eğrileri parabolik iken, Re değerlerinin artması ile bu eğrilerin düzleştiği gözlemlenmiştir. Burada laminar akışkandan türbülanslı akışkana yaklaşılmışından dolayı eğriler düzleşmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi Şekillerin (Şekil 3.7 - 3.11) içerisindeki her bir grafikte nano parçacık tiplerinin katkısıyla oluşan farklı nano akışkanların hız kıyaslanması vardır. Ayrıca nano akışkanların temel akışkana göre değişimlerini göstermek için saf su eğrileri de elde edilmiştir.



Şekil 3.9. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırmaları ($Re = 500$)

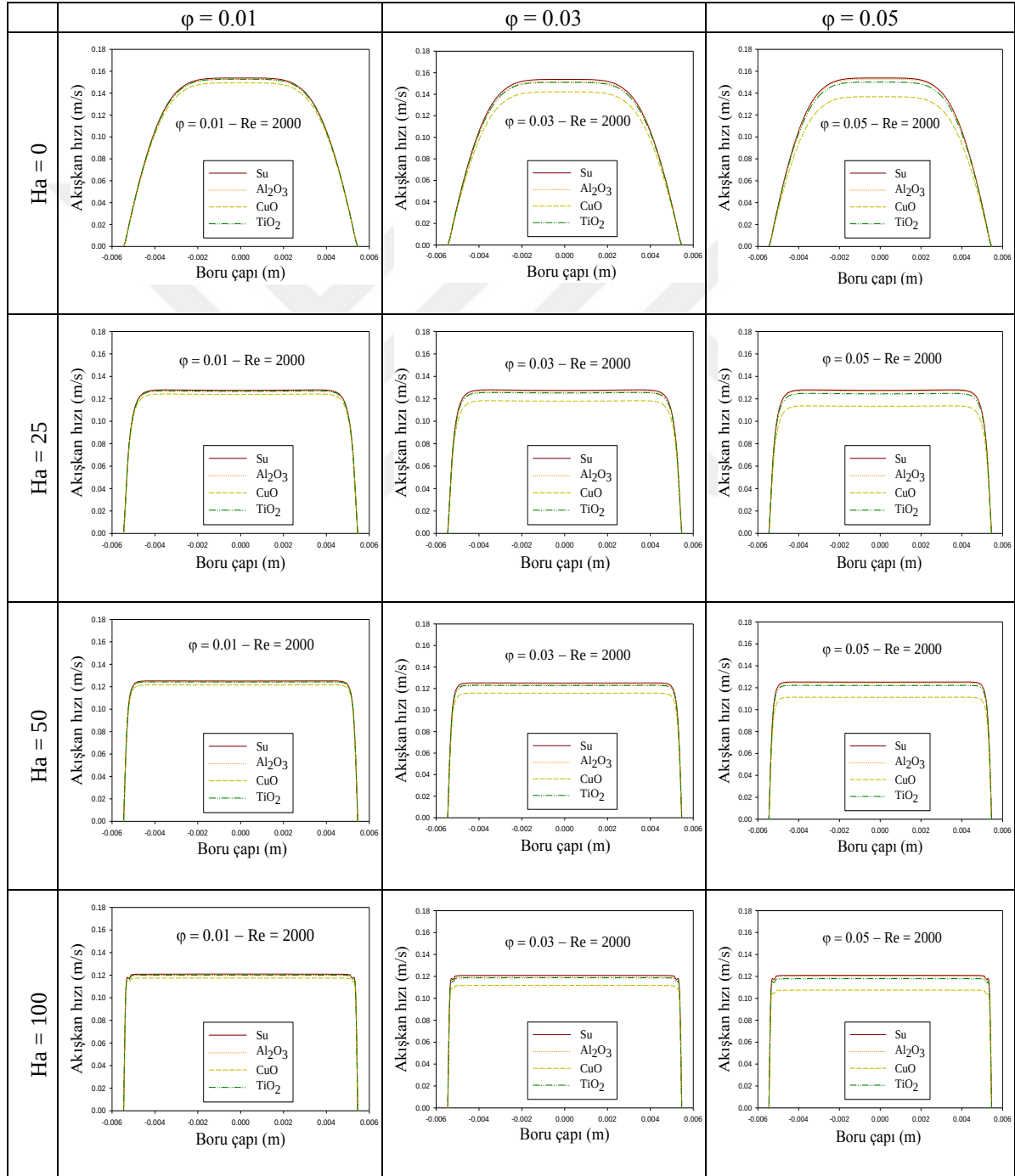
Grafikler (Şekil 3.7 - 3.11 içerisinde yer alan) incelendiğinde, bütün durumlarda saf su eğrisinin en üstte olduğu yani nano katılmamış akışkanın hızının en yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Nano akışkanların hızı bütün nano tipleri için saf akışkanınkinden daha düşüktür. Bunun nedeni saf akışkana katılan nano parçacıklarının yoğunluğunun saf akışkanınkinden büyük olmasından kaynaklanmaktadır. En az düşüşün Al_2O_3 için en fazla

düşüşün ise CuO için olduğu belirlenmiştir. Bu durum nano parçacık yoğunluğunun büyüklüğüyle ilişkili olduğundandır. Şekillerden nano parçacık yoğunluğu ne kadar büyükse nano akışkanın hızının o kadar düştüğü anlaşılmaktadır. Özetle nano akışkan tipleri arasındaki sıralamanın saf su > Al₂O₃ > TiO₂ > CuO olduğu tespit edilmiştir. Akışkanların yoğunlukları arasında ise bu sıralama su < Al₂O₃ < TiO₂ < CuO şeklindedir.



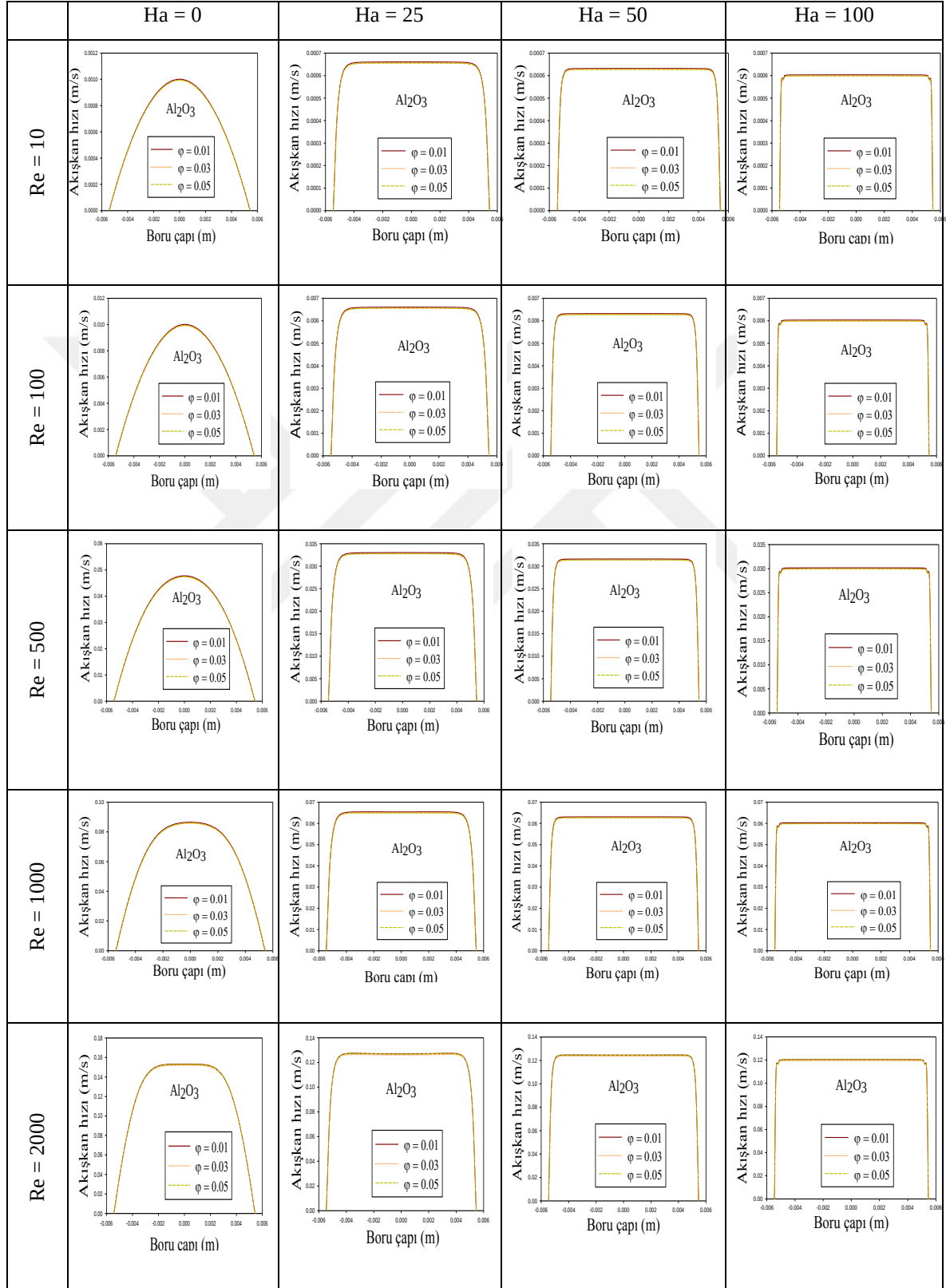
Şekil 3.10. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırılmaları (Re = 1000)

Re = 10 olarak hesaplanan Şekil 3.7 incelendiğinde, Ha = 100’de kanalın köşelerinde hız eğrilerinin ani bir pik attığı gözlemlenmiştir. Literatürde buna benzer eğrilere rastlamak mümkündür. Bu pik özellikle Ha = 100 olan tüm grafiklerde (Şekil 3.7 - 3.11) mevcuttur, fakat Re = 10 dışındaki sonuçlarda kanalın ortasındaki hız eğrilerinin üzerine çıkmamıştır. Re sayısının artmasına bağlı olarak meydana gelen bu pikler azalma eğilimi göstermiştir. Bu düşük hıza sahip akışkanın güçlü manyetik alan tarafından çok daha fazla etkilendiğini ve daha çok elektriksel bir etkileşim yaptığını göstermektedir.



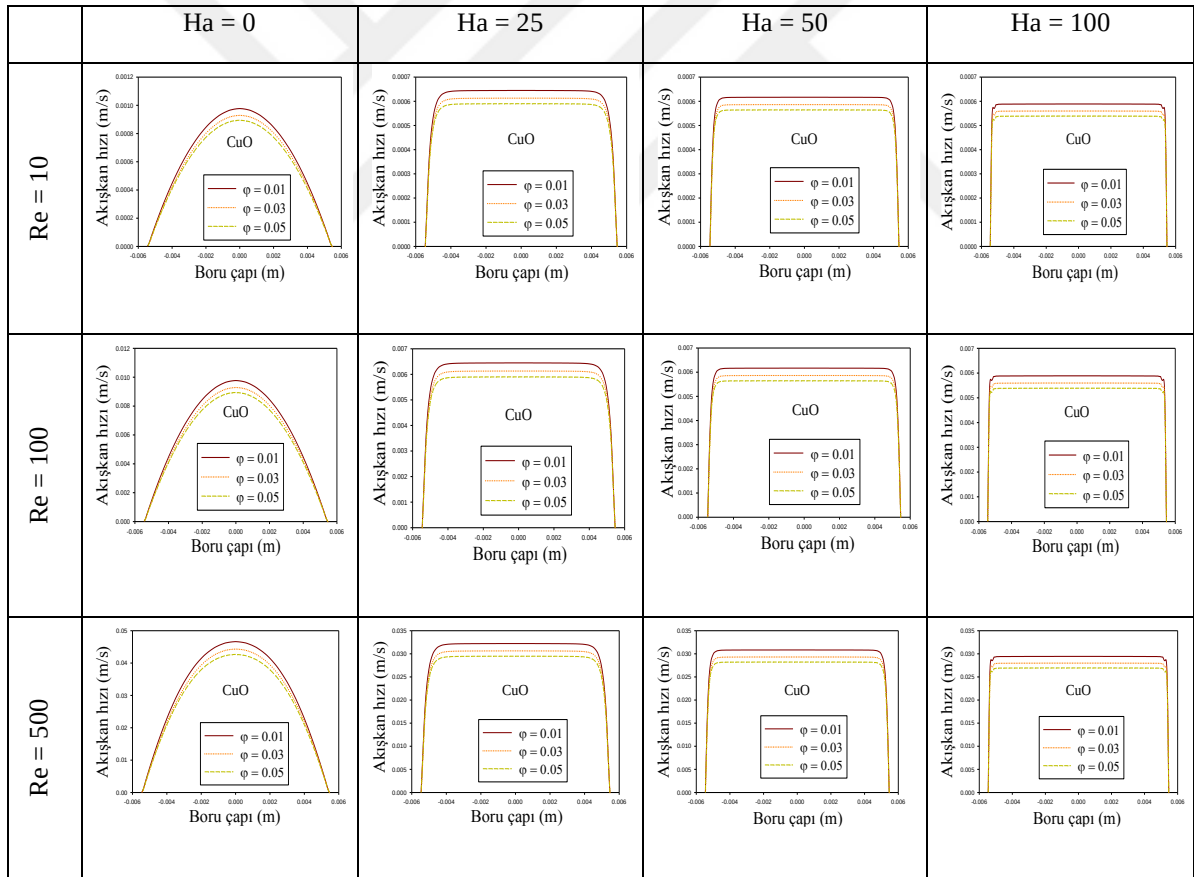
Şekil 3.11. Çeşitli Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında bazı nano parçacık tiplerinin karşılaştırılması (Re = 2000)

Şekil 3.12, Al_2O_3 -su, Şekil 3.13, CuO -su ve Şekil 3.14 TiO_2 -su nano akışkanı için farklı Re ve Ha sayılarında her bir grafiğin içinde nano akışkan hacimsel oranının analizini içermektedir.

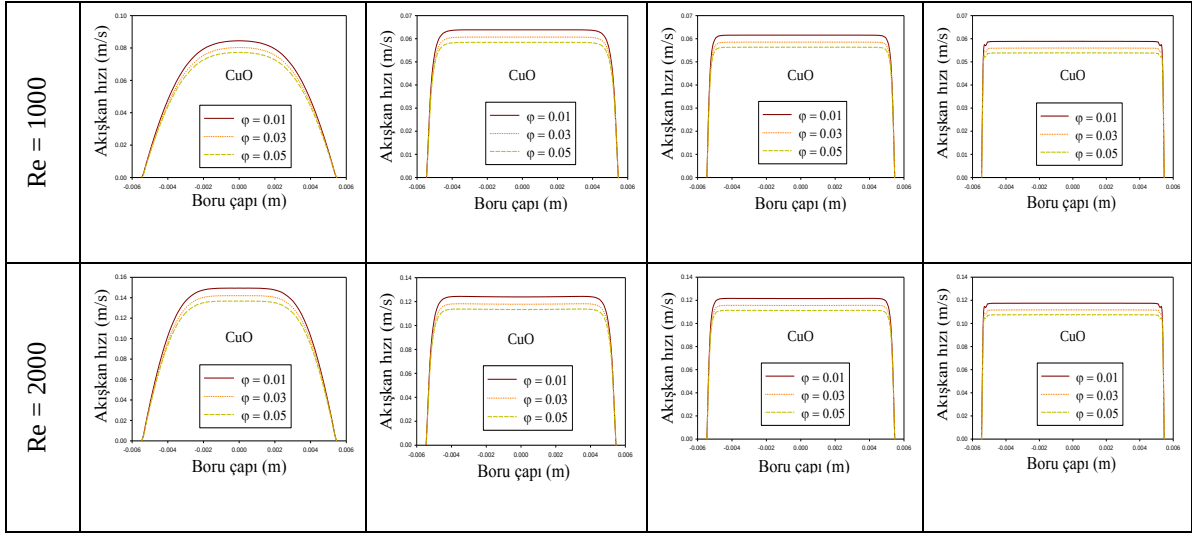


Şekil 3.12. Farklı Re sayıları ve Ha sayılarında Al_2O_3 nano akışkanının hacimsel oranlarının kıyaslanması

Her üç şekilde de (Şekil 3.12 - 3.14) birinci satırdan son satıra kadar $Re = 10 - 2000$ ve birinci sütundan son sütuna kadar $Ha = 0 - 100$ arasındaki analiz sonuçlarını temsil etmektedir. Daha önceki Şekillerde (Şekil 3.7 - 3.11) nano akışkanların bütün oranlarda akışkan hızının, temel akışkanın hızından daha düşük olduğu açıklanmıştı. Onun için burada ayrıca temel akışkan olan saf su eğrisi tekrardan incelenmemiştir. Sadece nano akışkan oranlarının birbirine göre durumunun daha net anlaşılması için her bir grafikte (Şekil 3.12 - 3.14) $\phi = 0.01 - 0.05$ arasındaki değişimler analiz edilmiştir. Önceki şekillerden farklı olarak burada kanalın ortasındaki eğrilerin üzerine çıkan herhangi bir ani pik çıkışına rastlanılmaması göze çarpmaktadır. Özellikle $Re = 10$ 'da pik atan akışkanın temel akışkan suya ait olduğu açıkça belirlenmiştir. Bu sonuç akışkanın yoğunluğuyla da ilişkilendirilebilir. Nano parçacıkların eklenmesiyle artan yoğunluk hatta değişen diğer termo fiziksel özellikler de etkili olmuş olabilir.



Şekil 3.13. Farklı Re sayıları ve Ha sayılarında CuO nano akışkanının hacimsel oranlarının kıyaslanması

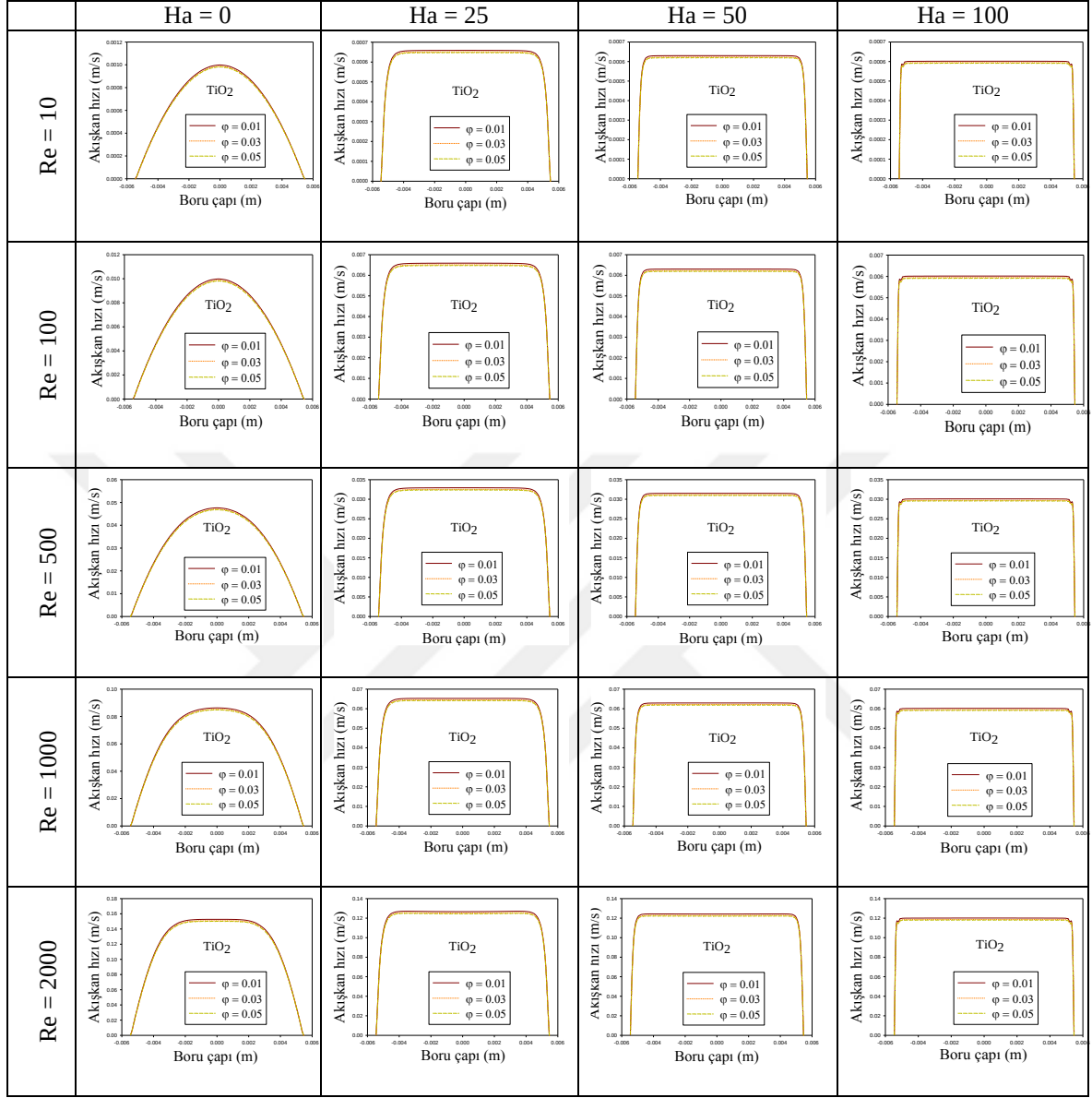


Şekil 3.13. Farklı Re sayıları ve Ha sayılarında CuO nano akışkanının hacimsel oranlarının kıyaslanması (Devamı)

Al_2O_3 – su nano akışkanında akış oranları arasındaki farkın özellikle de $\phi = 0.01$ ve $\phi = 0.03$ için hız eğrileri arasındaki değişimin çok az olduğu ve $\phi = 0.05$ için hız düşümünün daha fazla ancak $Re = 2000$ daha az olduğu görülmektedir. Burada Al_2O_3 nano parçacığın termo fiziksel özelliklerinden yoğunluğun, çalışılan temel akışkanın özelliklerine yakın olması ile meydana gelen hız değişimleri arasındaki farkın az olmasına neden olmuştur. Şekil 3.12 yakından incelendiğinde en yüksek nano parçacık yoğunluğuna sahip akışkanın hız verilerinin daha belirgin bir şekilde düştüğü görülmektedir.

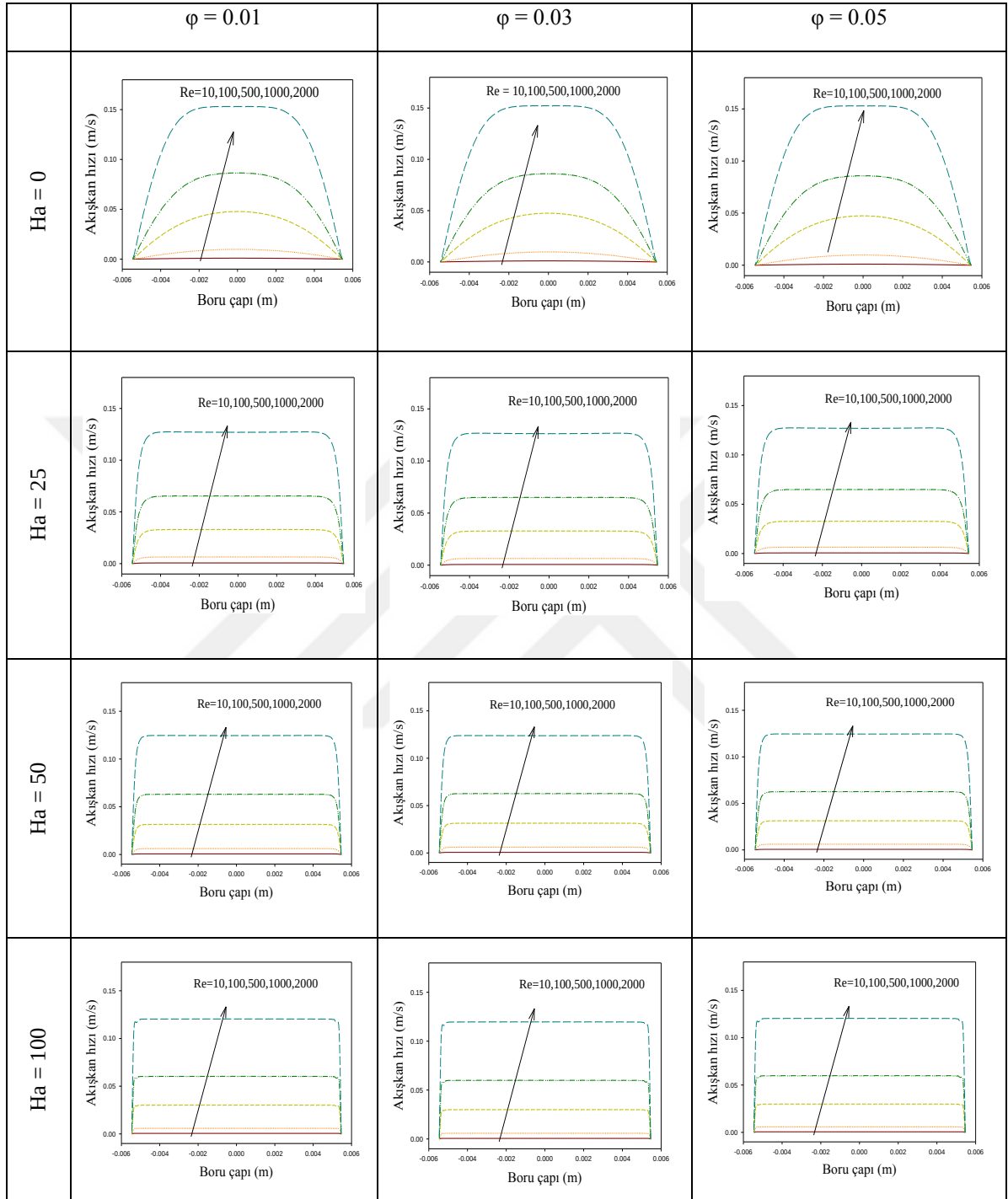
İçinde CuO – su nano akışkanı bulunan Şekil 3.13 içindeki grafikler ayrı ayrı incelendiğinde nano akışkan hacimsel oranları arasındaki farkın çok daha fazla olduğu net olarak görülmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi yoğunluğun Al_2O_3 -su nano akışkanına göre çok daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi sabit Re sayısı ile ilgili hesaplamalarda yoğunluk ile akışkan hızı ters orantılıdır. Dolayısıyla yoğunluk arttıkça akışkan hızının azalması beklenen bir olgudur.

Şekil 3.14’e bakıldığında akışkan hızlarının Al_2O_3 ’ten daha fazla fakat CuO’ten daha az değiştiği görülmektedir. Şekilden nano hacim oranı arttıkça nano akışkanın hızının azaldığı anlaşılmıştır. Bu TiO_2 nano parçacık yoğunluğunun Al_2O_3 ile CuO arasında olmasının bir sonucudur.



Şekil 3.14. Farklı Re sayıları ve Ha sayılarında TiO₂ Nano akışkanının hacimsel oranlarının kıyaslanması

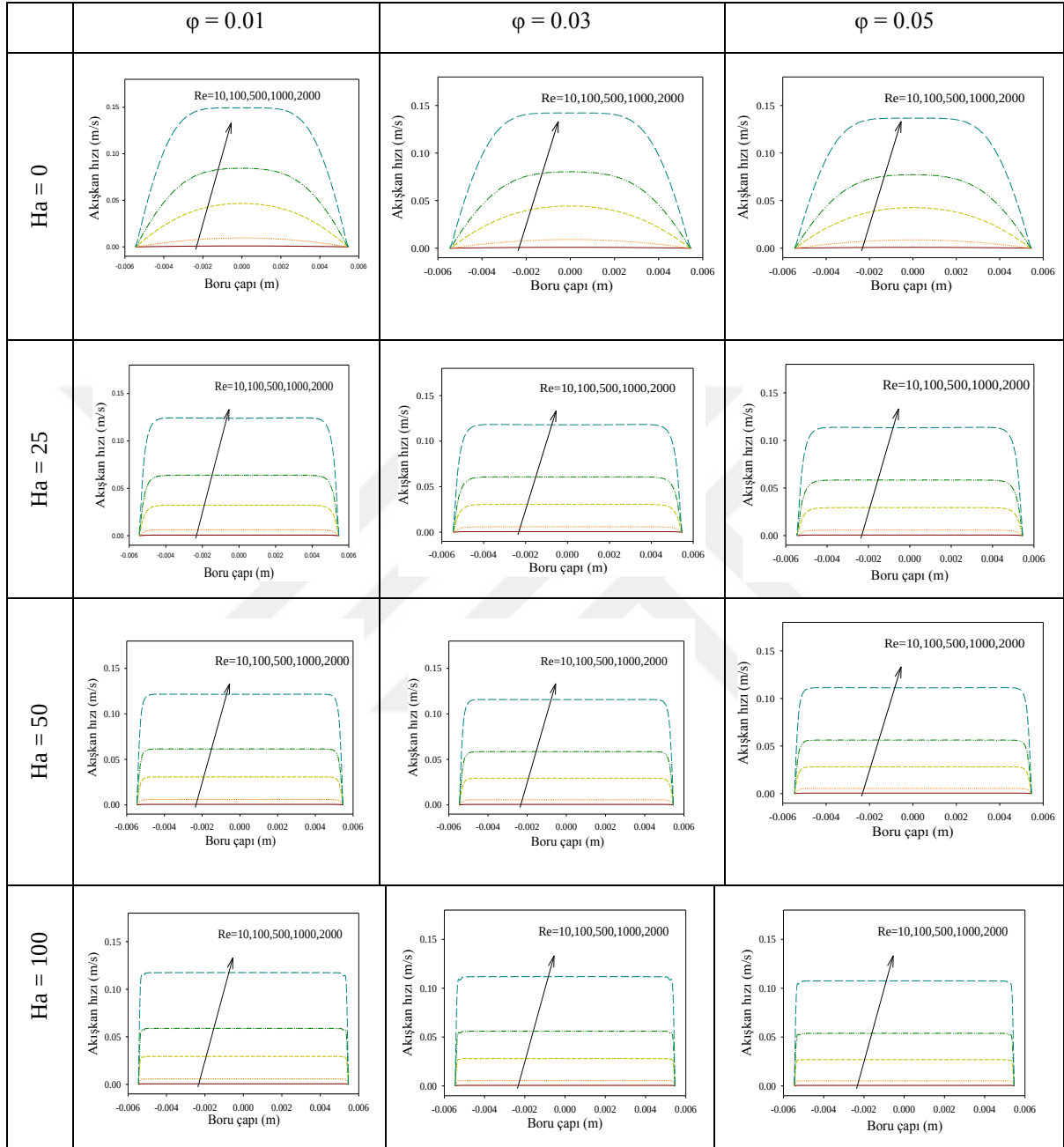
Şekil 3.15’de Al₂O₃ için, Şekil 3.16’da CuO için ve Şekil 3.17’de TiO₂ için çeşitli hacimsel oran ve manyetik alan kuvvetlerinde Al₂O₃-su nano akışkanının çap ile Re değişimleri gösterilmiştir. Buradaki her bir satırda sabit Ha sayıları ve değişken nano akışkan hacimsel oranları verilmiştir. Bu şekillerde, aynı grafik üzerinde Re sayısının boru çapı ile değişimi daha net gözükmetedir



Şekil 3.15. Çeşitli hacimsel oran ve manyetik alan kuvvetlerinde Al_2O_3 -su nano akışkanının çap boyunca Re sayısı ile hız değişimleri

Şekillerdeki (Şekil 3.15 – 3.17) bütün grafiklerden Re sayısının artması ile akışkan hızlarının arttığı açıkça anlaşılmaktadır. Bu Şekillerde (Şekil 3.15 – 3.17), $\text{Re} = 10$ için hız değerlerinin sıfıra yakın olduğu ve Re sayısının artması ile birlikte hız değerlerinin orantılı

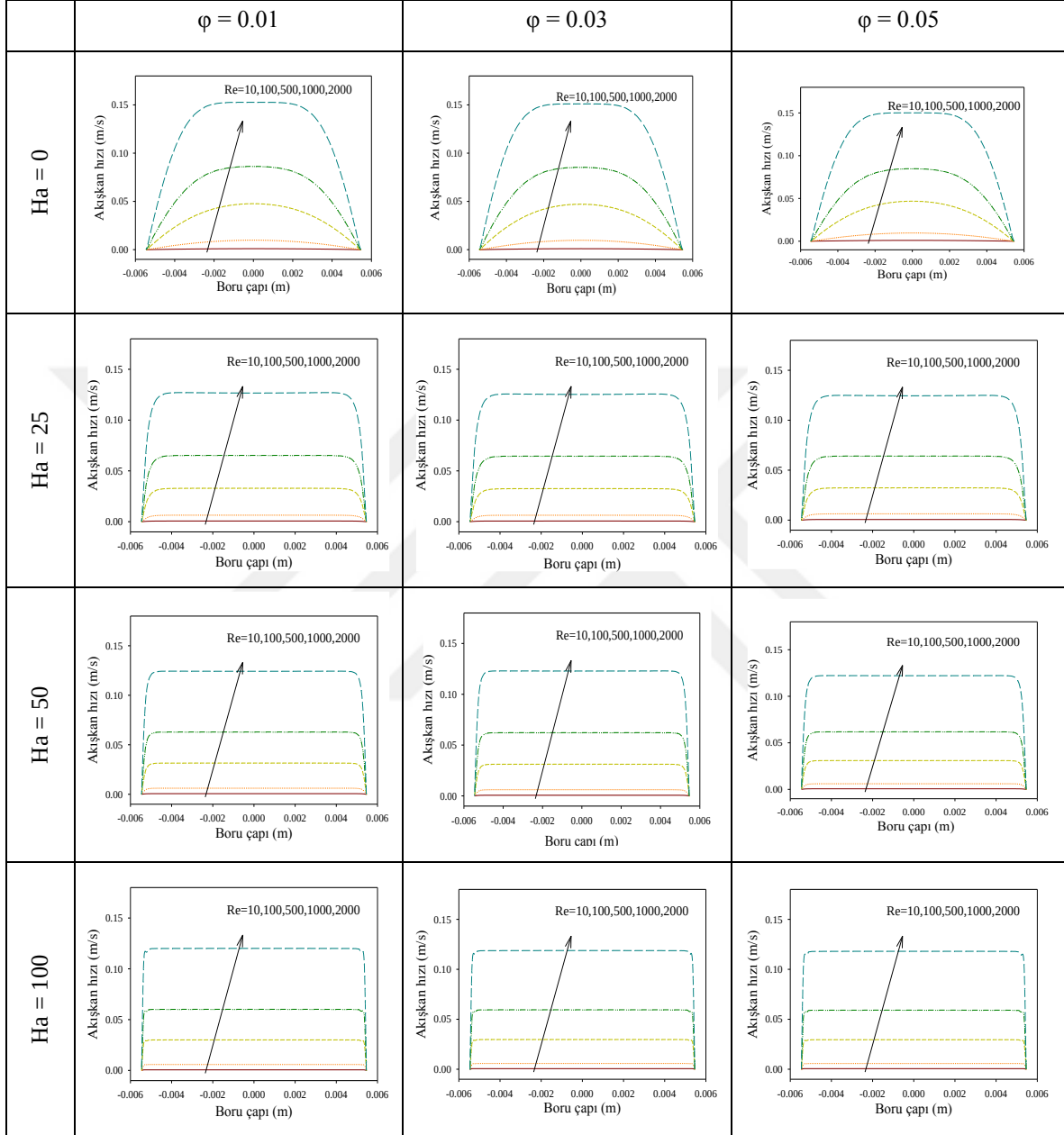
olarak arttığı belirlenmiştir. Şekil 3.15 – 3.17 için satırlar incelendiğinde satır Ha değerlerinin artmasıyla hızların azaldığı Şekil ölçeklerinden açıkça görülmektedir.



Şekil 3.16. Çeşitli hacimsel oran ve manyetik alan kuvvetlerinde CuO-su nano akışkanının çap ile Re değişimleri

Al_2O_3 -su nano akışkanı için manyetik alanın olmadığı ($Ha = 0$) durumda hız değerleri, $Re = 2000$ için yaklaşık 0.15 m/s, $Re = 1000$ için yaklaşık 0.09 m/s, $Re = 500$ için yaklaşık 0.05 m/s ve $Re = 100$ için yaklaşık 0.01 m/s değerini almıştır. Aynı şekilde CuO ve TiO_2 için Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 incelendiğinde sabit Ha ve Re sayılarında bu değerlerin Al_2O_3 – su nano akışkanına benzer eğilimler gösterdiği, ancak daha düşük

değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle CuO- su nano akışkanının nano akış hacim oranlarının artması ile ters orantılı olarak hızlarda düşme olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 3.17. Çeşitli hacimsel oran ve manyetik alan kuvvetlerinde TiO₂-su nano akışkanının çap ile Re değişimleri

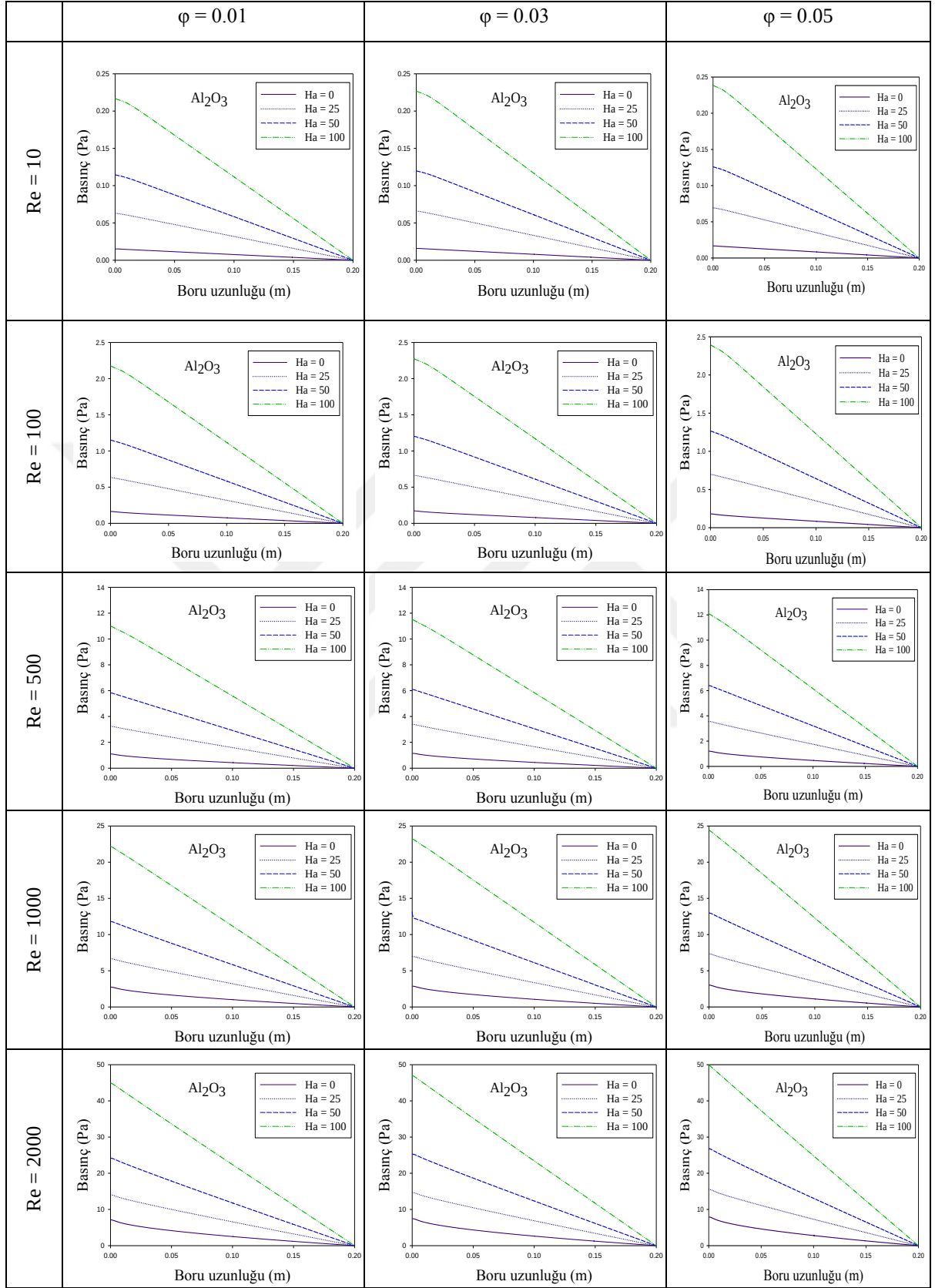
3.4. Al₂O₃, CuO ve TiO₂ – Su Nano Akışkanlarının Merkez Basınç değişimleri

Boru uzunluğu boyunca (0 - 200mm) meydana gelen basınç farkları analiz edilmiştir. Hem nano parçacık katkısının hem de özellikle manyetik alanın basınç üzerinde arttırıcı bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır.

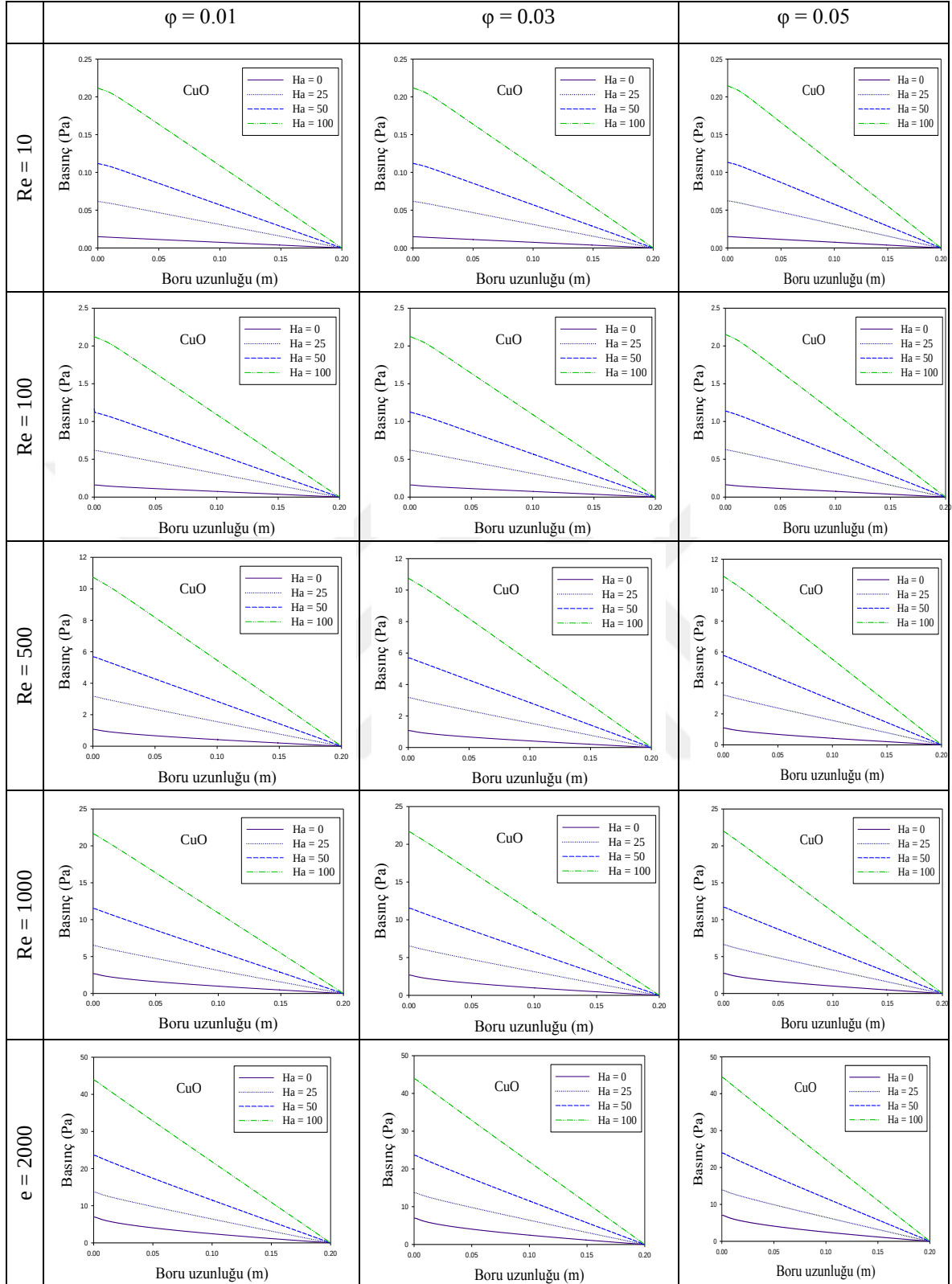
Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20, sırasıyla içinde Al₂O₃, CuO ve TiO₂ – su nano akışkanı bulunan kanalın merkezinde meydana gelen basınç düşümünü temsil etmektedir. Buradak, her bir grafik (Şekil 3.18 - 3.20 için) sabit Re sayısı ve nano hacimsel oranlarında farklı Ha sayılarının karşılaştırmalarını sunmaktadır.

Şekillerdeki (Şekil 3.18 – 3.20) her bir satırda yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla Re = 10, 100, 500, 1000 ve 2000, her bir sütunda ise soldan sağa doğru sırasıyla $\phi = 0.01$, 0.03 ve 0.05 nano akışkan hacimsel oranları verilmiştir. Her üç şekildeki (Şekil 3.15 – 3.17) tüm grafiklerde, manyetik alan kuvvetinin uygulanması dairesel kanalın merkezi boyunca basınçlarda ciddi bir artışa neden olduğu net şekilde görülmektedir.

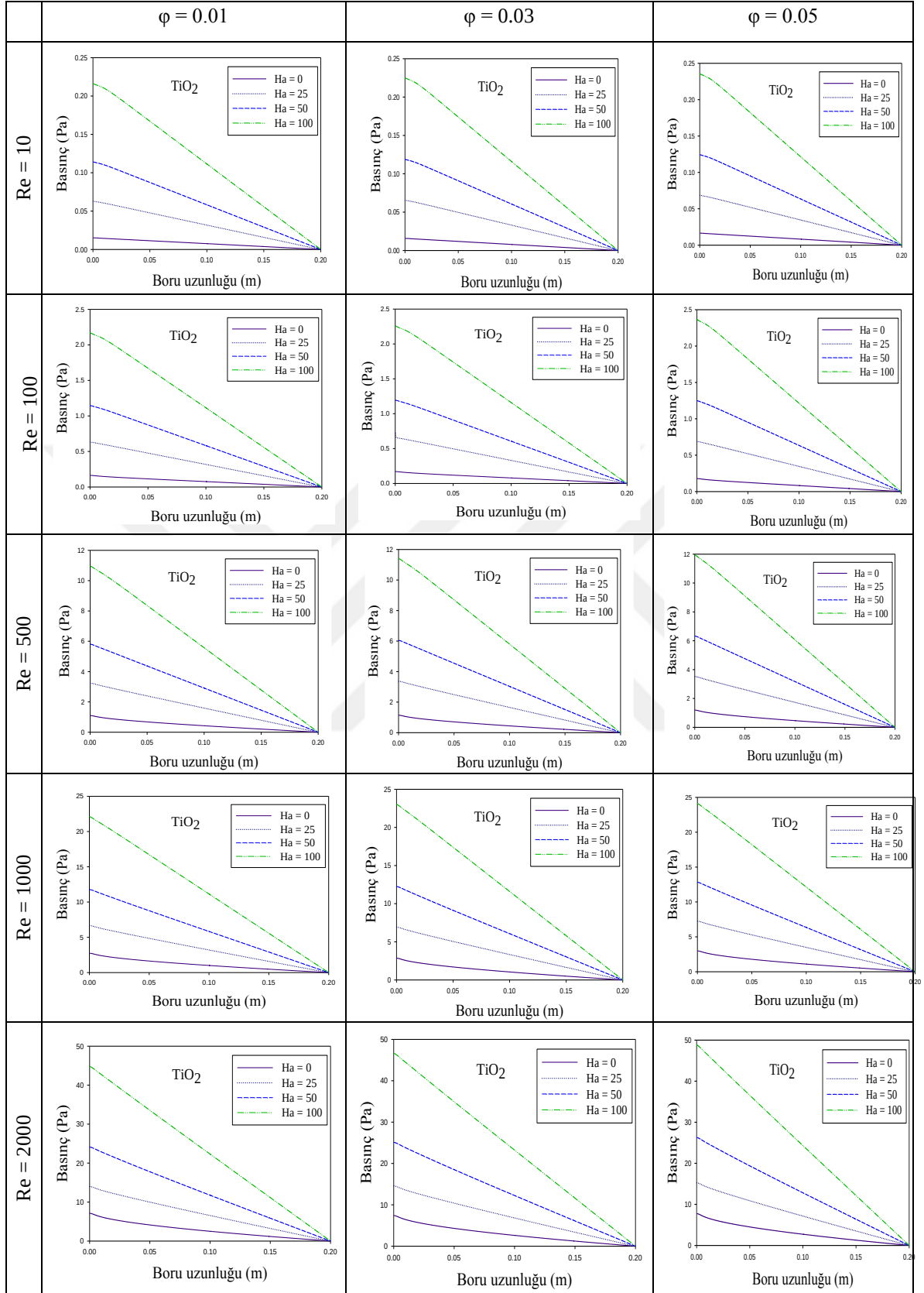
Şekiller (Şekil 3.18 – 3.20) incelendiğinde hem yukarıdan aşağıya Re sayısının fazlalaşması nedeniyle hem de soldan sağa doğru nano parçacık oranının artmasından dolayı basınç değişimlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Ancak Re sayısındaki artış nedeniyle meydana gelen basınç farkının çok daha büyük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, meydana gelen basınç farklarında, nano parçacık tiplerinin birbirinden farklı değerler aldığı görülmektedir.



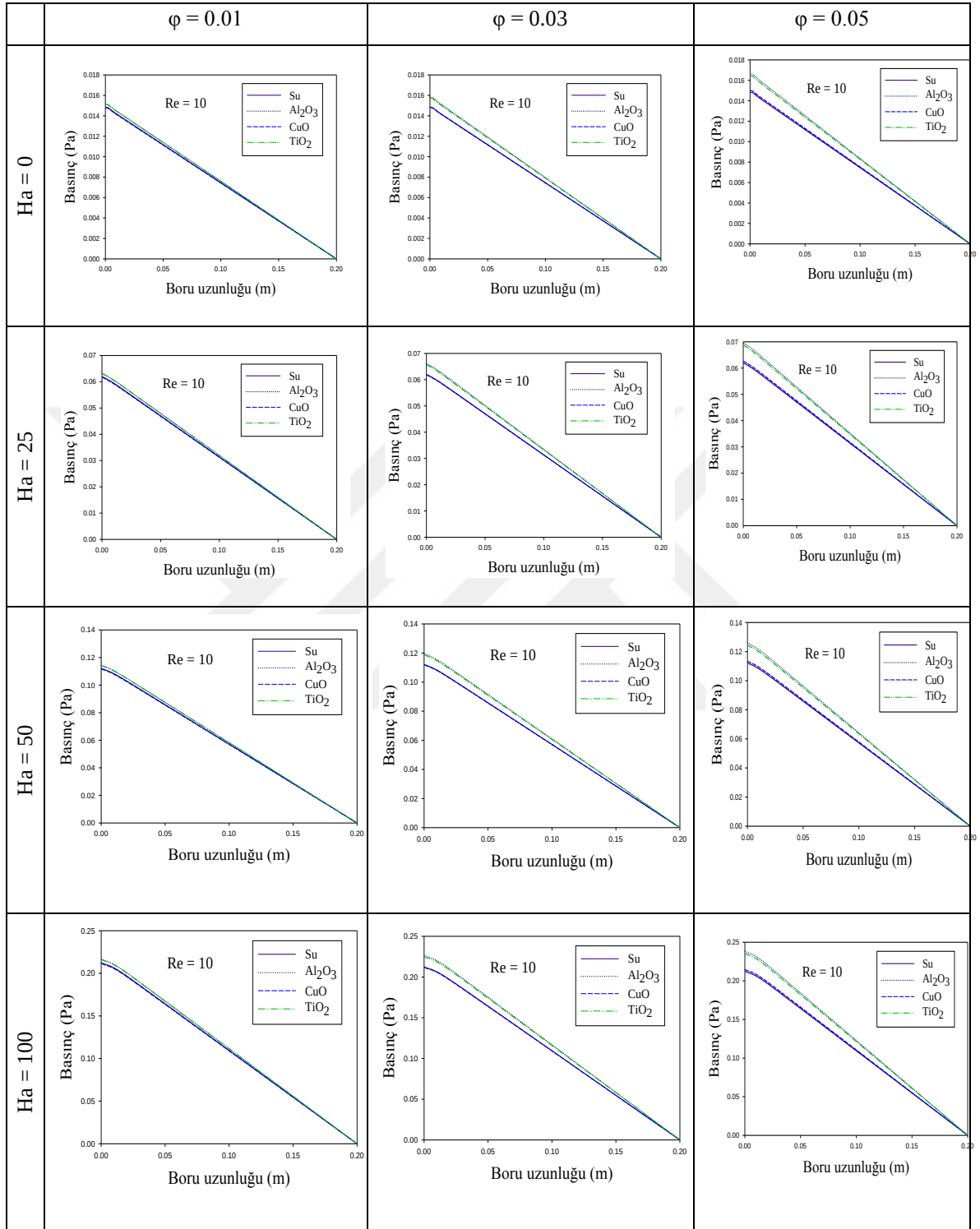
Şekil 3.18. Çeşitli Re ve nano hacimsel oranlarında Al_2O_3 – su nano akışkanının merkez basınç değerlerinin Ha sayısı ile değişimi



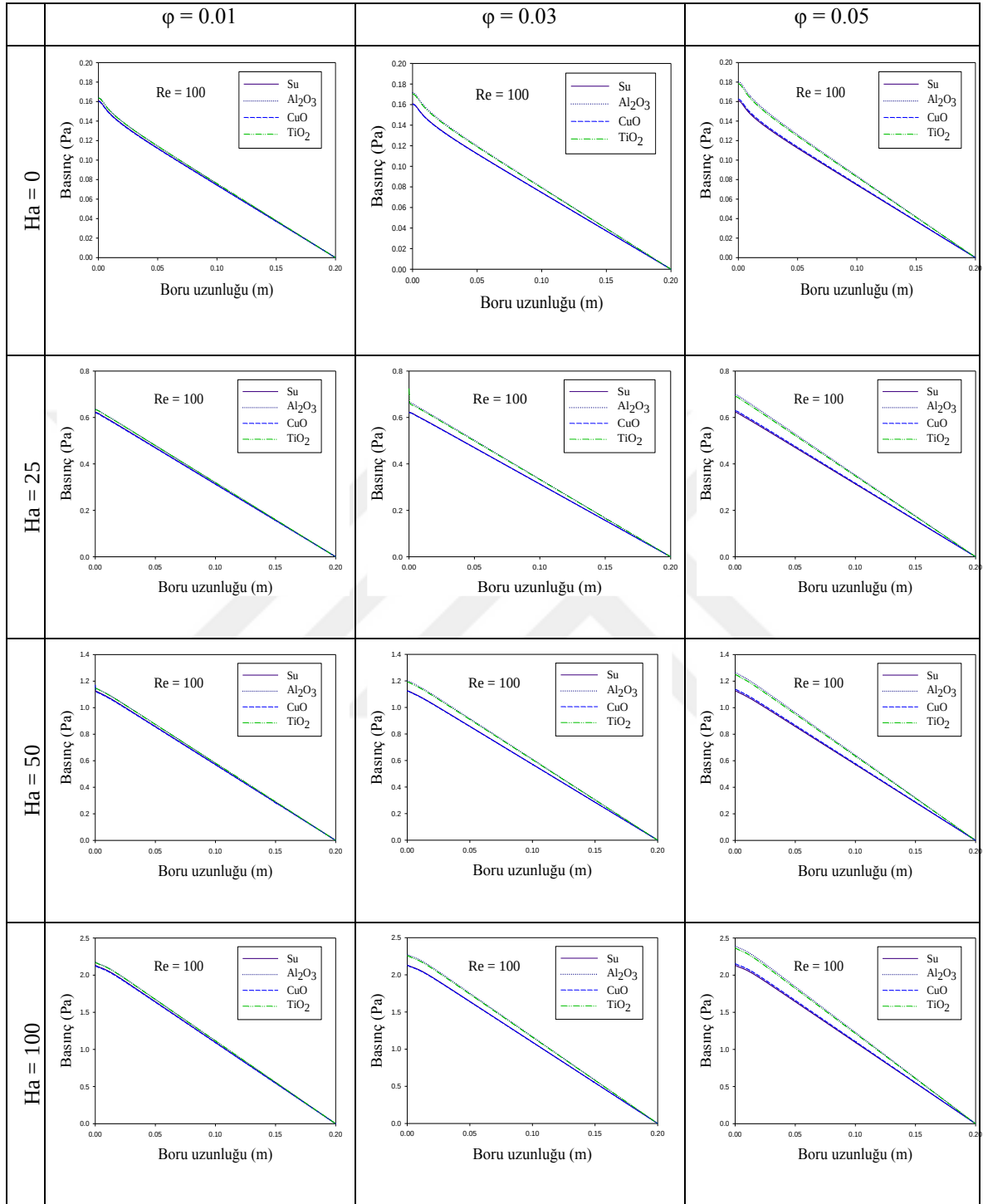
Şekil 3.19. Çeşitli Re ve nano hacimsel oranlarında CuO – su nano akışkanının merkez basınç değerlerinin Ha sayısı ile değişimi



Şekil 3.20. Çeşitli Re ve nano hacimsel oranlarında TiO_2 – su nano akışkanının merkez basınç değerlerinin Ha sayısı ile değişimi



Şekil 3.21. Sabit Re sayısında ($Re = 10$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri

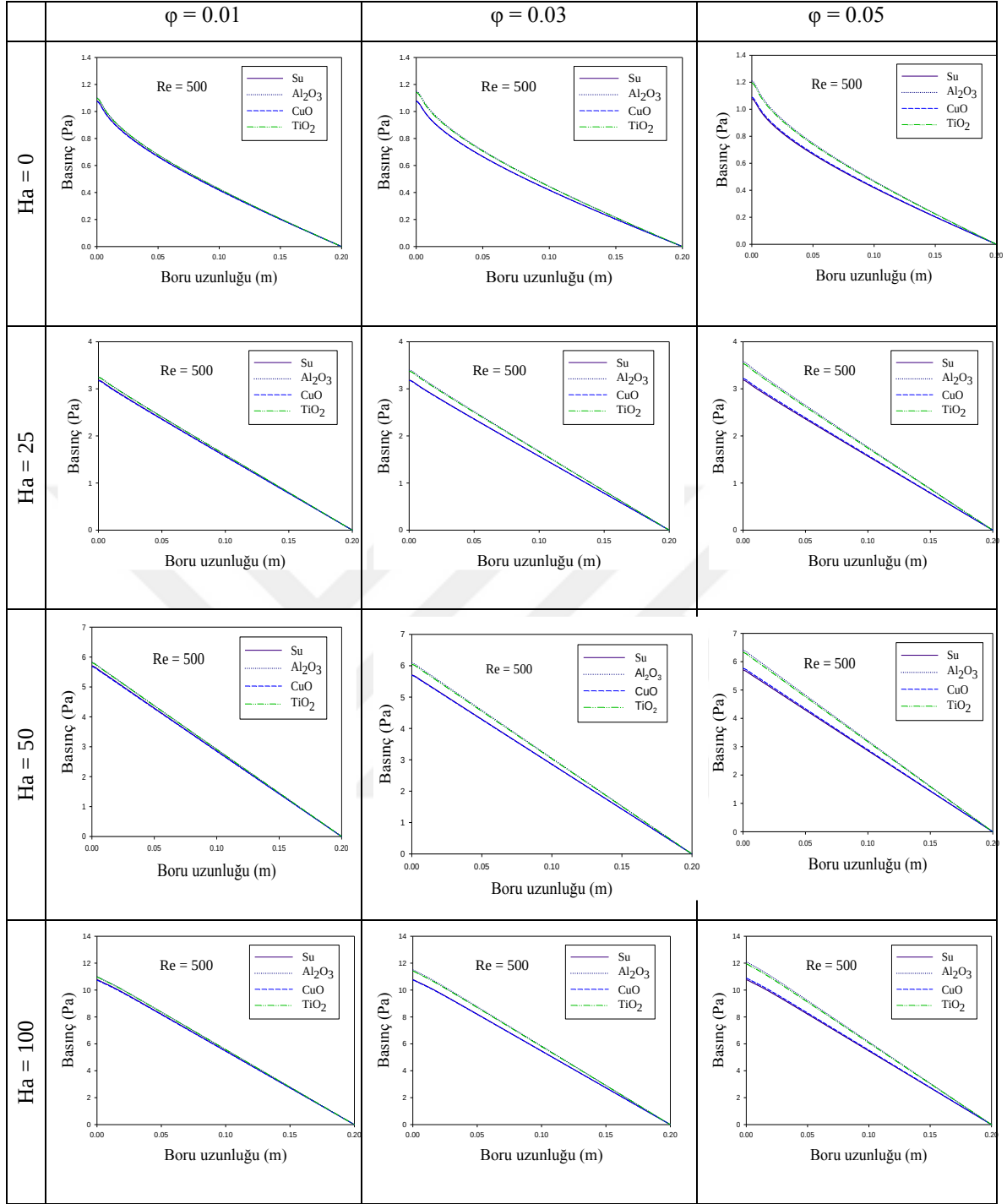


Şekil 3.22. Sabit Re sayısında ($Re = 100$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri

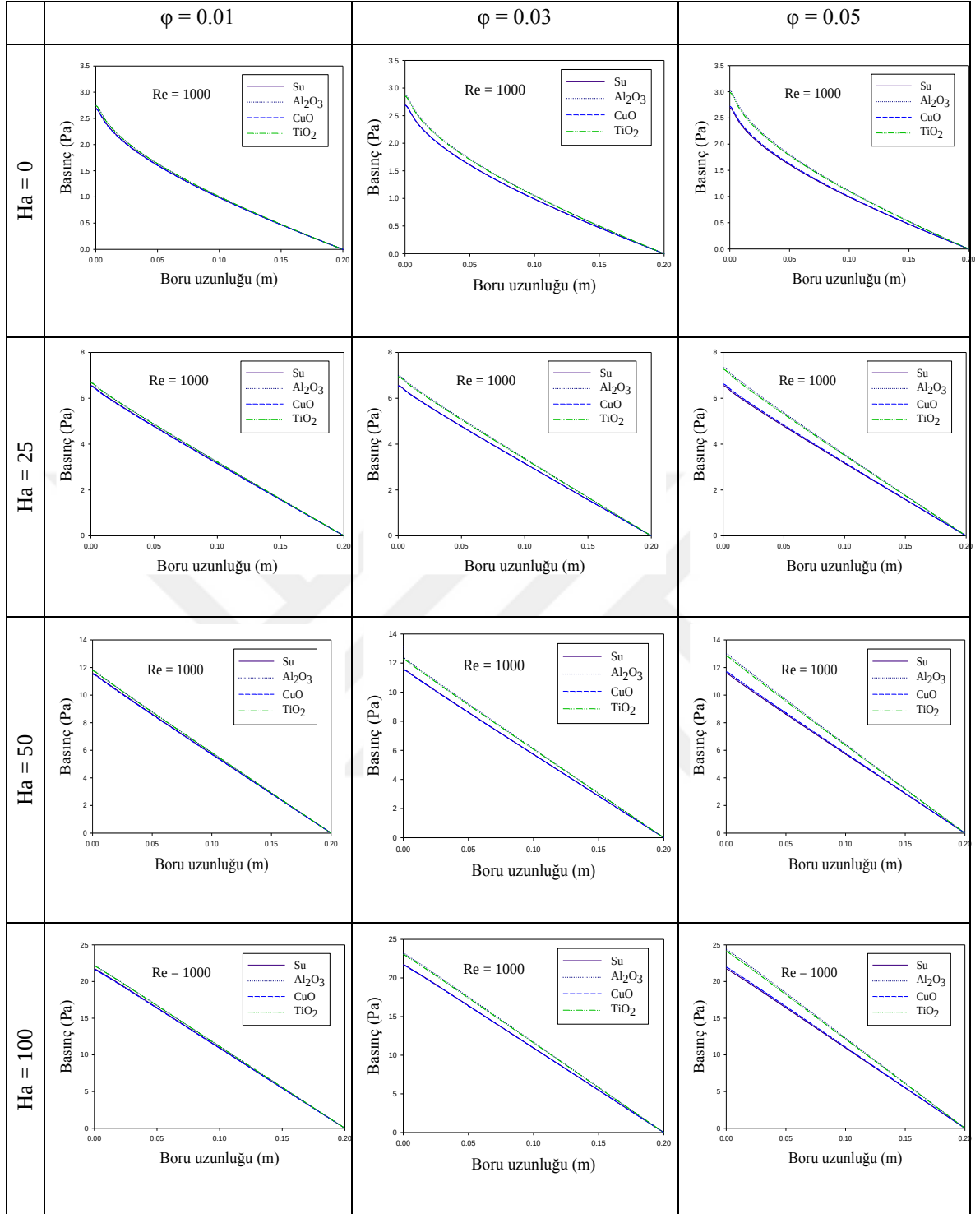
Farklı nano akışkan tiplerinin birbirine göre kanal merkezi boyuna basınç değişimleri $Re = 10$ için Şekil 3.21’de, $Re = 100$ için Şekil 3.22’de, $Re = 500$ için Şekil 3.23’te, $Re = 1000$ için Şekil 3.24’de ve $Re = 2000$ için Şekil 3.25’de verilmiştir. Bütün grafiklerde (Şekil 3.21 – 3.25) nano hacimsel oranın %1 ($\phi = 0.01$) olduğu durumda basınç değerlerinin birbirinden farkı yok denecek kadar azdır. Özellikle Al_2O_3 ve TiO_2 ile su ve CuO nano akışkanlarının basınç eğrileri neredeyse birbirine eşittir, ancak Al_2O_3 ve TiO_2 – su nano akışkanının basınç değerleri daha büyük çıkmıştır. Ayrıca Şekiller incelendiğinde nano parçacık oranının artmasıyla birlikte basıncın arttığı da görülmektedir. Birinci Şekilde (Şekil 3.21) manyetik alan kuvvetinin olmadığı durumda basınç eğrilerinin genel olarak düz bir çizgi çizdiği görülmektedir.

Diğer üç satırda gösterilen grafiklerde ise (Şekil 3.21) manyetik alan kuvvetinin artması ile birlikte kanalın hemen girişinde eğrilerin önce düze yakın çizgiler çizdiği ve sonrasın düzleştiği görülmektedir. Şekil 3.22’de manyetik alan uygulanmadığı zaman eğrilerin önce aşağı yönde düştüğü ve daha sonra düzleştiği anlaşılmaktadır. Diğer üç Re sayısındaki grafikler (Şekil 3.23 – 3.25) incelendiğinde ise manyetik alan şiddetinin olmadığı ($Ha = 0$) durumda eğrilerin genel olarak parabolik olarak düştüğü ve Re ile Ha sayısının artması ile hemen hemen tamamen düzleştiği açıkça görülmektedir.

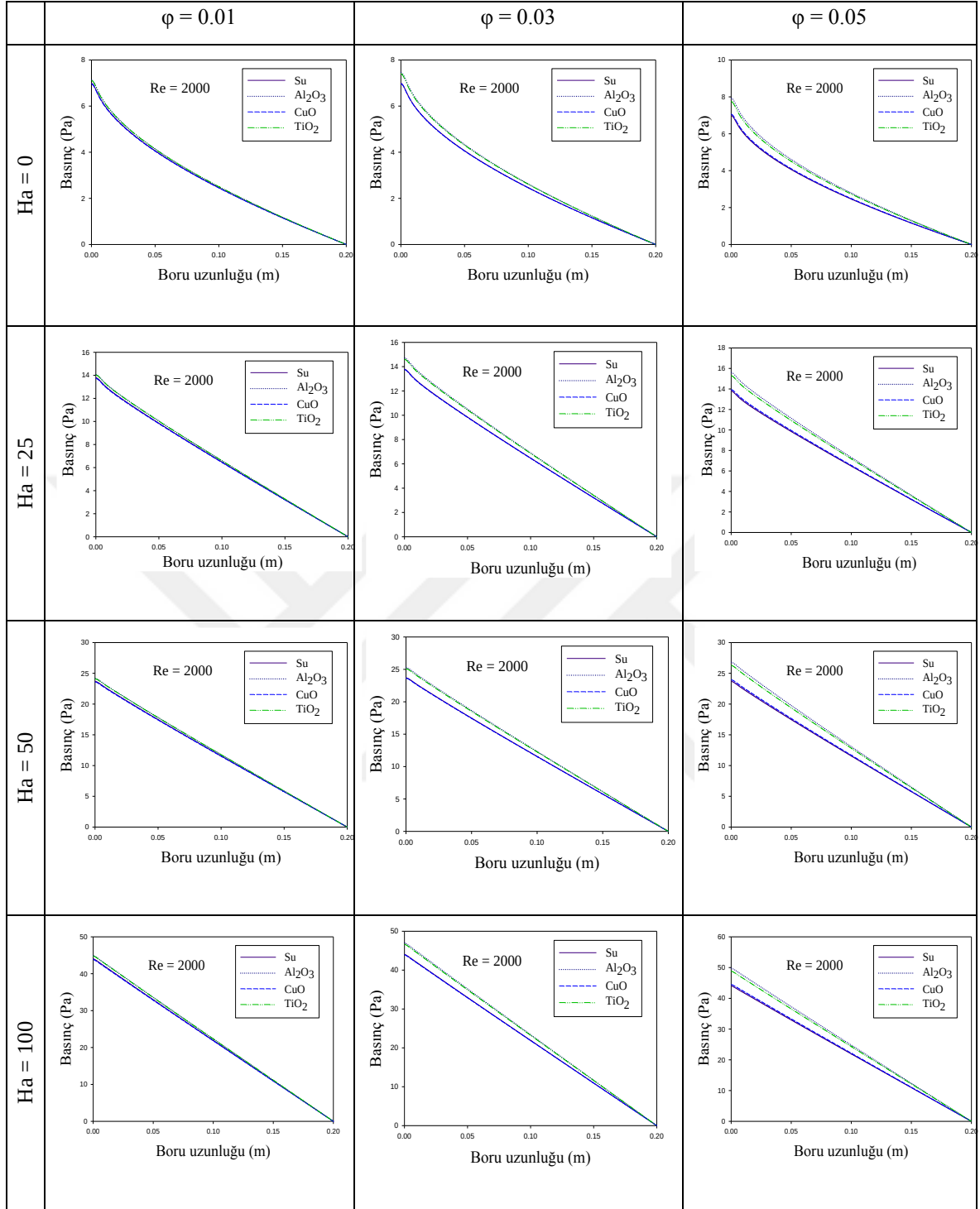
Şekillerde (Şekil 3.21 – 3.25) su ve CuO – su nano akışkanının en altta ve suyun daha düşük olduğu, ayrıca birbirine yakın olan su - CuO ile Al_2O_3 - TiO_2 nano akışkanları arasındaki basınç eğrileri nano hacimsel oranının artması ile daha belirgin hale gelmiştir. Ölçeklerin tümü incelendiğinde, Şekil 3.21’deki duruma benzer olarak, manyetik alan kuvvetinin artması sonucu basınç değerlerinde büyük bir artışın meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 3.23. Sabit Re sayısında ($Re = 500$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri

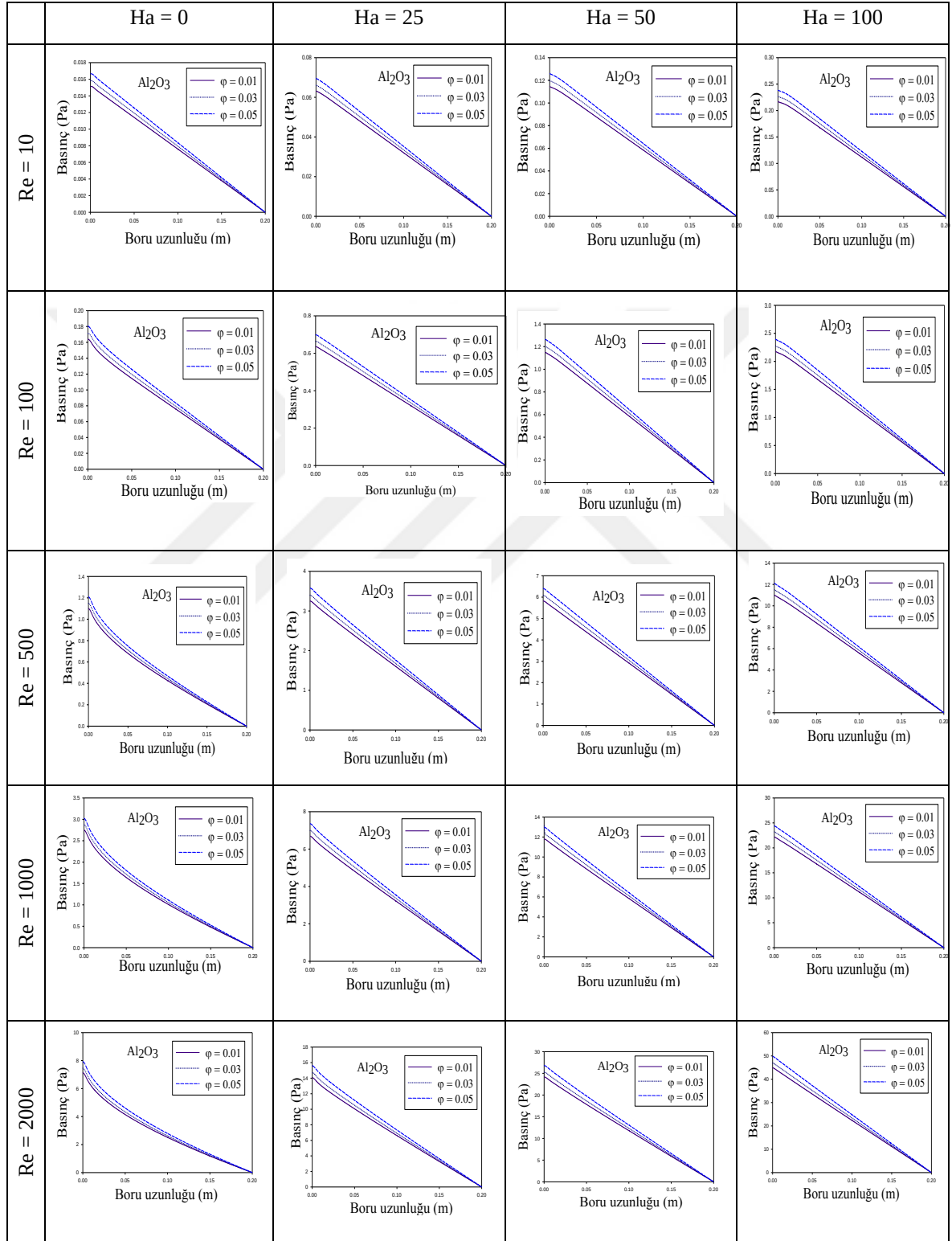


Şekil 3.24. Sabit Re sayısında ($Re = 1000$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri



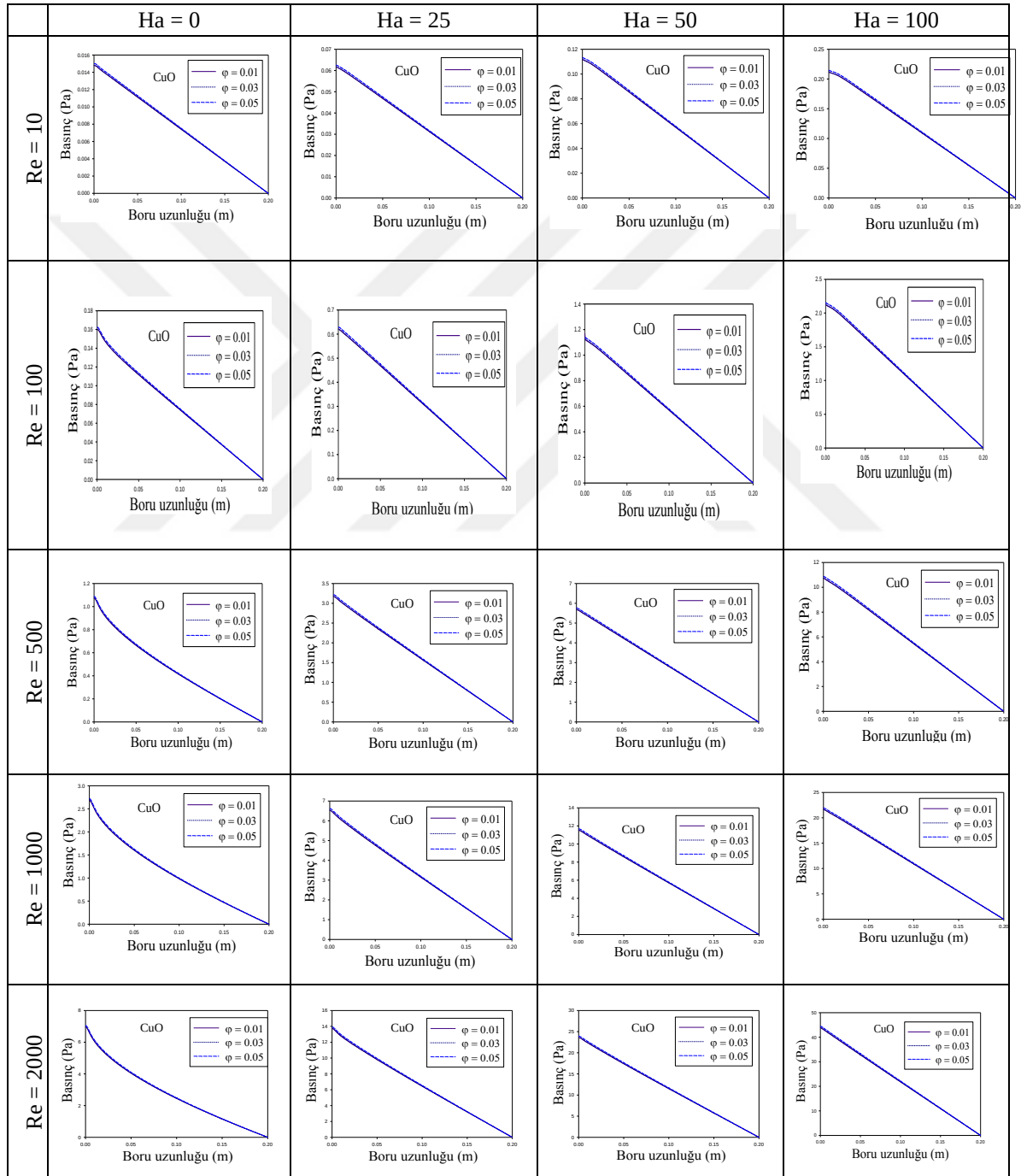
Şekil 3.25. Sabit Re sayısında ($Re = 2000$) farklı Ha ve nano hacimsel oranlarında nano akışkan tiplerinin birbirine göre basınç değişimleri

Farklı Re sayıları ve manyetik alan kuvvetinde sırasıyla Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 – su nano akışkanının çeşitli nano hacimsel oranlarında, basınç değişimleri sırasıyla Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de tasvir edilmiştir.



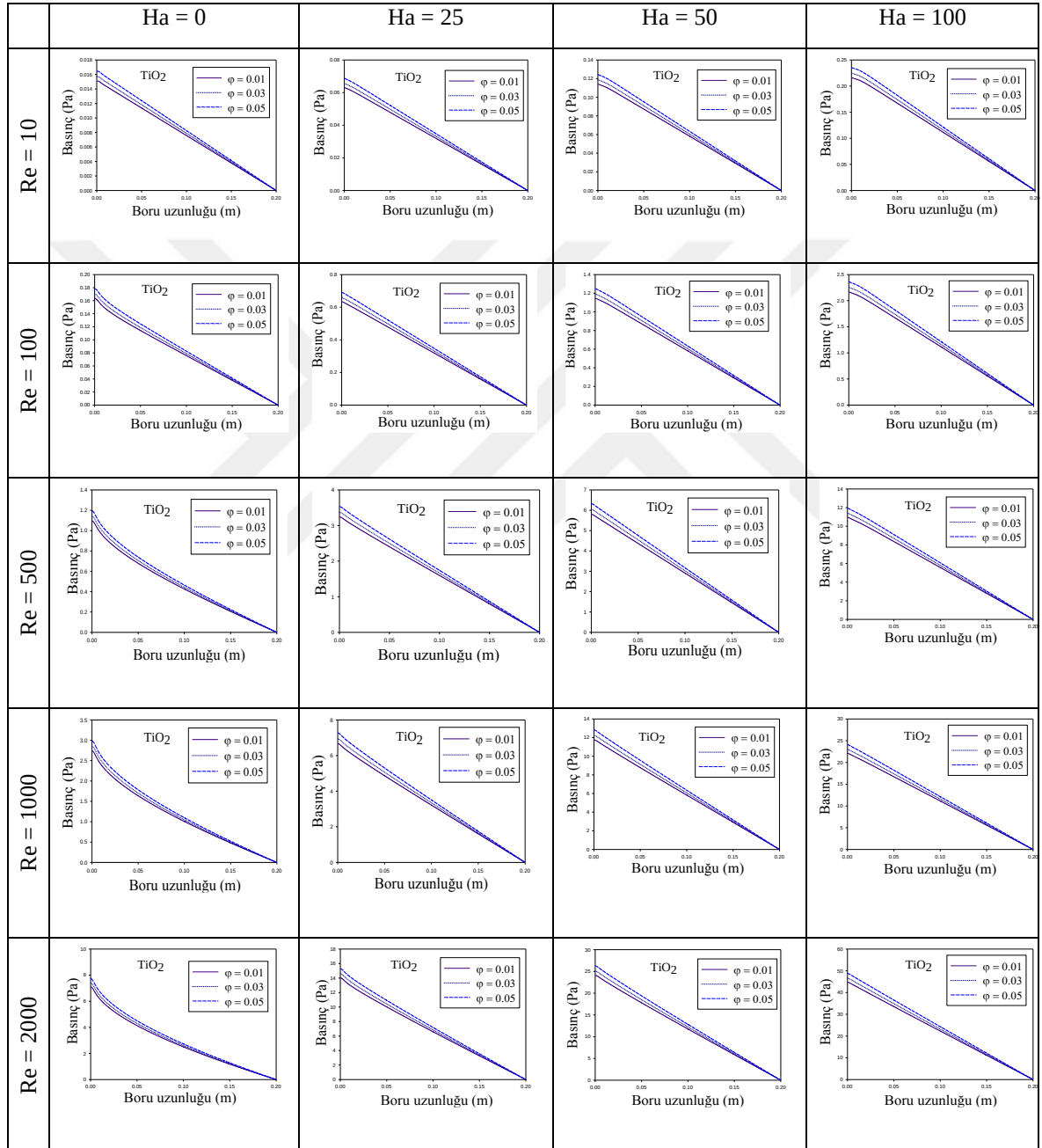
Şekil 3.26. Farklı Re sayıları ve manyetik alan kuvvetinde Al_2O_3 - su nano akışkanının hacimsel oranların karşılaştırılması

Şekil sütunları (Şekil 3.26 – 3.28), Ha sayılarını gösterirken satırlar Re sayılarını temsil etmektedir. Re sayılarının katlanması ve manyetik alan şiddetinin artması ile basınçlarda meydana gelen artış açıkça görülmektedir. Her üç Şekil (Şekil 3.26 – 3.28) incelendiğinde nano parçacığın eklenmesi sonucu basınçlarda artışın olduğu ve akışkan tipine göre birbirinden farklı değerler aldığı görülmüştür.



Şekil 3.27. Farklı Re sayıları ve manyetik alan kuvvetinde CuO - su nano akışkanının hacimsel oranların karşılaştırılması

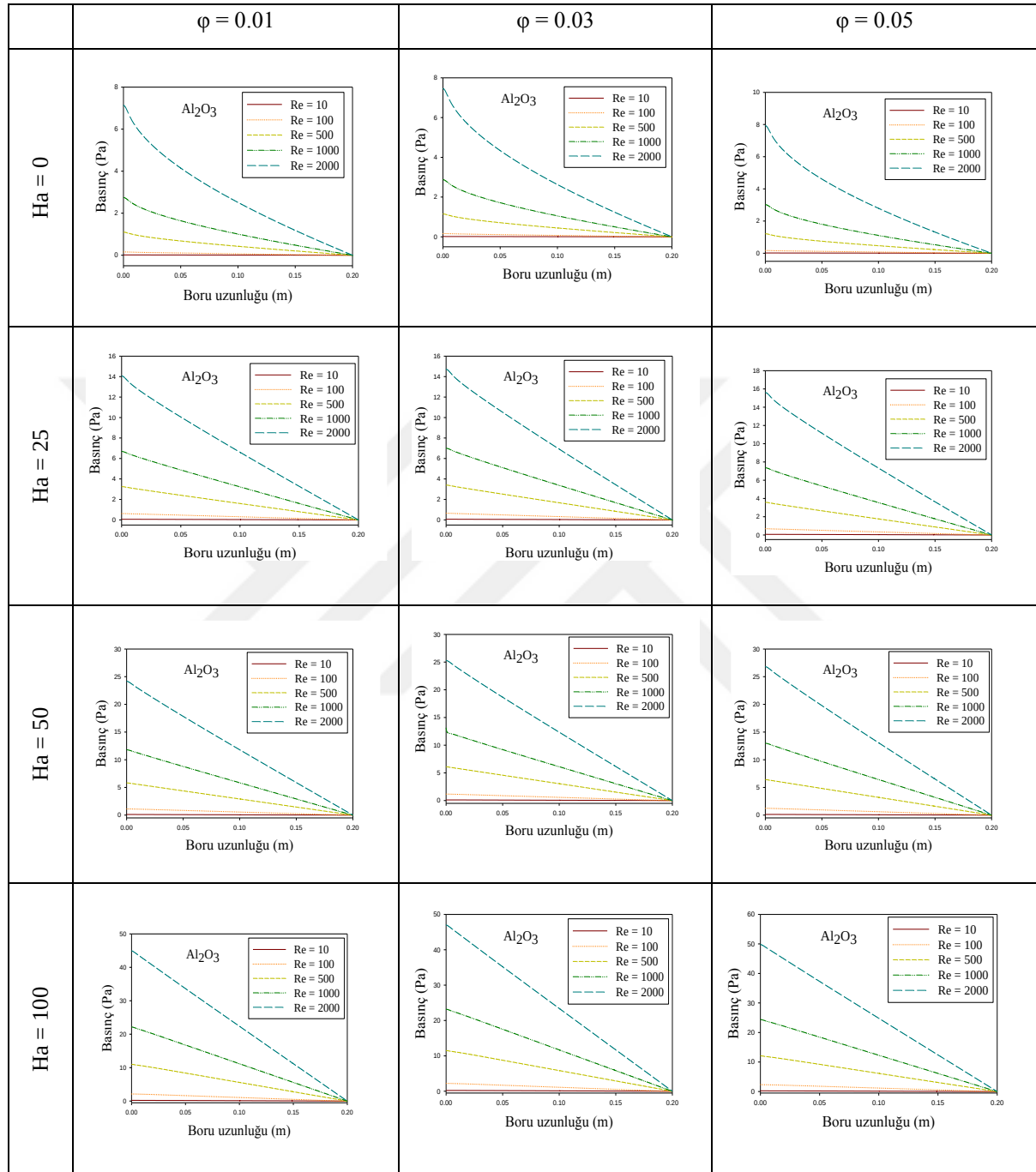
Al_2O_3 ve TiO_2 – su nano akışkan tipinde parçacığın eklenmesi ile meydana gelen basınç değişimi daha fazla iken, CuO – su nano akışkan tipinde nano parçacığın etkisiyle meydana gelen basınç artışının daha az olduğu tespit edilmiştir. Akışkan hızları incelenirken bunun tersi olduğu yani CuO – su nano akışkan tipinin hızlarında meydana gelen değişimin çok fazla olduğu ve en az değişen nano akışkanın Al_2O_3 – su olduğu açıklanmıştır.



Şekil 3.28. Farklı Re sayıları ve manyetik alan kuvvetinde TiO_2 - su nano akışkanının hacimsel oranların karşılaştırılması

Şekil 3.26'dan manyetik alan şiddeti uygulanmadığında Re sayısının artması ile grafikteki basınç eğrilerinin düz halden parabolik hale geldiği ve hem Ha hem de Re

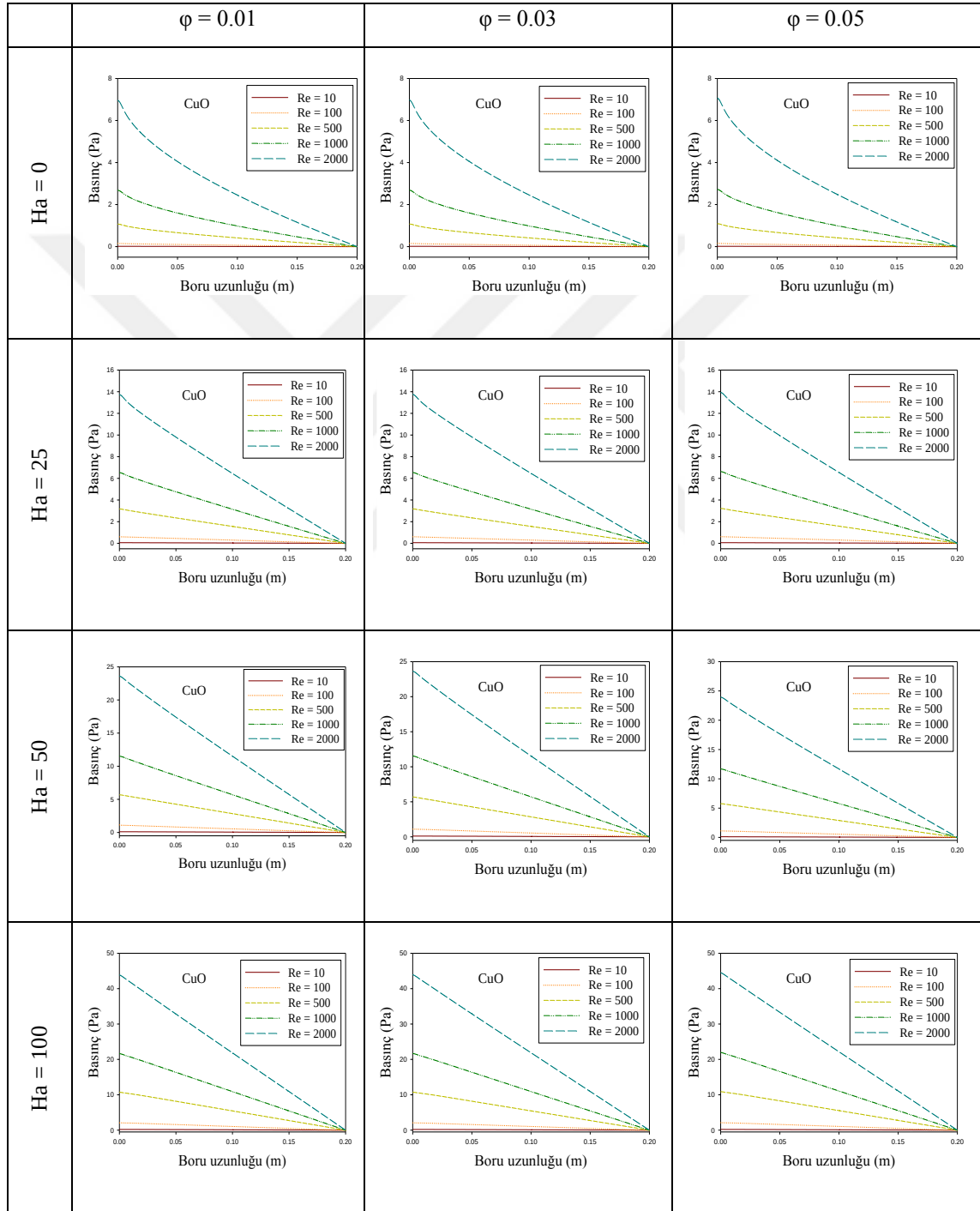
sayısının artması ile bu eğrilerin düzleştiği belirlenmiştir. Burada Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 için elde edilen sonuçların da Şekil 3.26'ya benzer olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.29. Al_2O_3 – su nano akışkanı için Re sayısının etkisi

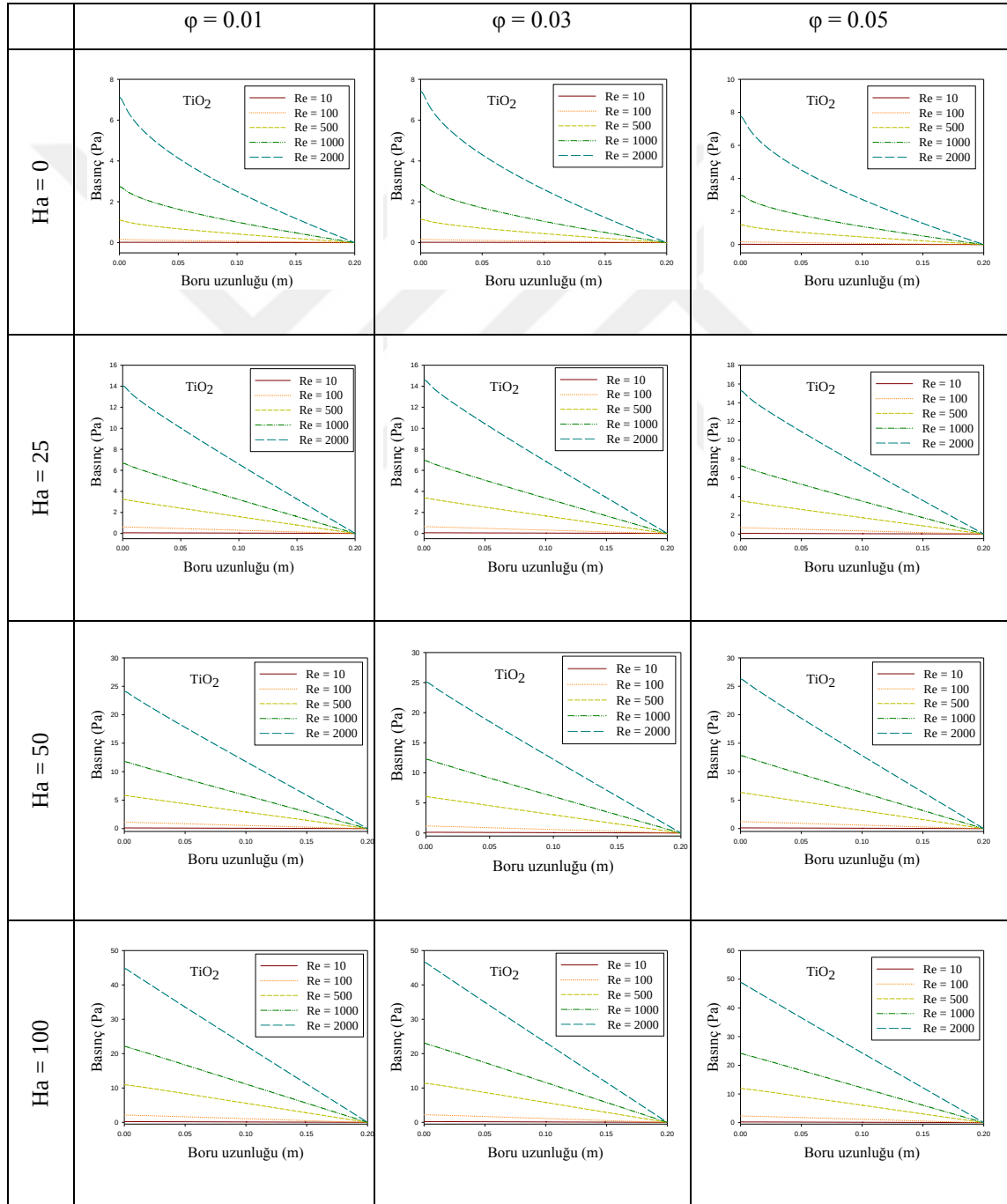
Şekil 3.29 Al_2O_3 için, Şekil 3.30 CuO için ve Şekil 3.31 TiO_2 – su nano akışkanı dört farklı manyetik alan kuvveti ve üç farklı nano hacimsel oranda Re etkisi için basınç analizini göstermektedir. Şekillerdeki (Şekil 3.29 – 3.31) her bir grafik ayrı ayrı incelendiğinde Re etkisiyle basınç eğrilerinde meydana gelen değişimin etkisi açık bir

şekilde görülmektedir. Tüm Şekillerdeki (Şekil 3.29 – 3.31) ilk satırlara bakıldığı zaman eğrilerin düz değil de daha çok parabolik olduğu burada daha iyi görülmektedir. Bu eğri aynı satırda Re sayısının artması ile daha da parabolik bir hal almıştır. Birinci Şekil 3.29’da $Ha = 0$ için en küçük değer sıfıra yakın iken en büyük değer 8’e yakın olmuştur ve bu değerler nano hacimsel oranı ve uygulanan manyetik alan ile daha da arttığı görülmektedir.



Şekil 3.30. CuO – Su nano akışkanı için Re sayısının etkisi

Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de bu eğriler Şekil 3.29’a oldukça benzerdir. Yine Şekillerden (Şekil 3.29 – 3.31) en yüksek basınç değerlerinin Al_2O_3 – su için sonra TiO_2 – su için ve en düşük değerin de CuO – su için olduğu görülmektedir. Yoğunluğu az olan nano akışkanın basıncının yüksek olduğu sonucu açıkça görülmektedir. Yani, nano akışkanların yoğunluklar arasındaki sıralama, $\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3} < \rho_{\text{TiO}_2} < \rho_{\text{CuO}}$ iken basınç değerleri arasındaki sıralama $P_{\text{Al}_2\text{O}_3} > P_{\text{TiO}_2} > P_{\text{CuO}}$ şeklinde olmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi nano akışkan hızları arasındaki ilişki bu durumun tersi olarak çıkmıştır.

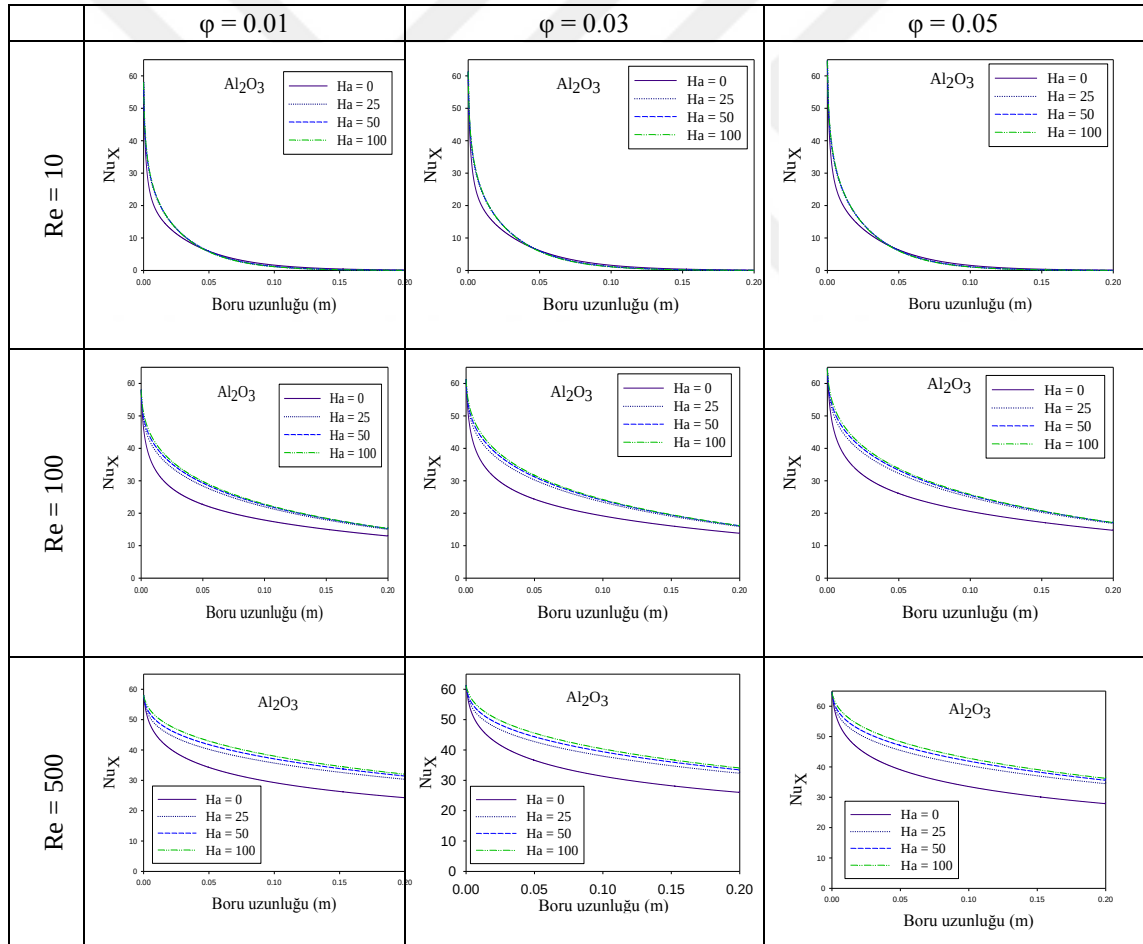


Şekil 3.31. TiO_2 – su nano akışkanı için Re sayısının etkisi

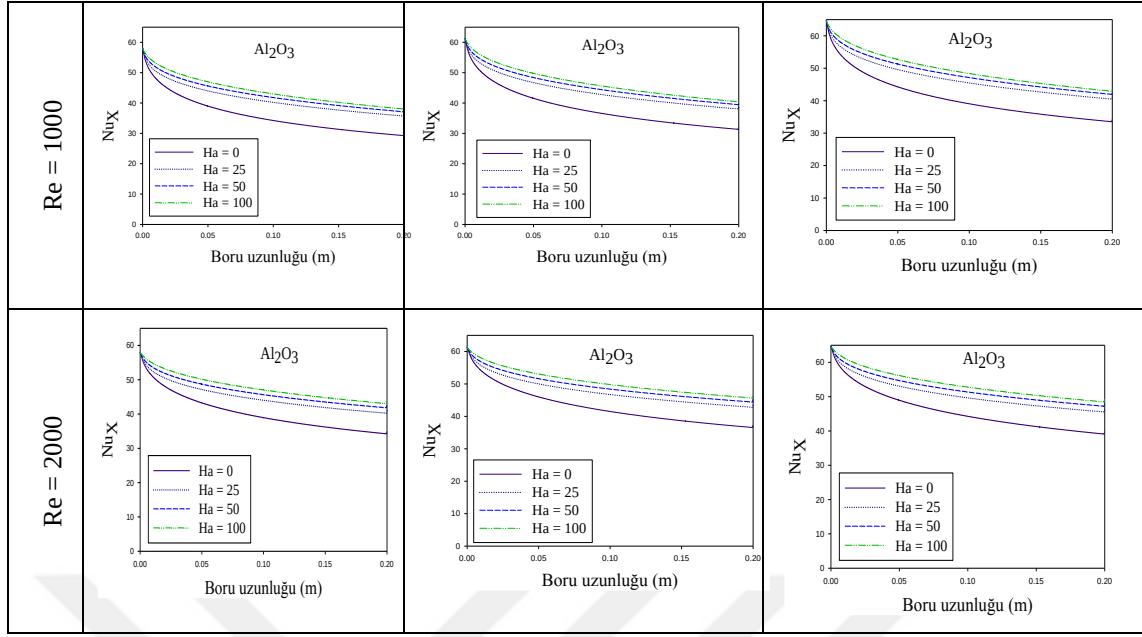
3.5. Al₂O₃, CuO ve TiO₂ – Su Nano Akışkanlarının Yerel Nusselt Sayısı (Nux) Değişimleri

Sıcak akışkanla duvar arasındaki sıcaklıktan hesaplanan yerel Nu değerlerinin boru uzunluğu boyunca değişimleri çalışmanın bu kısmında irdelenmiştir. Detaylı olarak incelenen çalışmadan Re sayısı, Ha sayısı ve nano hacim oranının Nu değerlerini önemli oranda artırdığı anlaşılmıştır. Akışkan sıcaklığı 50⁰C iken duvar sıcaklığı 30⁰C olarak sabit tutulmuştur. Sonuçlar grafik olarak aşağıda verilmiştir.

Al₂O₃, CuO ve TiO₂ – su nano akışkanına ait yerel Nu sayılarının boru uzunluğu boyunca manyetik alan kuvvetiyle değişimleri sırasıyla Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34’de verilmiştir.

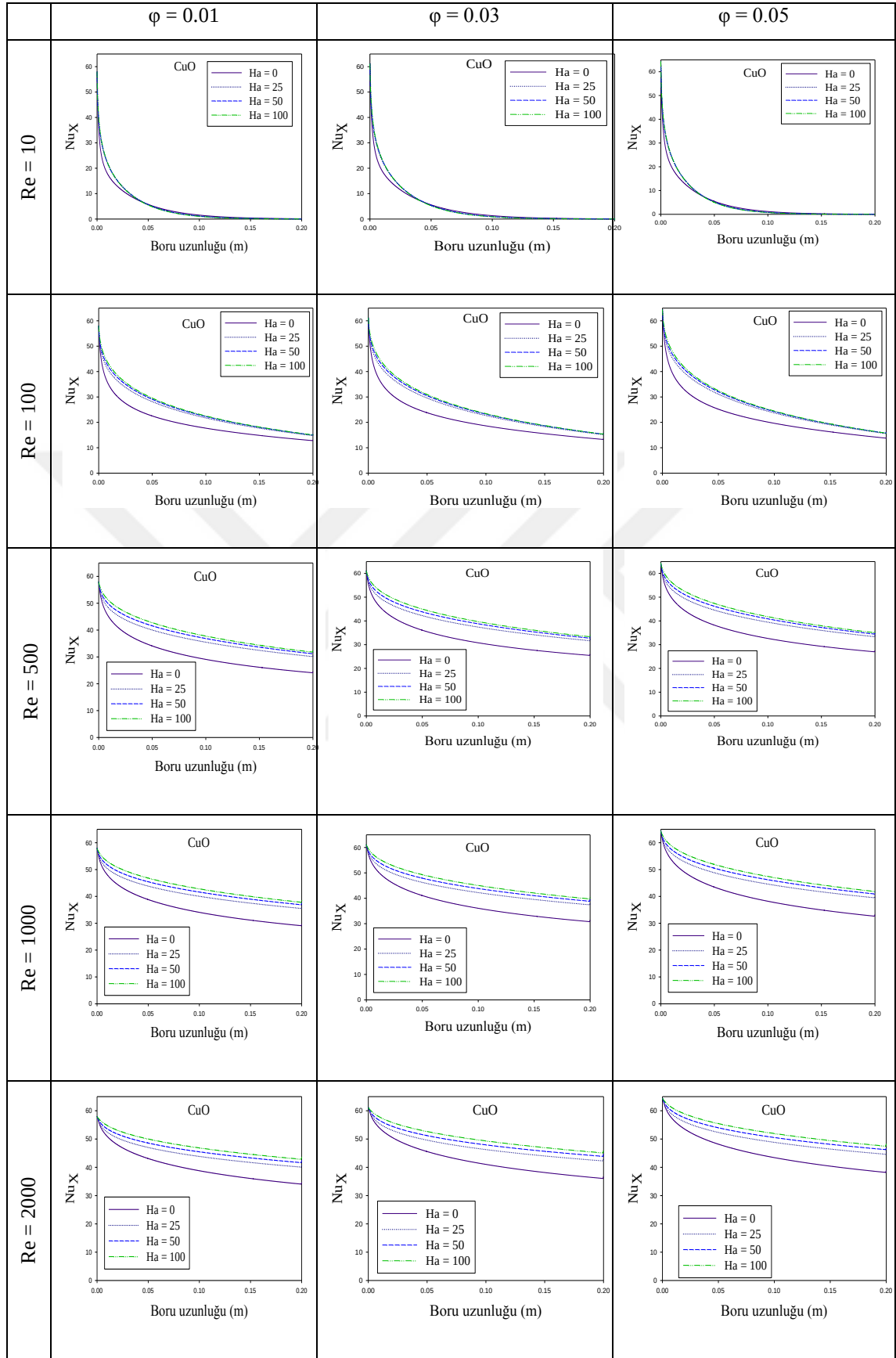


Şekil 3.32. Al₂O₃ – su nano akışkanının boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayısının Ha sayısı ile değişimi

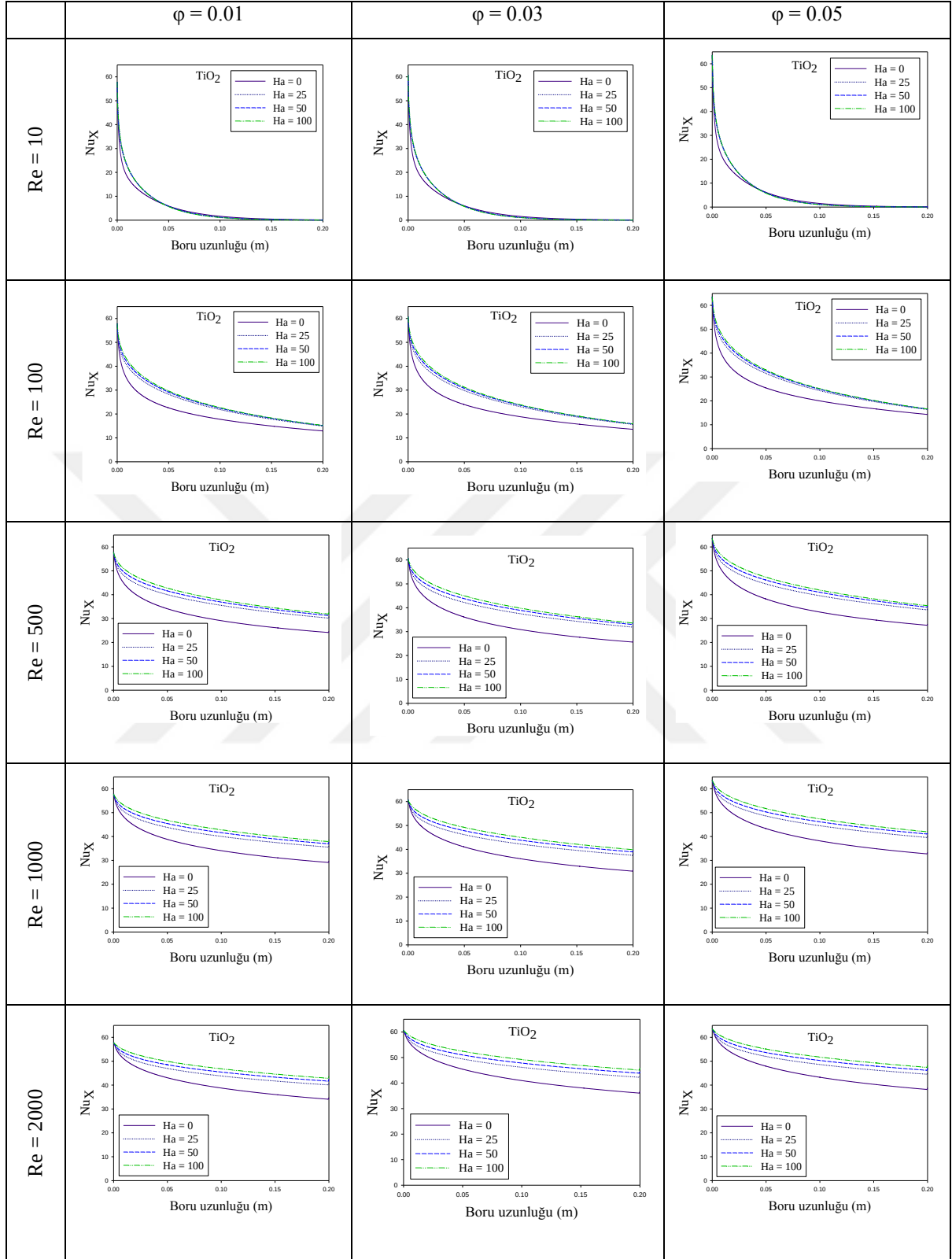


Şekil 3.32. Al_2O_3 – su nano akışkanının boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayısının Ha sayısı ile değişimi (Devamı)

En düşük Re sayısına sahip her üç akışkan tipinde kanalın yaklaşık 0.04 m mesafesine kadar yerel Nu sayısının, manyetik alan kuvvetinin etkisi ile önce arttığı ve bu noktadan sonra bu değerlerin azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen en ilginç sonuçlardan bir tanesidir. Bu durumun nedeni, akışkan hızının oldukça düşük olması ve manyetik alan kuvveti ile akışkan hızının daha fazla düşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Başka bir değişle taşınım olayının belirli bir noktadan sonra çok az gerçekleşmesi olarak da açıklanabilir.



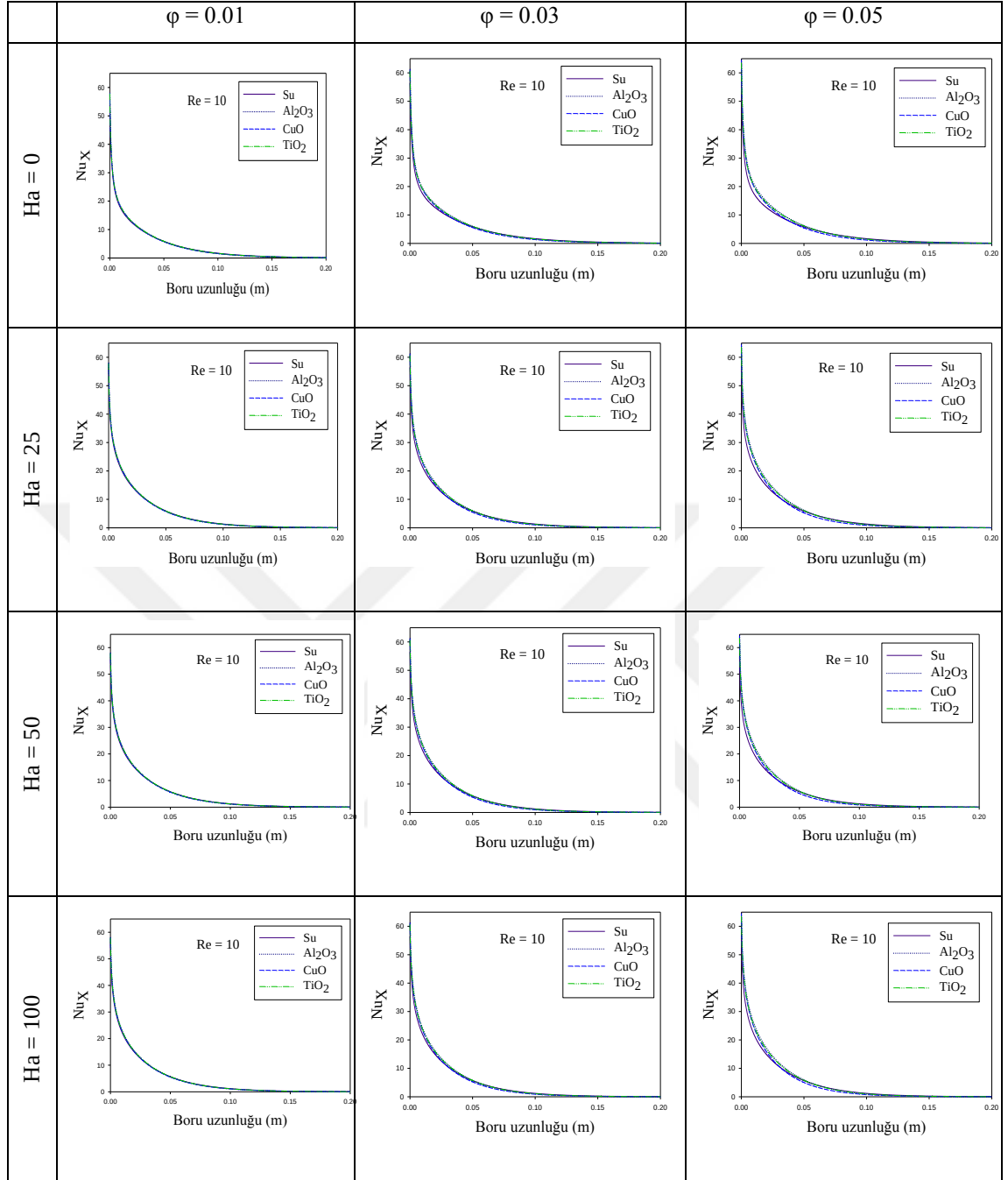
Şekil 3.33. CuO – su nano akışkanının boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayısının Ha sayısı ile değişimi



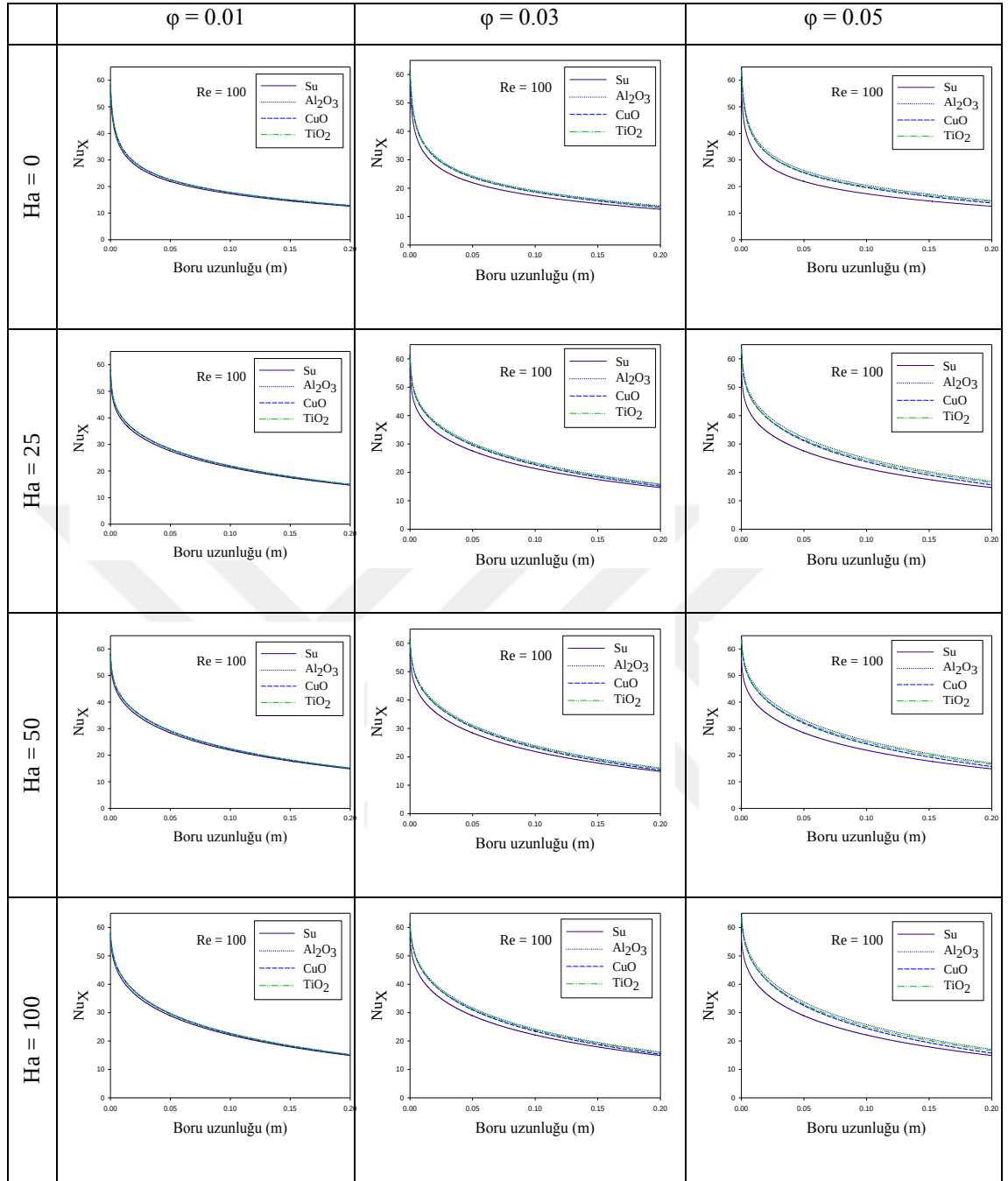
Şekil 3.34. TiO_2 – su nano akışkanının boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayısının Ha sayısı ile değişimi

Ayrıca $Re = 10$ parametresinde manyetik alanın ısı transferini arttırdığı ancak manyetik alan kuvvetlerinin birbirlerine göre neredeyse hiç değişmediği tespit edilmiştir. $Re = 100$ 'de tüm akışkan tiplerinde (Al_2O_3 , CuO ve TiO_2) manyetik alan şiddetinin yerel Nu sayısını arttırdığı ve kanalın sonuna doğru birbirine aşağı yukarı eşitlendiği görülmektedir. Diğer üç büyük Re (500, 1000, 2000) sayısında ise Ha sayısının artmasıyla birlikte yerel Nu sayılarında artış olduğu daha net olarak anlaşılmış ve kanalın girişinden çıkışına kadar bu artış sürmüştür. Re sayısının artmasıyla orantılı olarak meydana gelen değişim daha fazla olmuştur. Kanalın tam girişindeki yerel Nu sayılarının değerleri nano parçacığın eklenmesinin de ısı transferini arttırdığını kanıtlamaktadır. Nano parçacık etkisiyle meydana gelen ısı transferi değişimleri, sonraki yerel Nu sonuçlarında daha ayrıntılı açıklanacaktır.

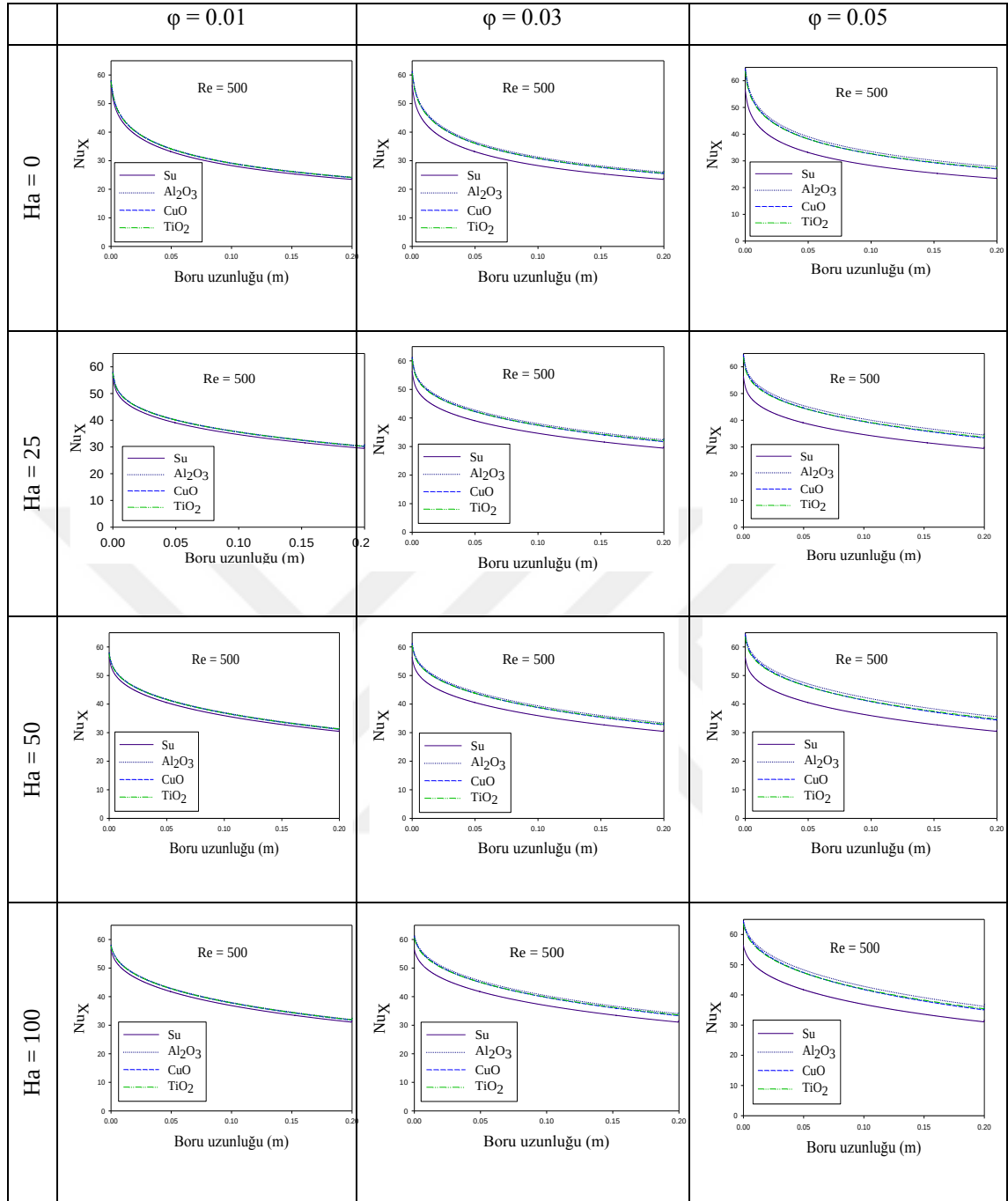
Çeşitli Re sayılarında ($Re = 10, 100, 500, 1000, 2000$) değişik nano parçacık tiplerinin eklenmesi ile elde edilen nano akışkanların boru uzunluğu boyunca sahip oldukları yerel Nu değerleri sırasıyla bu Re sayıları için Şekil 3.35 – 3.39'da açıklanmıştır. Şekillerde (Şekil 3.35 – 3.39) görüldüğü gibi, düşük yoğunluğa sahip nano akışkanın yerel Nu değerlerinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Nano parçacıkların yoğunlukları $Al_2O_3 < TiO_2 < CuO$ şeklinde sıralanmaktadır. En düşük Re sayısına sahip akışkanlarda $\phi = 0.01$ nano hacimsel oranına sahip akışkanda akışkan tipleri ile saf akışkan arasındaki farkın yok denecek kadar az olduğu ve Re sayısının artmasıyla orantılı olarak bu fark daha çok açılmıştır. Ancak nano akışkanlar arasındaki fark yine yok denilecek kadar olmuştur. Bu, nano parçacıkların termo fiziksel özelliklerinin saf akışkaninkine yakın olduğundan kaynaklanmaktadır. Nano hacimsel oranı arttığında akışkan tipleri arasındaki farkın daha da fazlaştığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.35. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması ($Re = 10$)



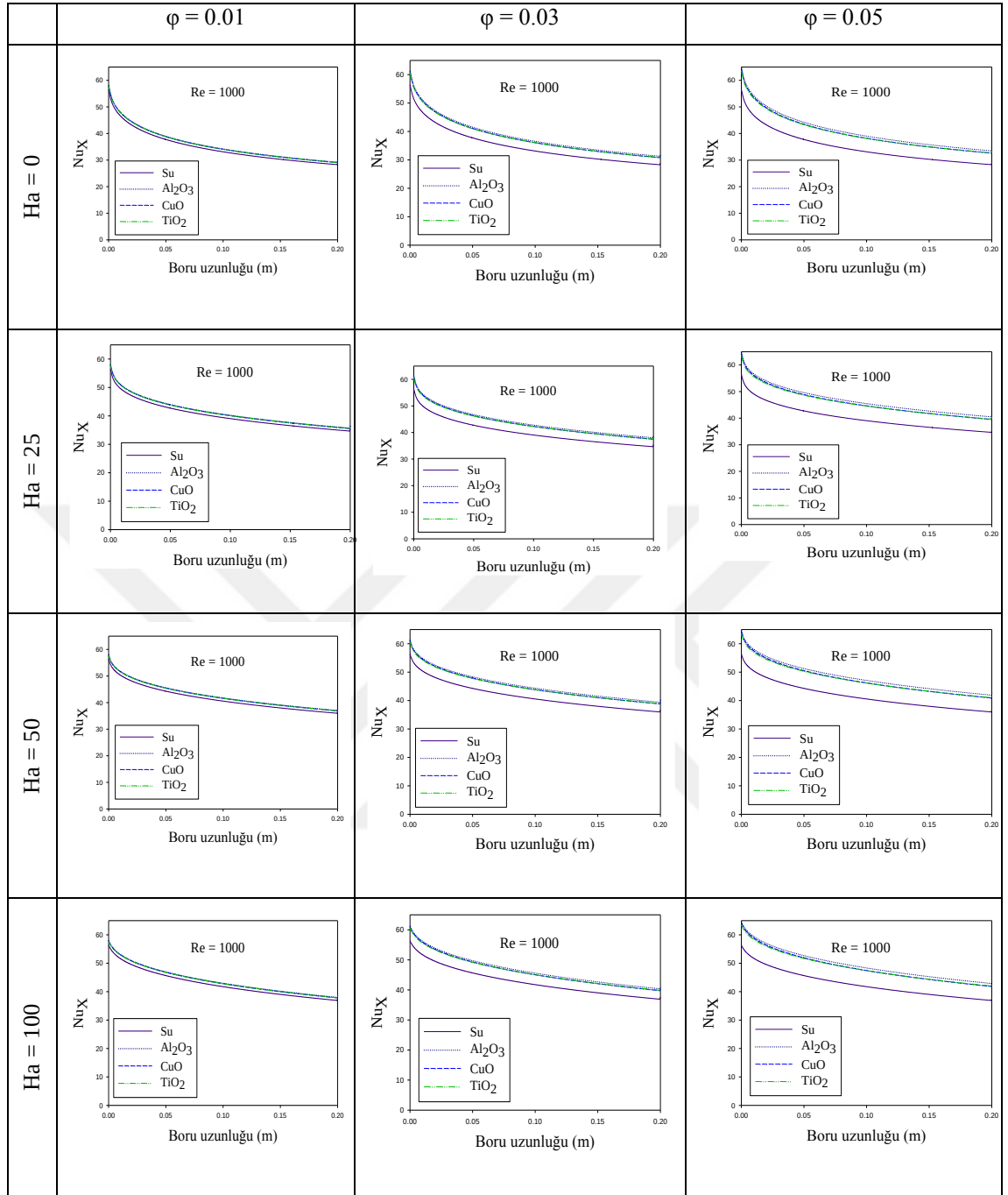
Şekil 3.36. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması ($Re = 100$)



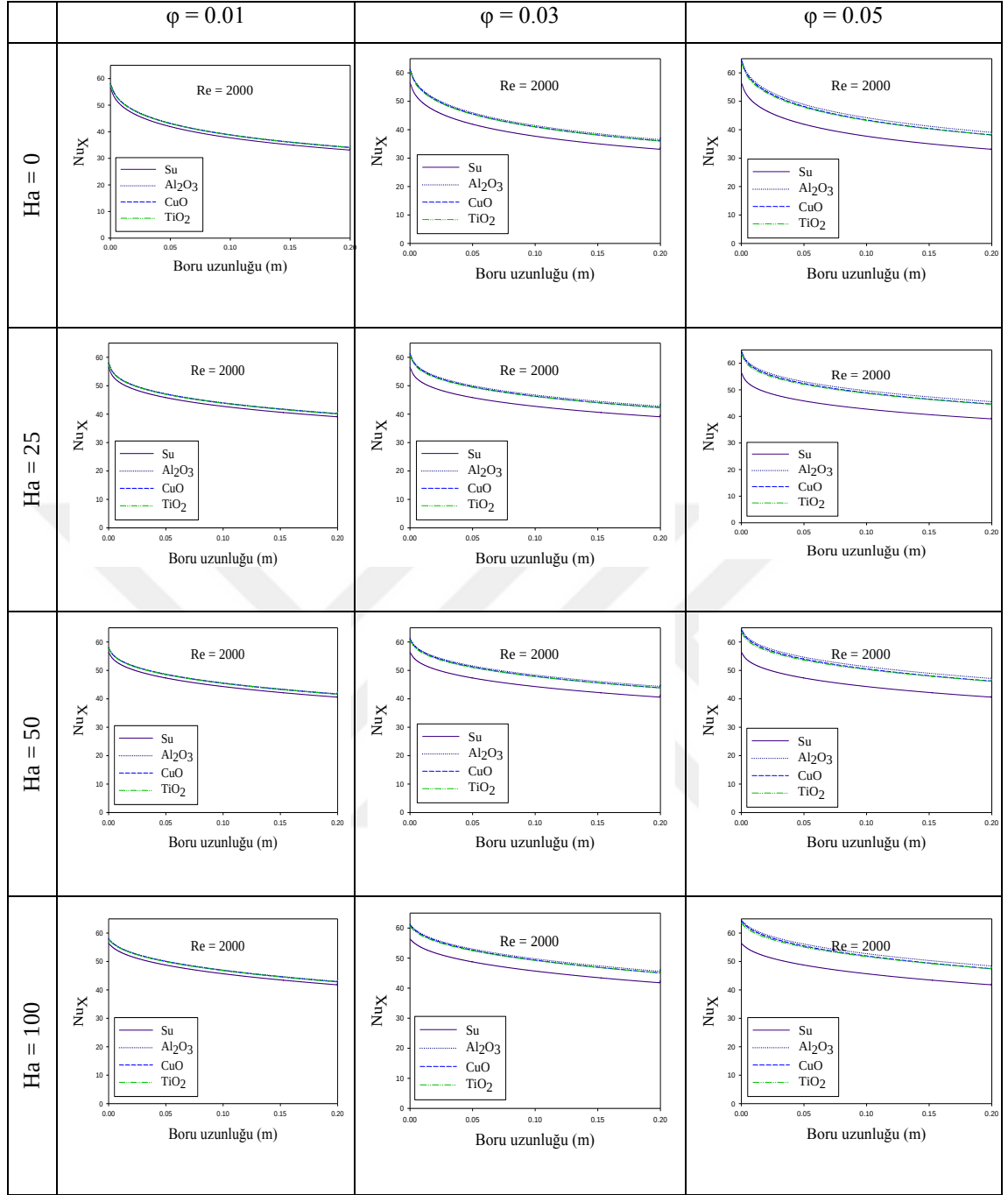
Şekil 3.37. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması (Re = 500)

Şekillerin (Şekil 3.35 - 3.39) ölçekleri incelenirken de aynı zamanda yerel Nu değerlerinin başlangıç değerlerine bakılırsa nano parçacık eklenmesinin etkisi yine görülmektedir. Ha sayılarının artması yerel Nu değerlerinin yükseldiği de yine Şekillerden (Şekil 3.35 - 3.39) anlaşılmaktadır, ancak bu fark daha önce tek grafik üzerinde gösterilen Ha sayısının etkisi kadar net görülmemektedir. Yine tüm Şekillerden (Şekil 3.35 - 3.39) $Re = 10$ 'daki grafikler hariç en yüksek yerel Nu sayısına sahip nano parçacık tipinin Al_2O_3 olduğu görülmektedir. Bu durumda hem akışkan yoğunluğu hem de ısı iletim katsayısı daha fazla etkili olmuştur. Bu durumu Salman vd. [5], kanal içerisinde yoğunluğu daha az olan nano parçacıkların daha hızlı hareket etmesinden kaynaklandığını vurgulamışlardır. Bu gruptaki diğer Şekillerde $Re = 2000$ hariç tüm grafiklerde CuO ve TiO_2 – su nano akışkanına ait yerel Nu değerlerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir.

$Re = 2000$ - $\phi = 0.05$ 'te ise tüm nano akışkan tipleri belirli bir mesafeye kadar birbirinden farklı çıkmıştır. Kanal boyunca en yüksek değeri daha belirtildiği gibi Al_2O_3 iken en düşük değerleri temel akışkan almıştır. Şekillerden (Şekil 3.35 - 3.39) edilen ilginç sonuçlardan bir tanesi de kanalın belirli bir mesafesine kadar CuO – su nano akışkanın TiO_2 nano akışkanından daha büyük olmasıdır. Bu durumun nedeninin daha çok k_{nf} / k_f oranından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu iki nano parçacığın ısı iletim katsayıları $k_{CuO} > k_{TiO_2}$ şeklindedir.



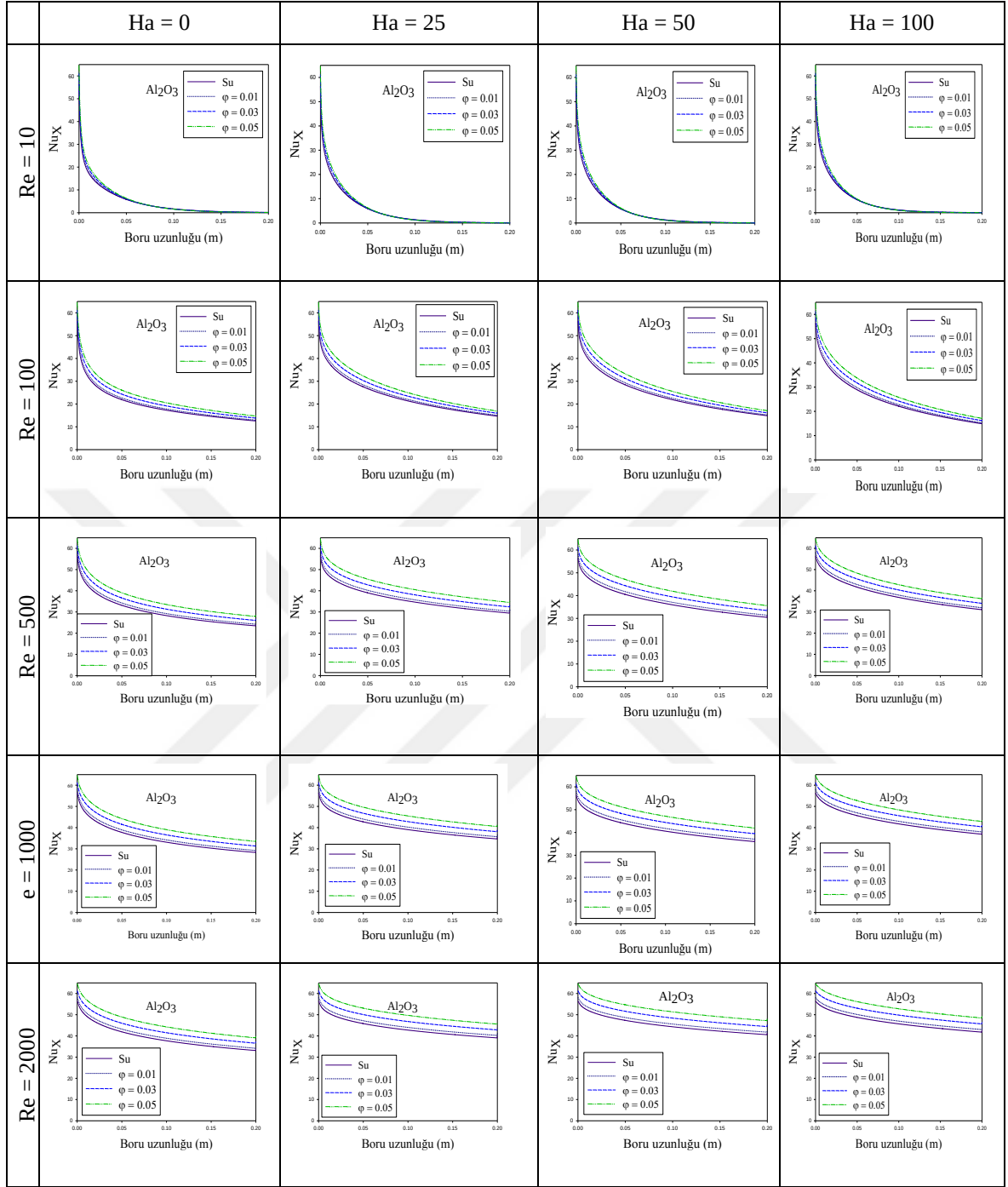
Şekil 3.38. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması (Re = 1000)



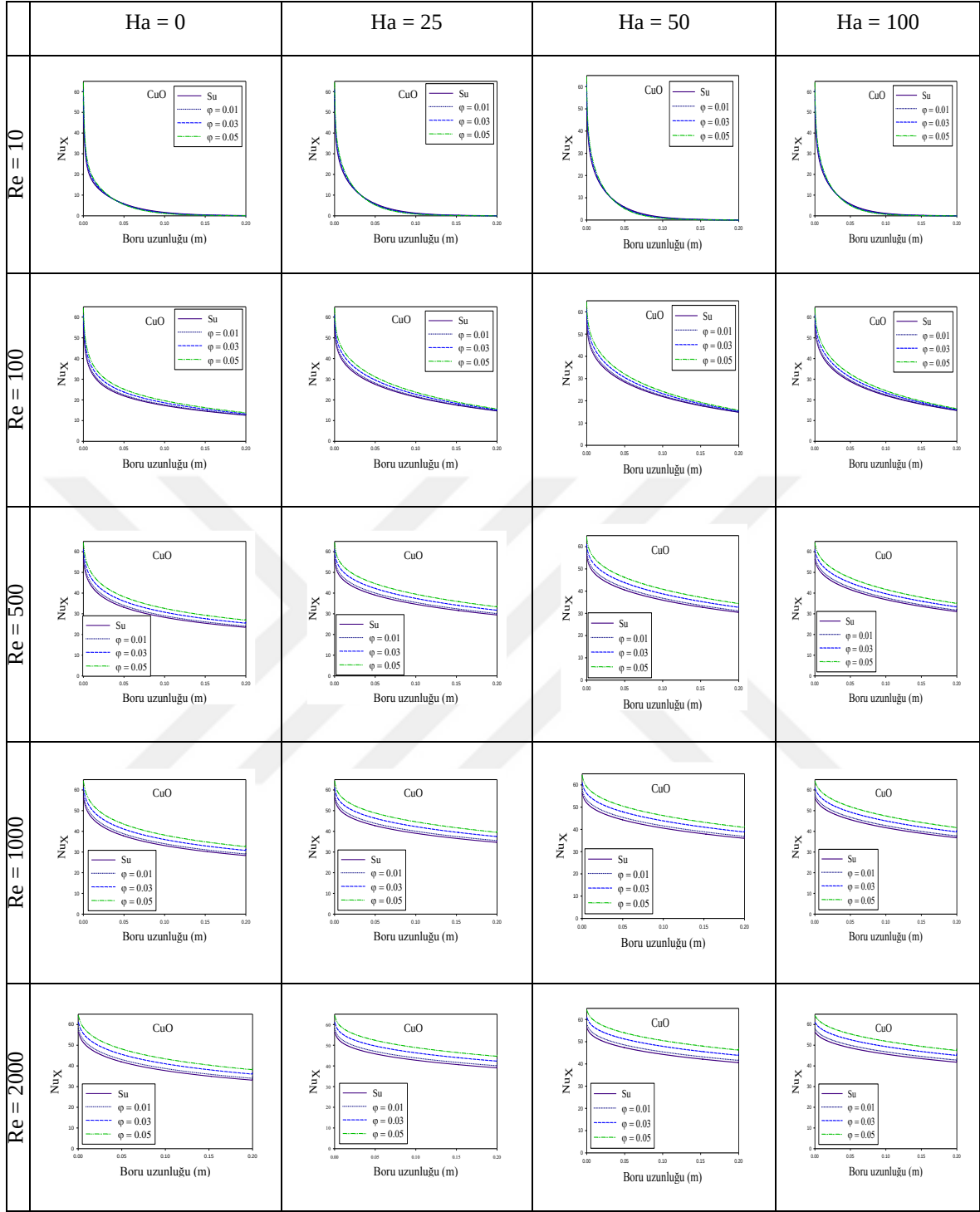
Şekil 3.39. Farklı nano akışkan tiplerinin yerel Nu sayılarının karşılaştırılması ($Re = 2000$)

Nano parçacık eklenmesi ile akışkan üzerinde meydana gelen ısı transferi olayını daha net anlamak için, Şekil 3.40'ta Al_2O_3 , Şekil 3.41'de CuO ve Şekil 3.42'de TiO_2 – su nano akışkanının farklı nano hacimsel oranlarında yerel Nu sayılarının karşılaştırılmaları gösterilmiştir. Manyetik alanın kuvvetinin olmadığı ve olduğu durum ile beş farklı Re sayısı için gözlemlenmiştir. Şekiller (Şekil 3.40 – 3.42) incelendiğinde nano parçacığın ısı transferi üzerinde çok etkili olduğu net şekilde görülmüştür. İçinde Al_2O_3 –su nano akışkanı bulunan Şekil 3.40 incelendiğinde $\text{Re} = 10$ olan grafiklerden kanalın girişinden 1/4'üne kadar nano parçacıkların yerel Nu sayılarını arttırdığı görülmektedir. Bu noktadan sonra tüm eğrilerin aşağı yukarı eşitlendiği gözlemlenmiştir. Diğer grafiklerin tümünde kanal boyunca nano parçacıkların katkısıyla ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir.

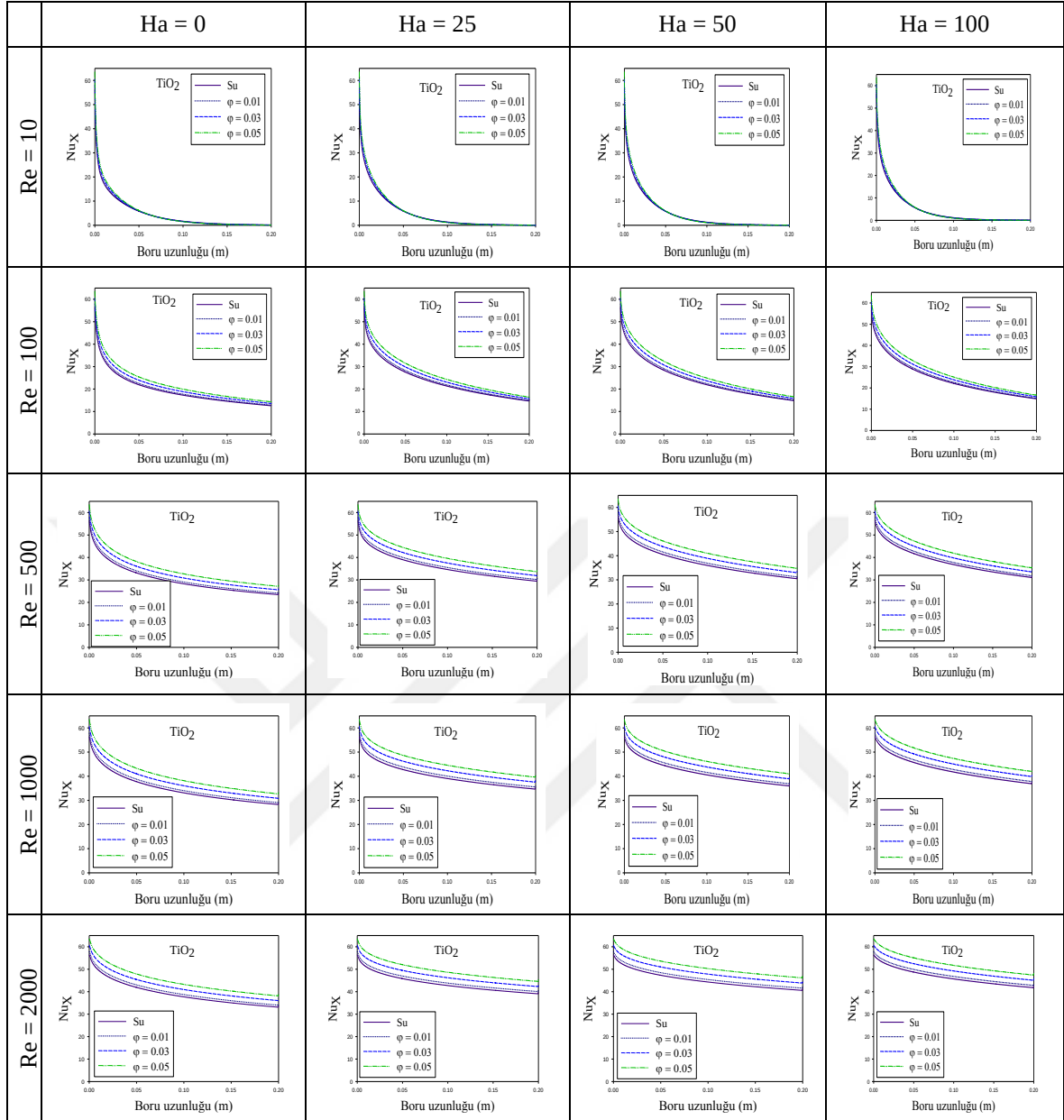
İçinde CuO – su nano akışkanı olan Şekil 3.41 incelendiğinde $\text{Re} = 10$ hariç bütün durumlarda nano parçacıkların varlığı ısı transferini artırmıştır. $\text{Re} = 10$ 'da kanalın yaklaşık 0.04 metresine kadar taşınım ile meydana gelen ısı transferinin baskın olduğu ve bu noktadan sonra ısı transferinin azaldığı yani iletimle meydana gelen ısı transferinin baskın olduğu sonucuna varılmıştır. Yerel Nu ile ilgili daha önceki sonuçlarda açıklandığı gibi bu durumun akışkanın çok yavaş hareket etmesinden dolayı akışkan taşınımının çok az gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.40. Al₂O₃ – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının nano parçacıkla değişimi

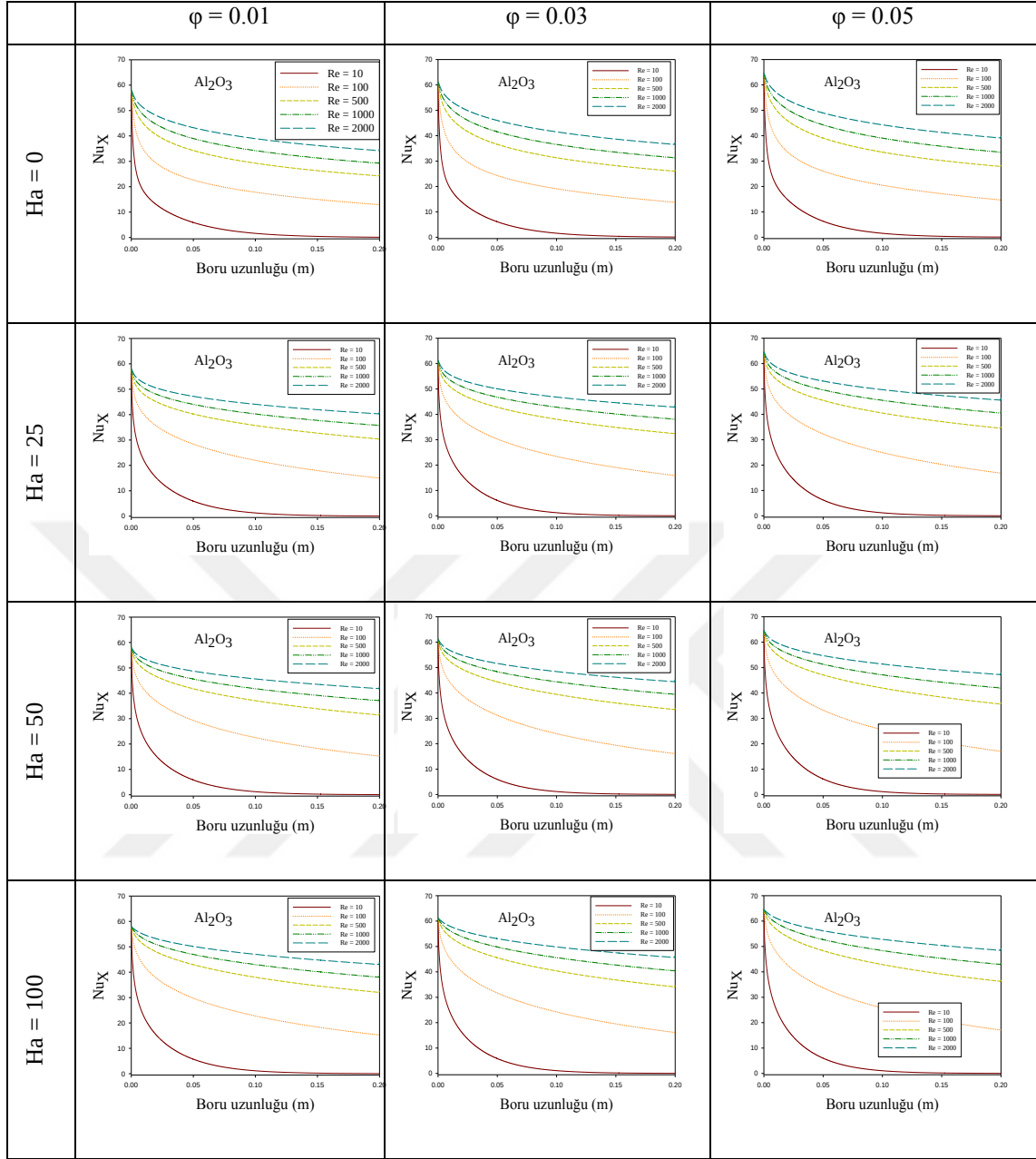


Şekil 3.41. CuO – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının nano parçacıkla değişimi



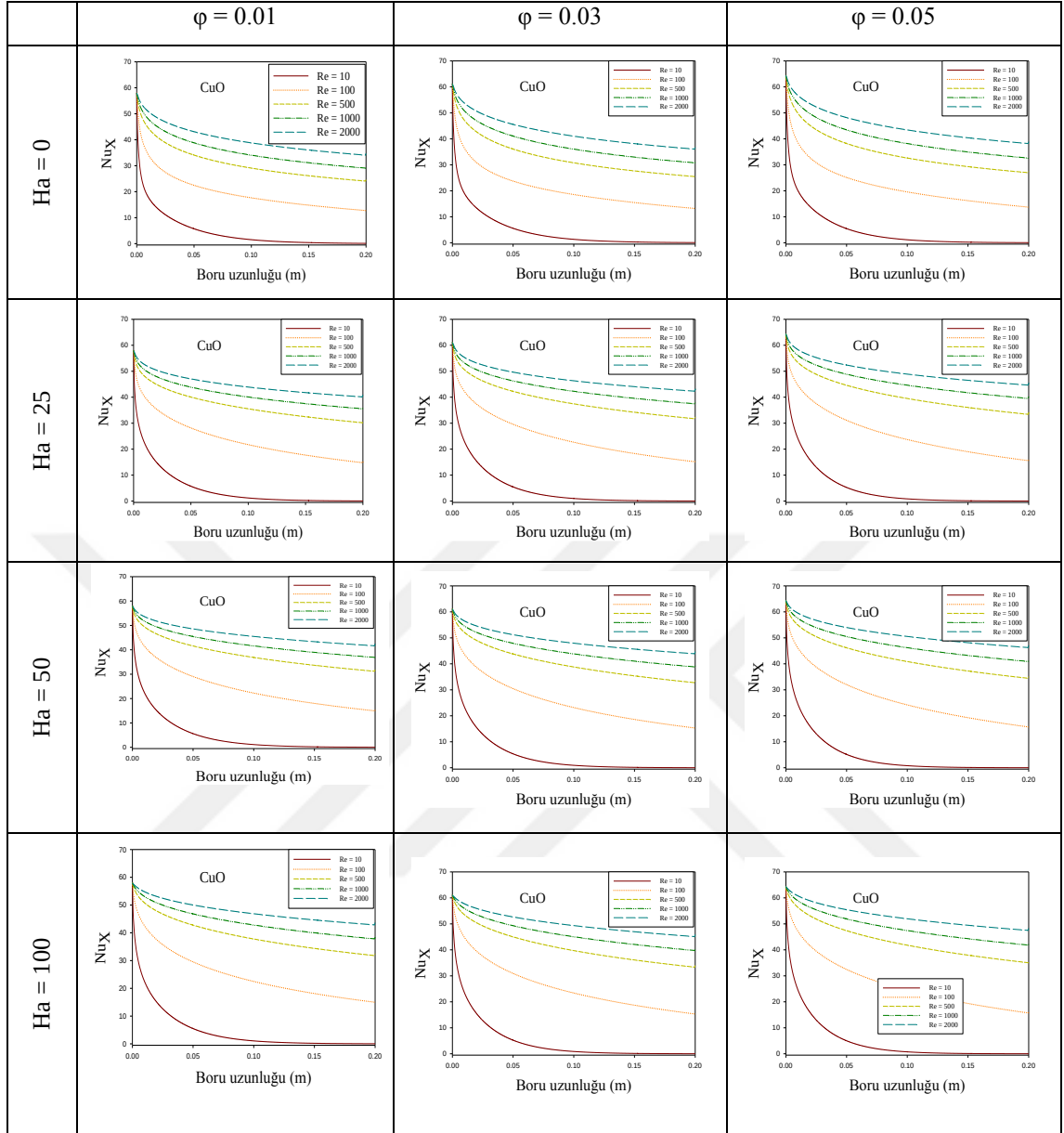
Şekil 3.42. TiO_2 – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının nano parçacıkla değişimi

Şekil 3.42’de ise, içinde TiO_2 – su nano akışkanı olan sonuçlarda meydana gelen değişim, Al_2O_3 – su nano akışkanına ait sonuçlara benzerdir (Şekil 3.40 ile 3.42). $\text{Re} = 10$ ’da önce ısı transferi artmış sonra eğriler birbirine eşitlenmiştir. Ayrıca her üç akışkan tipinde $\text{Re} = 100$ ’de yerel Nu değerleri arasındaki fark kanalın sonuna doğru birbirine yaklaşmıştır, bu fark CuO ’de daha da azdır. Bu CuO nano parçacığın yoğunluğunun çok büyük olmasıyla taşınımın yavaş gerçekleşmesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.

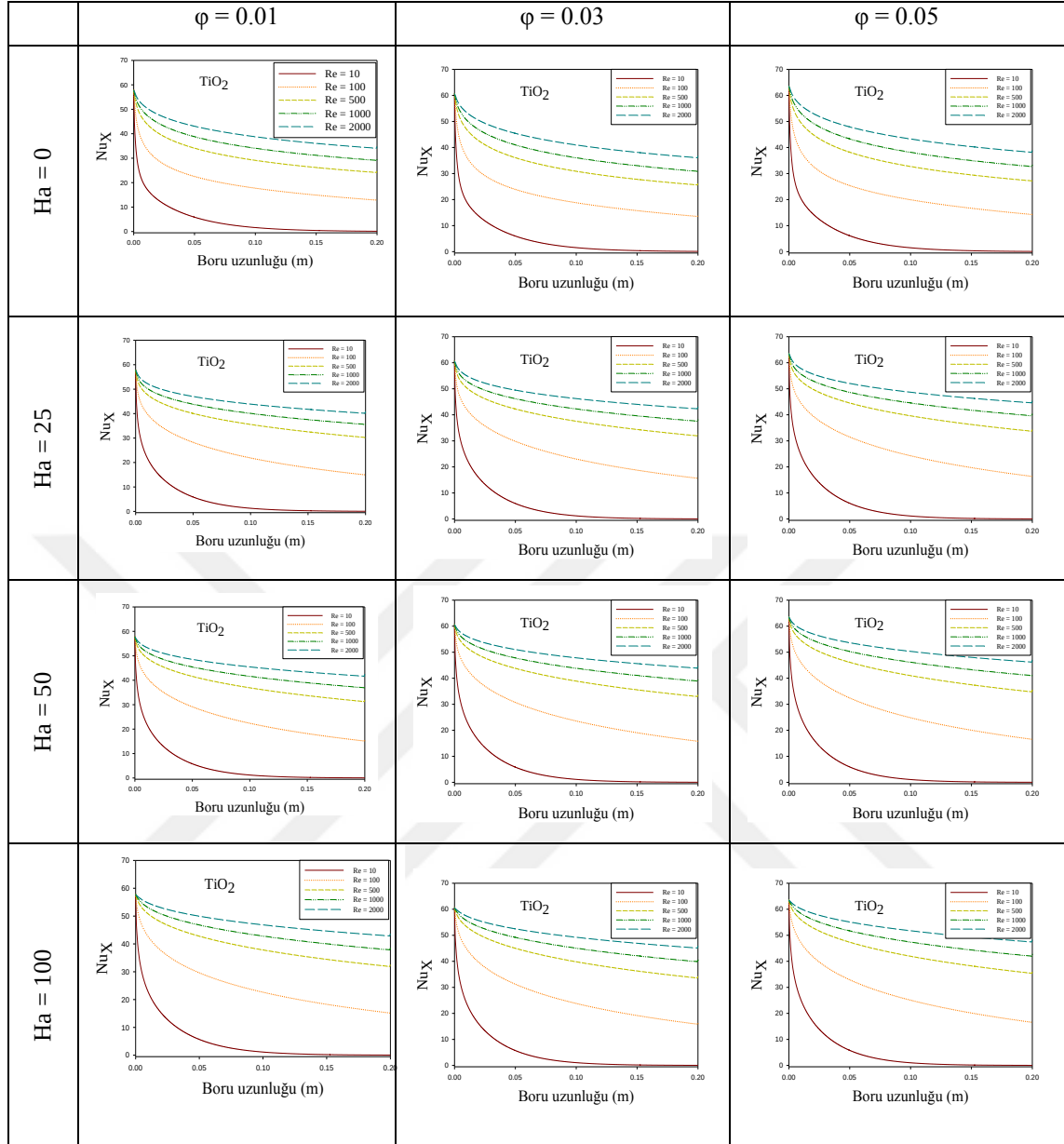


Şekil 3.43. Al_2O_3 – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının Re sayısı ile değişimi

Şekil 3.43’de Al_2O_3 , Şekil 3.44’de CuO ve Şekil 3.45’de TiO_2 – su nano akışkanının üzerinde farklı Ha sayıları ve nano hacimsel oranlarında Re etkisi verilmiştir. Sonuçlar (Şekil 3.43 – 3.45) beklenildiği gibi Re sayısının ısı transferini arttırmada çok etkili olduğu net şekilde görülmektedir. Çalışmadaki bütün akış tipleri ve çalışılan bütün parametrelerde Re sayısının artmasıyla daha fazla akışkan taşındığından ısı transferi ciddi oranda artmıştır.



Şekil 3.44. CuO – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının Re sayısı ile değişimi



Şekil 3.45. TiO_2 – su nano akışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının Re sayısı ile değişimi

3.6. Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 – Su Nano Akışkanlarının Ortalama Nusselt Sayısı (Nu)

Elde edilen ortalama Nusselt değerleri Tablo 3.3 - 3.17’de sunulmuştur. Bütün çalışma sıvılarına ait değerlerde ortalama Nu değerleri, Ha sayıları ve Re sayıları için ayrı ayrı verilmiştir. Bu değerler ayrıca grafiksel olarak da daha sonra gösterilecektir. $Re = 10$ da ki bazı durumlar hariç genel olarak Ha sayısı, nano parçacık katkısı ve Re sayısı ortalama Nu sayısı üzerinde artırıcı etki göstermiştir.

Tablo 3.3. Re = 10 için Al₂O₃ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 10	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	8.753772	8.939059	9.343122	9.79414
Ha = 25	9.351824	9.53755	9.944542	10.40246
Ha = 50	9.362623	9.547425	9.953363	10.41048
Ha = 100	9.305849	9.489523	9.893436	10.34792

Tablo 3.4. Re = 100 için Al₂O₃ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 100	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	37.89424	39.19758	41.93735	44.86669
Ha = 25	45.88414	47.31783	50.32883	53.54373
Ha = 50	47.11435	48.56154	51.60085	54.84729
Ha = 100	47.78854	49.23968	52.28857	55.546

Tablo 3.5. Re = 500 için Al₂O₃ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 500	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	59.04561	61.05278	65.24941	69.70175
Ha = 25	70.32272	72.54529	77.17874	82.07672
Ha = 50	72.85222	75.10832	79.81013	84.77845
Ha = 100	74.70941	76.98168	81.71781	86.72222

Tablo 3.6. Re = 1000 için Al₂O₃ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 1000	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	68.00803	70.25993	74.9547	79.9166
Ha = 25	78.50212	80.94206	86.01467	91.35748
Ha = 50	81.32426	83.80001	88.9453	94.36143
Ha = 100	83.62099	86.11713	91.30361	96.76183

Tablo 3.7. Re = 2000 için Al₂O₃ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 2000	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	76.44508	78.9027	84.01282	89.49396
Ha = 25	85.35497	87.95835	93.35881	99.10746
Ha = 50	88.24054	90.87912	96.35007	102.1679
Ha = 100	90.80004	93.46154	98.97809	104.8434

Tablo 3.8. Re = 10 için CuO nano akışkanının Nu değerleri

Re = 10	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	8.753772	8.739499	8.775445	8.889002
Ha = 25	9.351824	9.318389	9.325849	9.419887
Ha = 50	9.362623	9.327401	9.331767	9.423585
Ha = 100	9.305849	9.270023	9.273471	9.364256

Tablo 3.9. Re = 100 için CuO nano akışkanının Nu değerleri

Re = 100	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	37.89424	38.84135	40.86958	43.07916
Ha = 25	45.88414	46.85052	48.93625	51.22763
Ha = 50	47.11435	48.07266	50.14713	52.43371
Ha = 100	47.78854	48.73631	50.79365	53.06747

Tablo 3.10. Re = 500 için CuO nano akışkanının Nu değerleri

Re = 500	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	59.04561	60.70944	64.23213	68.01986
Ha = 25	70.32272	72.15942	76.03751	80.19281
Ha = 50	72.85222	74.70894	78.63002	82.83254
Ha = 100	74.70941	76.56816	80.49712	84.71319

Tablo 3.11. Re = 1000 için CuO nano akışkanının Nu değerleri

Re = 1000	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	68.00803	69.93308	73.98855	78.32295
Ha = 25	78.50212	80.59953	85.00275	89.69017
Ha = 50	81.32426	83.45043	87.91233	92.65991
Ha = 100	83.62099	85.75718	90.24185	95.01486

Tablo 3.12. Re = 2000 için CuO nano akışkanının Nu değerleri

Re = 2000	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	76.44508	78.60055	83.1198	87.92315
Ha = 25	85.35497	87.65741	92.46958	97.56483
Ha = 50	88.24054	90.57684	95.45655	100.6185
Ha = 100	90.80004	93.15468	98.07066	103.2701

Tablo 3.13. Re = 10 için TiO₂ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 10	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	8.753772	8.883341	9.17462	9.509859
Ha = 25	9.351824	9.478541	9.766864	10.10293
Ha = 50	9.362623	9.488253	9.775527	10.1106
Ha = 100	9.305849	9.430679	9.71587	10.04939

Tablo 3.14. Re = 100 için TiO₂ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 100	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	37.89424	38.98119	41.26304	43.69754
Ha = 25	45.88414	47.06763	49.55331	52.20694
Ha = 50	47.11435	48.30597	50.81055	53.48589
Ha = 100	47.78854	48.98124	51.48993	54.17125

Tablo 3.15. Re = 500 için TiO₂ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 500	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	59.04561	60.75339	64.31649	68.08425
Ha = 25	70.32272	72.21303	76.14744	80.29489
Ha = 50	72.85222	74.76992	78.76041	82.96622
Ha = 100	74.70941	76.63904	80.65528	84.8892

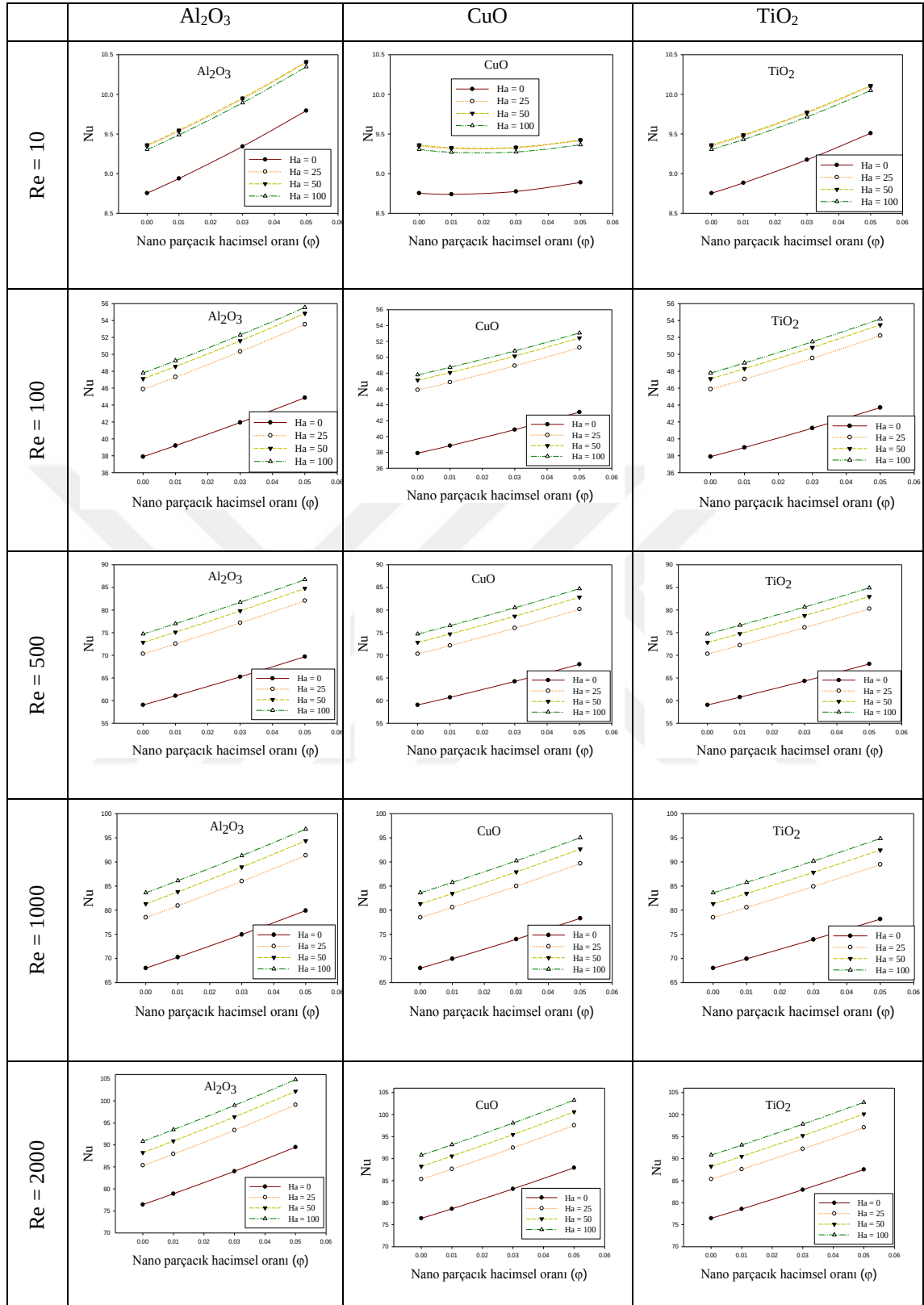
Tablo 3.16. Re = 1000 için TiO₂ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 1000	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	68.00803	69.93387	73.9394	78.15859
Ha = 25	78.50212	80.59081	84.9245	89.47476
Ha = 50	81.32426	83.44368	87.83882	92.45144
Ha = 100	83.62099	85.75644	90.18478	94.83238

Tablo 3.17. Re = 2000 için TiO₂ nano akışkanının Nu değerleri

Re = 2000	Su	$\phi = 0.01$	$\phi = 0.03$	$\phi = 0.05$
Ha = 0	76.44508	78.5563	82.93435	87.52874
Ha = 25	85.35497	87.59449	92.22896	97.07928
Ha = 50	88.24054	90.51086	95.20728	100.1187
Ha = 100	90.80004	93.08984	97.82479	102.7756

Bu bölümde yukarıda Tablo 3.3 - 3.17 olarak verilen ortalama Nu değerleri grafik olarak Şekil 3.46'da gösterilmiştir. Re = 10 durumu hariç genel olarak Re sayısı, Ha sayısı ve nano parçacık eklenmesi ortalama Nu sayısını artırmıştır.



Şekil 3.46. Farklı nano parçacık tiplerinin ortalama Nu sayısı üzerinde nano parçacık hacimsel oranı, Re ve Ha etkisi

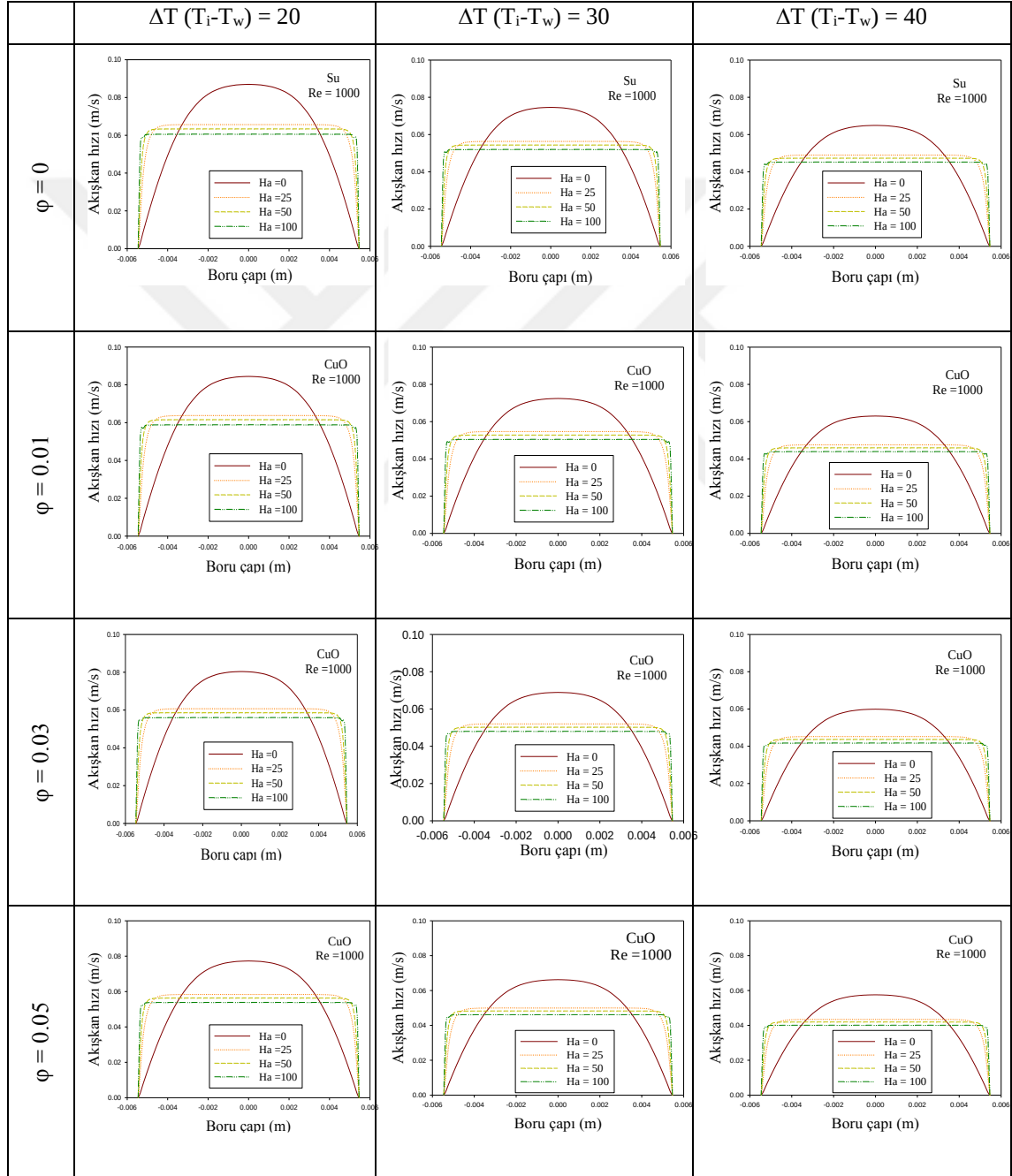
Şekilde (Şekil 3.46) soldan birinci sütun Al_2O_3 , ikinci sütun CuO, üçüncü sütun TiO_2 'yi ve üstten birinci satırdan son satıra kadar sırasıyla $Re = 10, 100, 500, 1000$ ve 2000 'i temsil etmektedir. Şekildeki (Şekil 3.46) her bir grafikte x (yatay) eksenini nano hacimsel oranı, y (dikey) eksenini ortalama Nu değerlerini ve her bir grafik içinde farklı Ha sayılarının karşılaştırmaları verilmiştir. $Re = 10$ hariç tüm çalışma parametrelerinde Ha sayısı, Re sayısı ve nano hacimsel oranı ortalama Nu sayısı üzerinde pozitif etkiye neden olmuştur. Ancak $Re = 10$ 'da her üç akışkan tipinde de manyetik alan ilk uygulandığında önce ısı transferi artmış, daha sonra artma yavaş şekilde devam etmiş fakat $Ha = 100$ 'de ısı transferi azalmıştır. Bunda daha önce bahsi geçen akışkanın yavaş taşınması etkili olmuştur. Yerel Nu sayılarında da ısı transferinin kanalın $1/4$ 'ünden sonra azalma eğilimi gösterdiği ve toplamda iletim değerlerinin taşınım değerlerinden daha fazla olduğu belirtilmişti. Aynı zamanda yine $Re = 10$ için CuO $\phi = 0.03$ 'e kadar çok az düştüğü ve 0.05 değeri için arttığı tespit edilmiştir. Burada akışkanın termal iletkenlik katsayısı etkili olmuştur. Burada düşük Re sayısından sonra elde edilen diğer sonuçlar Heidary ve diğ. [114] tarafından tek bir akışkan tipi için $Re = 250$ 'de, ortalama Nu sayısı, nano akışkan hacimsel oranı ve Ha sayısı arasındaki ilişkiyi incelerken gerçekleştirdikleri sayısal sonuçlara oldukça benzer bir eğilim göstermiştir.

3.7. Nano Akışkanın akış karakteristikleri ve ısı transferi üzerinde ΔT etkisi

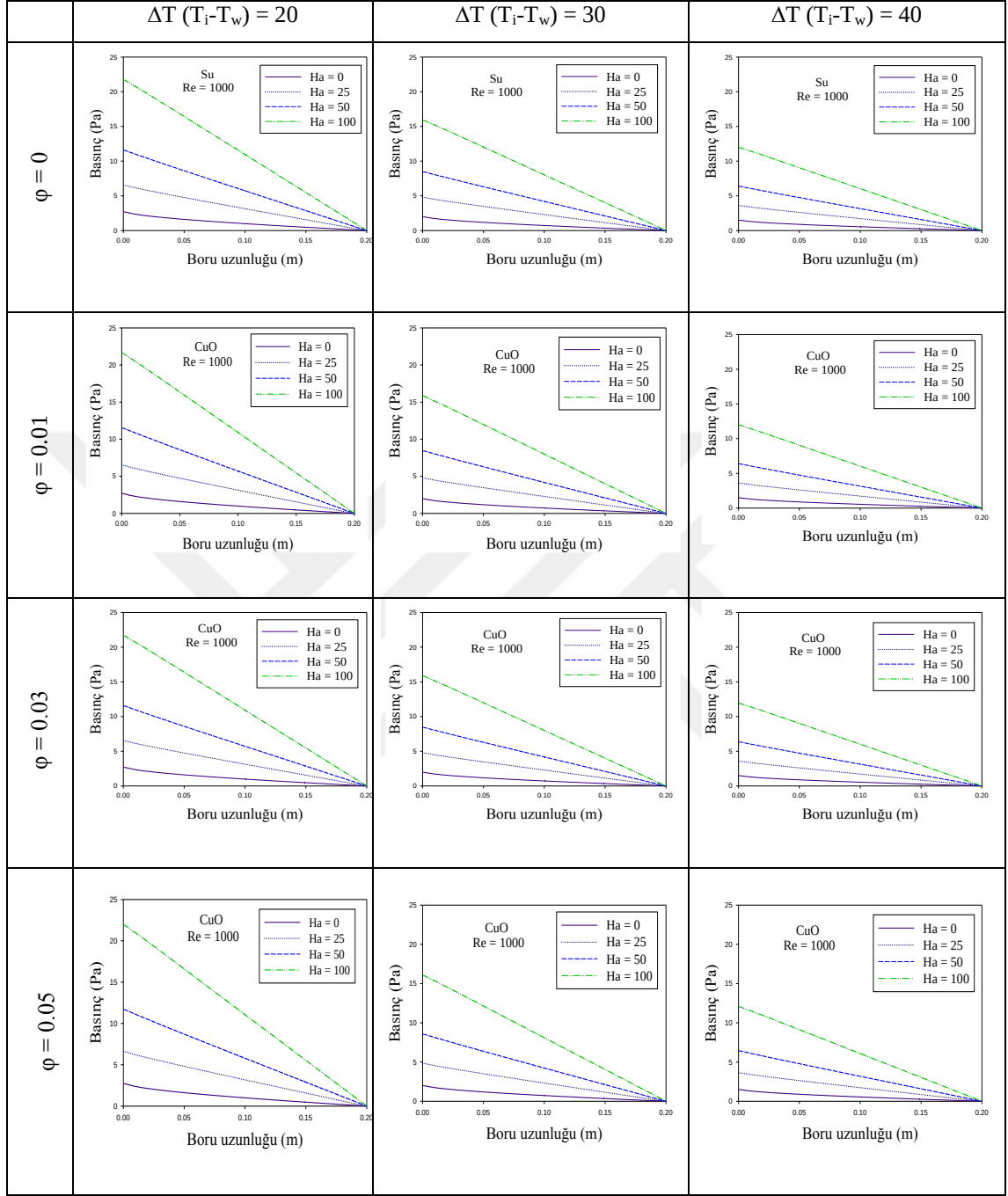
Duvar sıcaklığı sabit tutularak $T_i > T_w$ olan üç farklı T giriş sıcaklığına sahip akışkanın akış ve ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. Sıcaklık farkının akış üzerindeki hız, basınç ve sıcaklık etkileri irdelenmiştir. $T_w = 30^{\circ}C$ olarak sabit tutulmuş akışkan sıcaklıkları da $50, 60$ ve $70^{\circ}C$ olarak belirlenmiştir. Nano parçacık olarak da CuO tercih edilmiştir.

Şekil 3.47'de sabit Re sayısında fakat üç farklı sıcaklık aralığında kanala giren nano akışkanın analizi verilmiştir. Kanal malzemesi olarak tezde genel olarak kullanılan yine plastik malzeme tercih edilmiştir. Cidar sıcaklığı sabit tutulurken sadece akışkanın sıcaklıkları değiştirilmiş ve akışkan sıcaklığına bağlı olarak termo fiziksel özellikler yeni sıcaklık değerine göre yeniden hesaplanarak sınır şartları belirlenmiştir. Analizler bu üç farklı sıcaklık değeri ve nano katkısı olmayan temel akışkan ile üç farklı nano akışkan için gerçekleştirilmiştir. Şekilde (Şekil 3.47), soldan sağa ΔT sıcaklık farkı, yukarıdan aşağıya doğru da nano hacimsel oranı artırılmıştır. Şekil (Şekil 3.47) incelendiğinde, sabit cidar

sıcaklığına sahip boruda soldan sağa akışkan sıcaklığının artmasıyla hızlarda önemli bir düşüş meydana geldiği açıkça görülmektedir. Bu artan sıcaklıkla ters orantılı olarak azalan dinamik viskozitesinden kaynaklanmaktadır. Viskozitenin sıcaklıkla azalması ve hız ile orantılı olarak artması böyle bir sonuca neden olmuştur. Daha önceki sonuçlara benzer olarak nano hacimsel oranı ve Ha sayısının artmasıyla akışkan hızlarında düşme meydana geldiği belirlenmiştir.



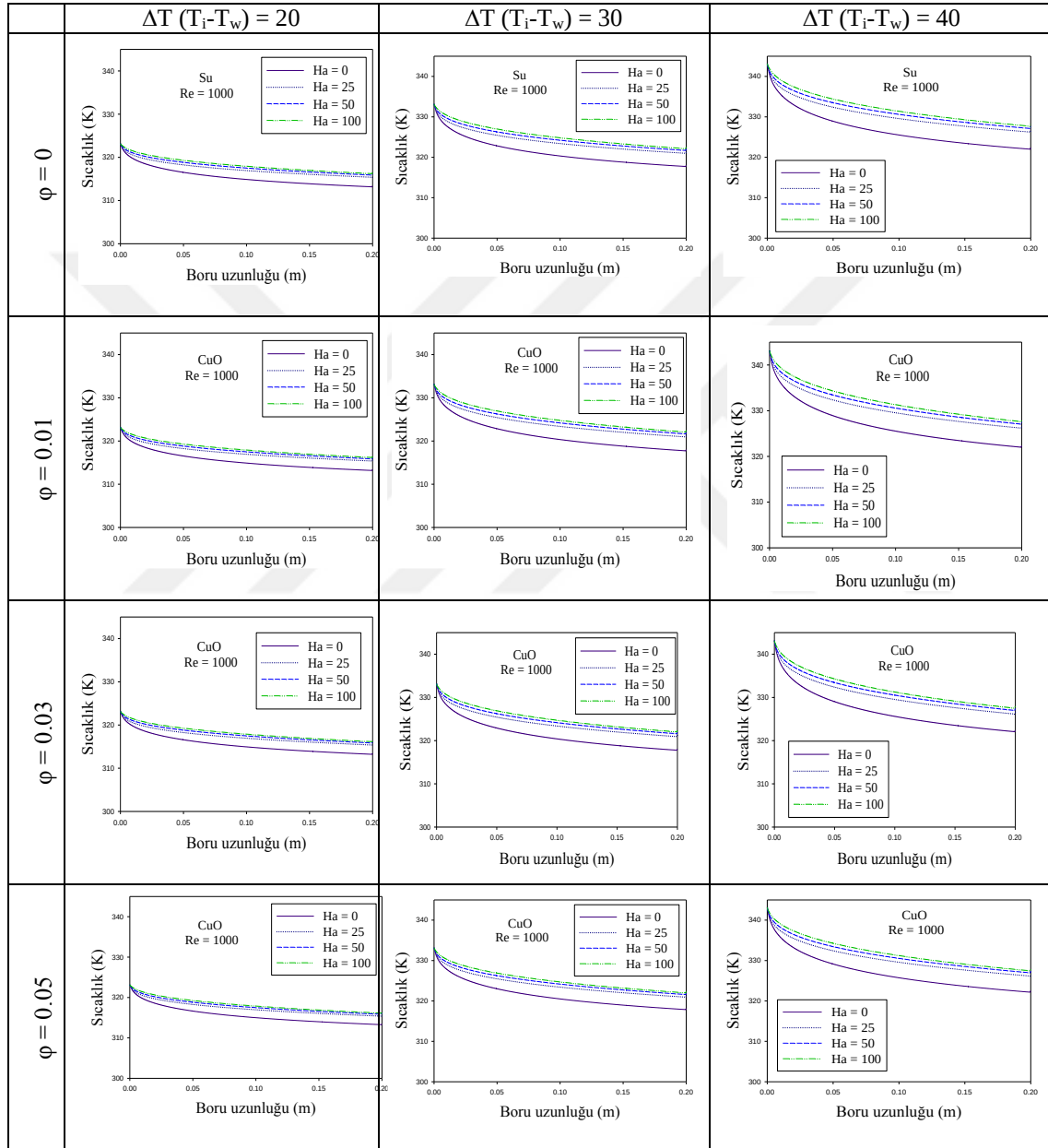
Şekil 3.47. Üç farkı sıcaklık aralığında CuO – su nano akışkanının hız değişimi (Re = 1000)



Şekil 3.48. Üç farklı sıcaklıkta CuO – su nano akışkanının basınç değişimleri (Re = 1000)

Üç farklı sıcaklığa sahip nano akışkanın basınç değişimleri Şekil 3.48’de sunulmuştur. Şekilden ΔT sıcaklık farkının artması ciddi bir basınç düşümüne neden olmuştur. Bu durumun daha çok akışkanın yoğunluğu ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bilindiği gibi akışkanın yoğunluğu ile sıcaklığı arasında ters bir bağıntı vardır. Daha soğuk akışkanın yoğunluğu daha büyük olduğu için daha büyük bir basınca neden olmuştur. Aynı

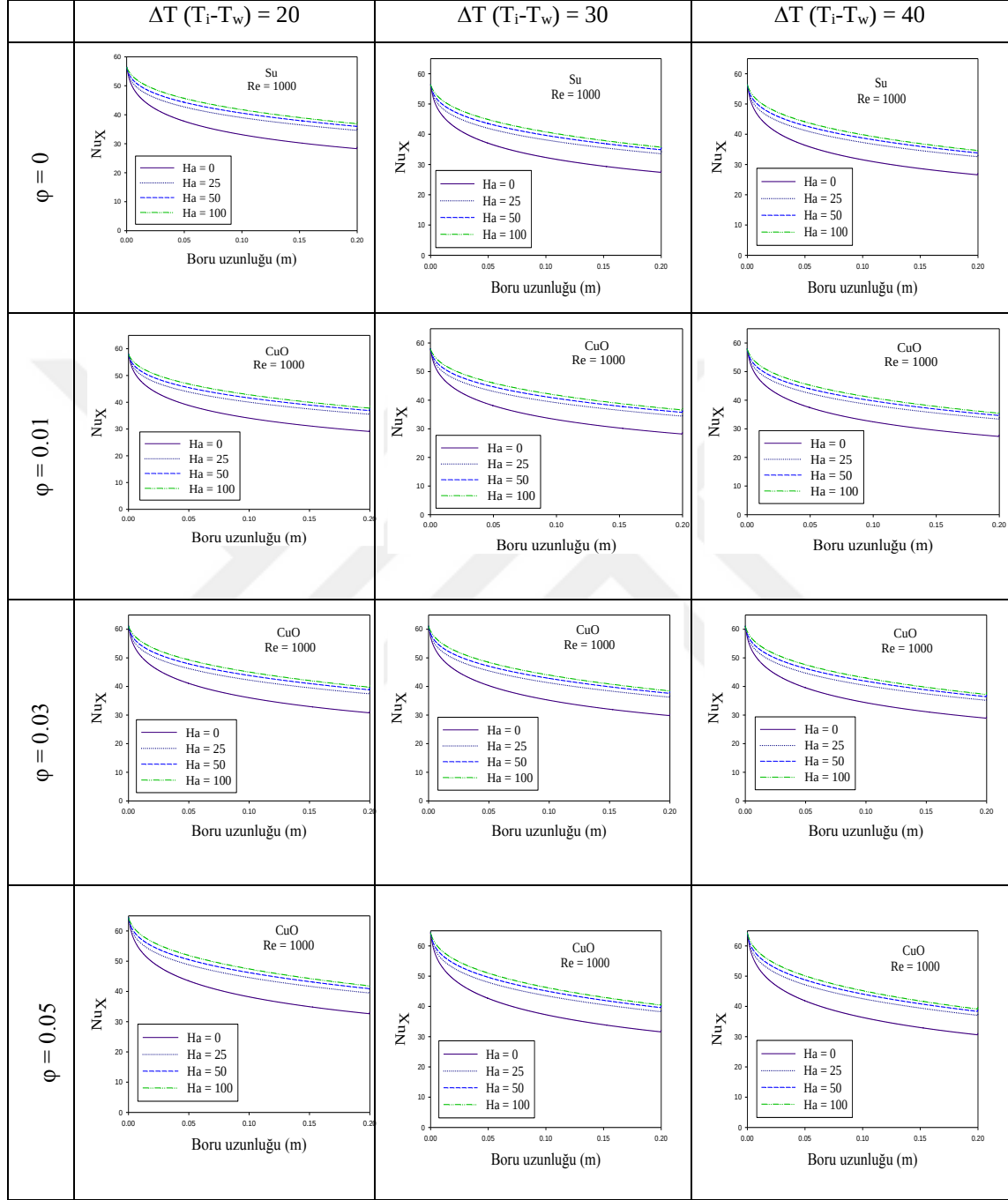
zamanda Ha sayısının atması her üç durum içinde tüm sonuçlarda diğer sonuçlara benzer olarak basıncı arttırmıştır. Ancak nano hacimsel oranının artmasıyla meydana gelen basınç değişimleri yok denecek azdır. $\Delta T = 20K$ 'de basınç değerleri sırasıyla $Ha = 0 - 100$ arasında 0 ile 25 Pa arasında iken, $\Delta T = 30K$ 'de bu değerler 0 ile 20 Pa arasında ve son olarak $\Delta T = 40K$ için bürgerler 0 ile 15 Pa arasında olmuştur.



Şekil 3.49. Üç farklı sıcaklıkta CuO – su nano akışkanının sıcaklık değişimleri ($Re = 1000$)

Üç farklı ΔT sıcaklık farkında içine CuO nano parçacığı katılmış nano akışkana ait sıcaklık değişimleri Şekil 3.49'da sunulmuştur. Birinci sütun $T_i = 50$, ikinci sütun $T_i = 60$ ve üçüncü sütun $T_i = 70^\circ C$ ' yi temsil etmektedir. Sütunlarda soldan sağa gidildikçe

sıcaklıkların yukarıdan başladığı açıktır. Önceki Şekillere benzer, tüm nano akışkan hacimsel oranlarında, uygulanan manyetik alanın sıcaklığı arttırdığı açıkça izlenmektedir.



Şekil 3.50. $Re = 1000$ farkı sıcaklıkların yerel Nu değişimleri

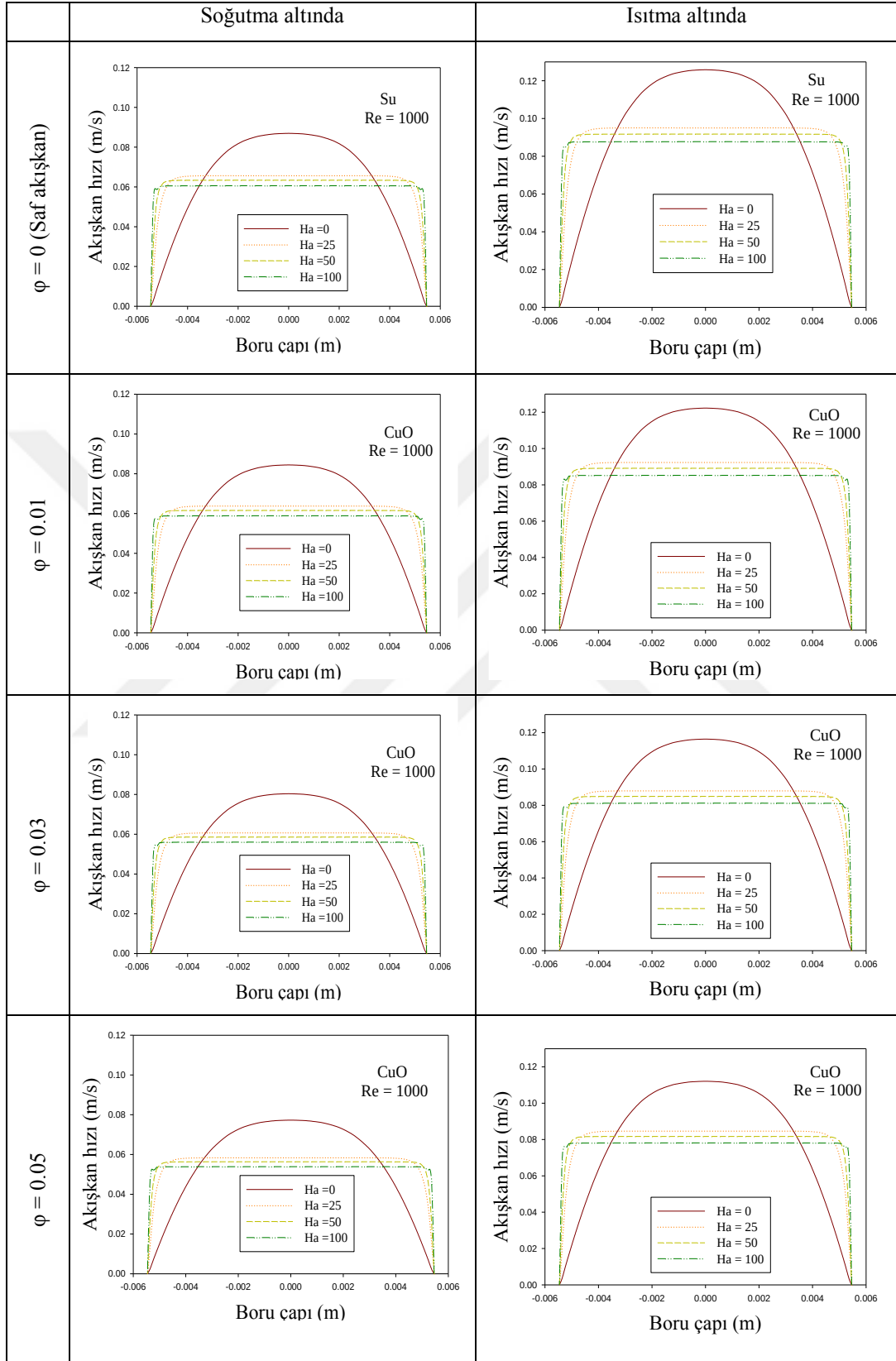
Şekil 3.50’de, üç farklı ΔT sıcaklığında boru uzunluğunun bir fonksiyonu olarak yerel Nusselt sayılarının değişimleri gösterilmiştir. Bütün durumlarda Ha sayısı ve nano parçacık etkisiyle yerel Nu değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Birinci satırda yerel Nu

değerleri yaklaşık olarak 56'dan başlamışken, ikinci satırda 58'e yakın, üçüncü satırda tam olarak 60'tan, son satırda ise 60 üzerinden başlamıştır. Ancak ΔT sıcaklık farkında, satırlar arasındaki ısı transferi değerleri bakımından her hangi bir farkın olmadığı tespit edilmiştir.

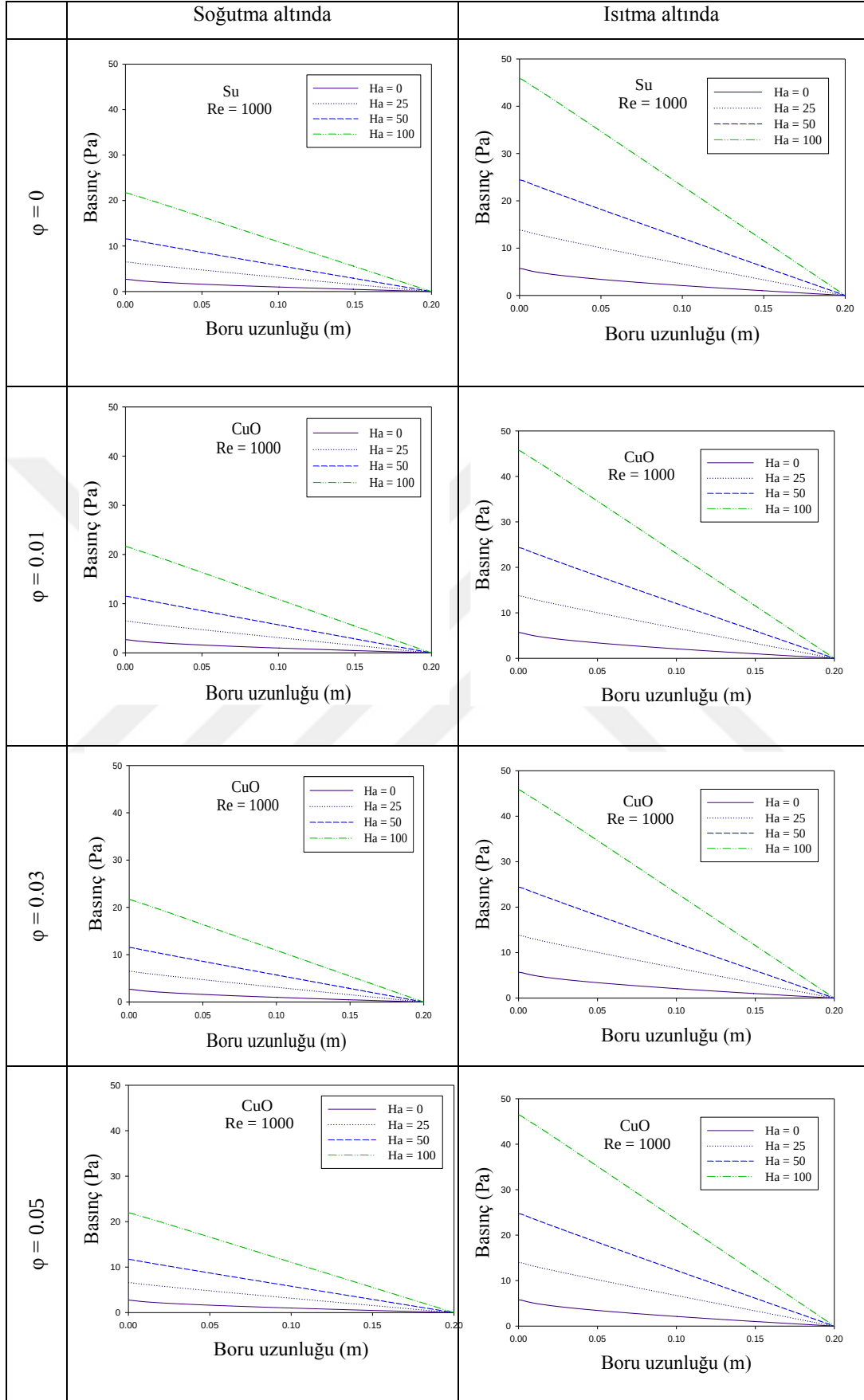
3.8. Akışkanın Isıtılması ve Soğutulmasının Akış ve Isı Transferi Üzerinde Etkisi

Bu bölümde, akışkan ve kanal sıcaklıklarının yerleri değiştirilerek akışkanın ısıtılması ve soğutulmasının analizi gerçekleştirilmiştir. Isıtmada akışkan 30°C iken kanal sıcaklığı 50°C ve soğutmada akışkan 50°C iken kanal sıcaklığı 30°C olarak seçilmiştir. Başka bir deyişle ısıtmada $T_w > T_i$ iken, soğutmada $T_i > T_w$ durumu mevcuttur.

Farklı nano hacimsel oranları ve Ha sayılarında hem nano akışkanın soğutulması hem de ısıtılmasının hız analizleri Şekil 3.51'de verilmiştir. Birinci sütun soğutma yani sıcak akışkanın soğuması, ikinci sütun ısıtma yani ısınan soğuk akışkanı temsil etmektedir. Burada ısıtma altındaki akışkanın hızının daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum daha öncede açıklandığı gibi ısıtma altındaki ısınan soğuk akışkanın viskozitesinin yüksek olduğundan kaynaklanmaktadır. Burada ısınan akışkanın yoğunluğunun azalmasıyla tersi bir durum olması beklenir, ancak viskozite ile meydana gelen değişme çok daha baskın olduğundan böyle bir durum meydana gelmiştir. Manyetik alan şiddeti ve nano hacimsel yoğunluğunun artmasıyla akışkan hızlarında meydana gelen azalma önceki sonuçlara benzer bir eğilim göstermiştir.



Şekil 3.51. Re = 1000'de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtmada hızın etkisi ($\Delta T = 20$)

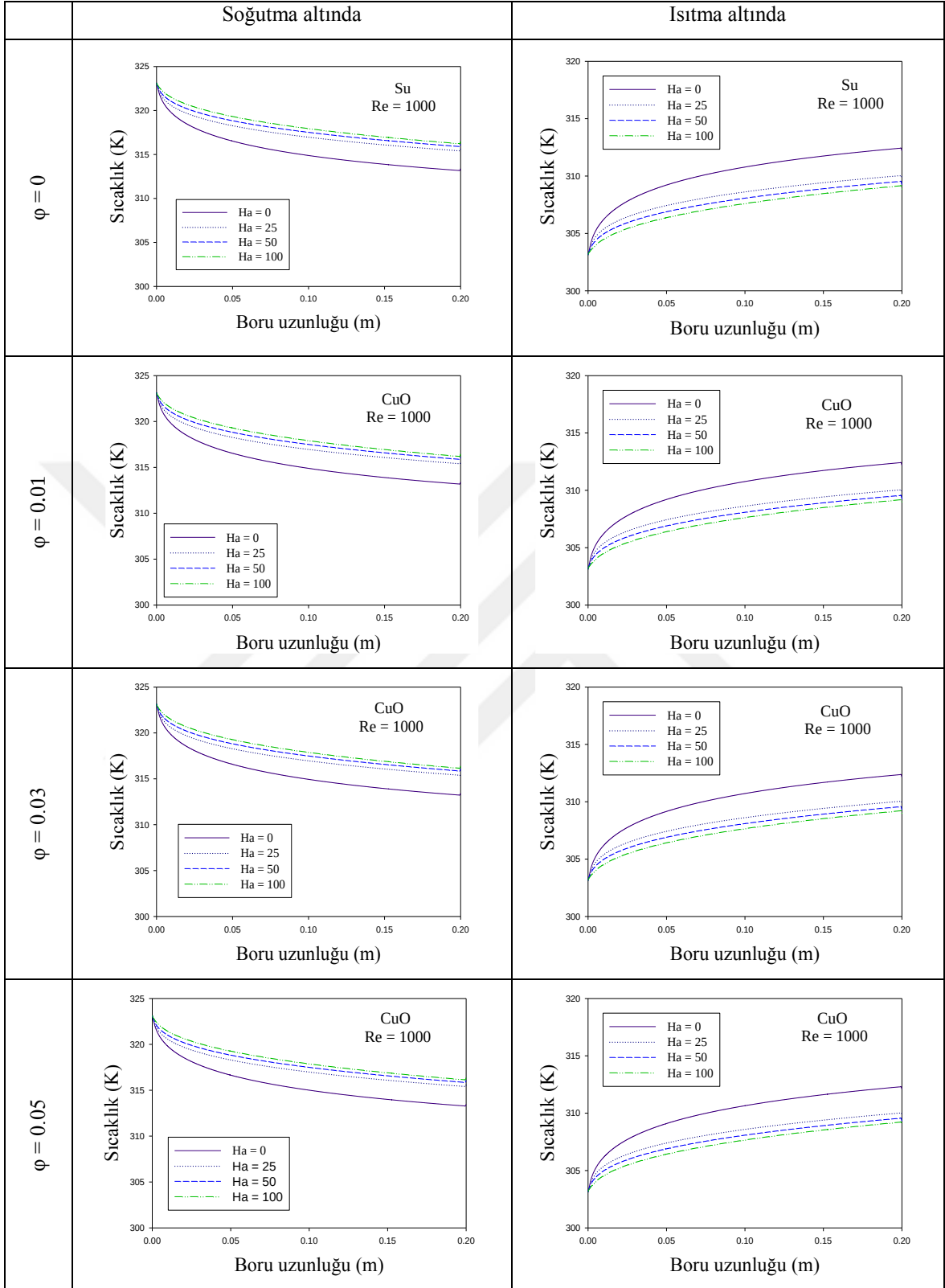


Şekil 3.52. Re = 1000'de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtmada basıncın etkisi ($\Delta T = 20$)

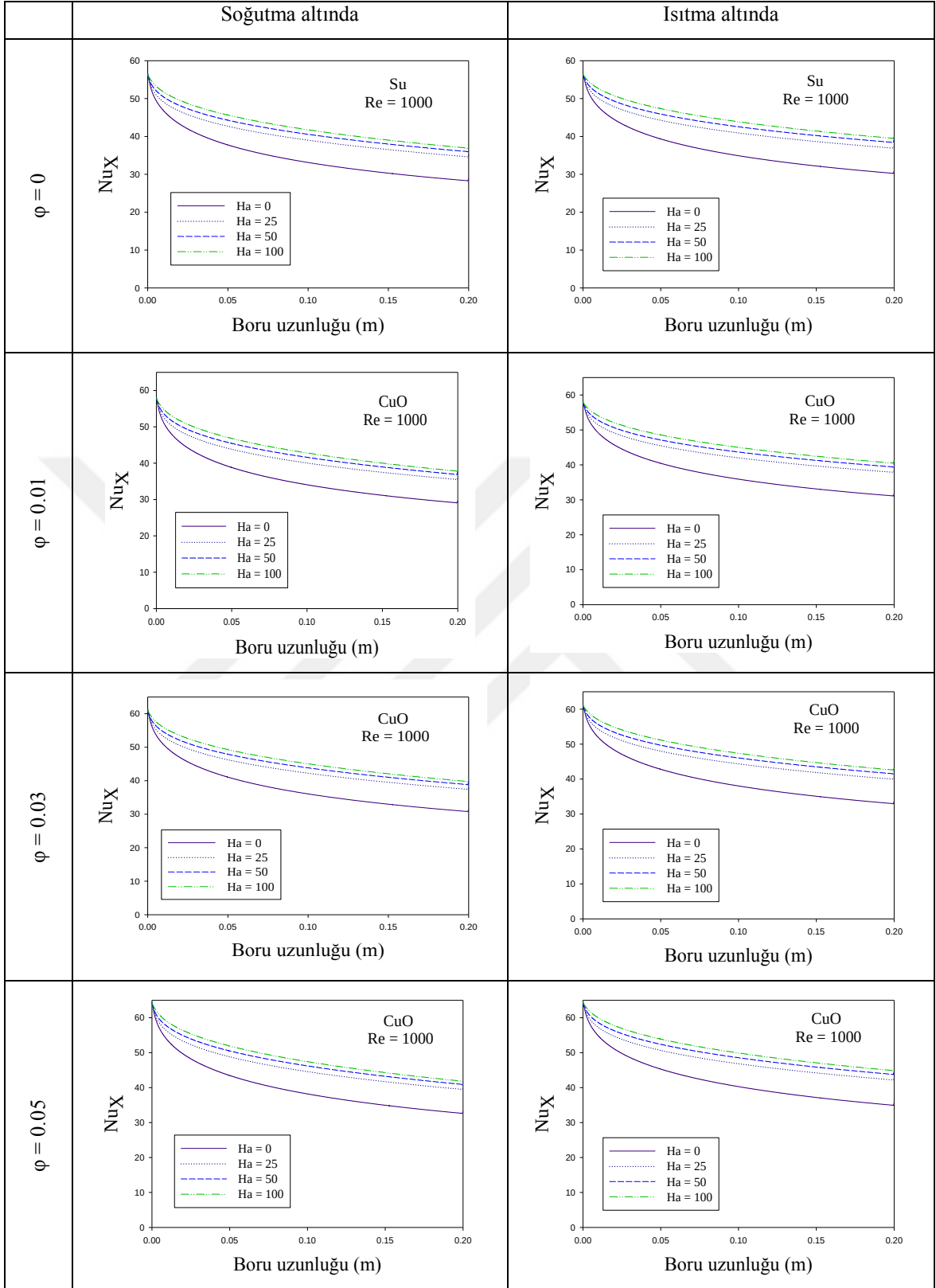
$Re = 1000$ 'de, CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtmadaki basıncın etkisi Şekil 3.52'de verilmiştir. Birinci sütunda soğutma etkisinde olan akışkanın ikinci sütundaki ısıtma etkisindeki akışkanın basıncından çok daha az değerler almıştır. Sırasıyla $Ha = 0$, 25, 50 ve 100 için birinci sütunda basınç değerleri genel olarak 0-5 Pa, 5-10 Pa, 10-15 Pa 20-25 Pa fakat ikinci sütunda bu değerler yine sırasıyla 0-10 Pa, 10-20 Pa, 20-30 Pa, 40-50 Pa arasındadır. Daha önce bahsedildiği gibi, soğuk akışkanın yoğunluğu daha büyük olduğu için böyle bir durumun meydana geldiği düşünülmektedir.

Şekil 3.53, $Re = 1000$ 'de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtma için sıcaklık etkisi irdelenmiştir. Buradaki her bir grafik farklı Ha değerleri için incelenmişken, birinci sütun soğutma etkisinde ve ikinci sütun ısıtma etkisinde olan akışkan için sonuçlar sunulmuştur. Birinci sütunda akışkanın soğuduğu ve ikinci sütunda akışkanın ısındığı anlaşılmıştır. Soğutmada manyetik alan kuvveti sıcaklığı yükseltmişken, ısıtmada manyetik alan sıcaklığı düşürmüştür. Her iki durumda akışkan ile duvar sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı uygulanan dış manyetik alan kuvveti ile açılmıştır.

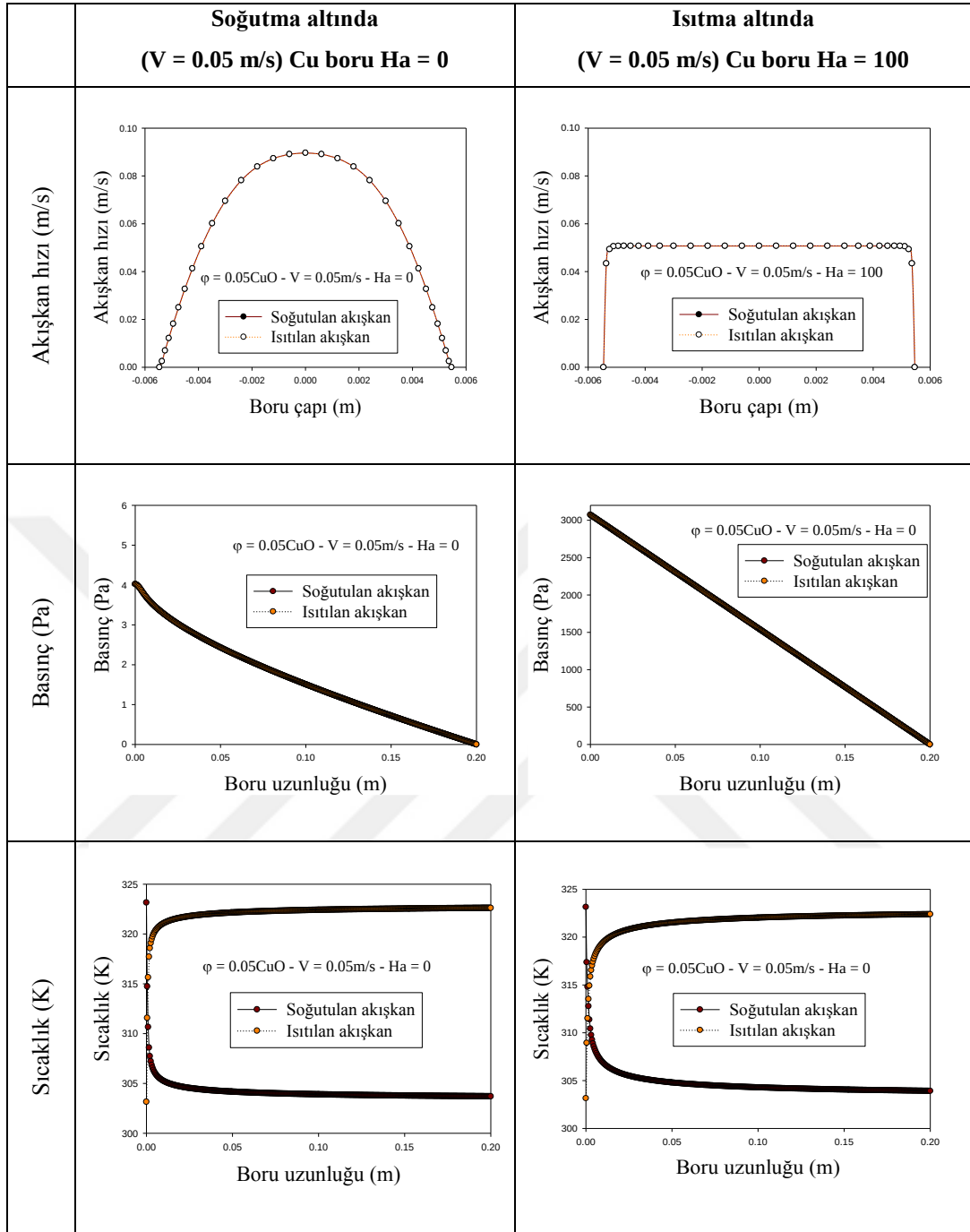
$Re = 1000$ 'de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtma için yerel Nu sayıları Şekil 3.54'de analiz edilmiştir. Bir önceki sıcaklık analizinde (Şekil 3.53) Ha sayısı soğutma için sıcaklığı arttırmışken ısıtma için sıcaklık değerlerini düşürdüğü vurgulanmıştı. Böyle bir sonuç her iki durumda da ısı transferini artırmıştır. Her iki durumda da nano parçacık etkisiyle ısı transferinin arttığı satırların ölçeklerine bakıldığında anlaşılmaktadır. Ancak satırlar arasında yani soğutma ile ısıtma arasında meydana gelen ısı transferi oranı hemen hemen eşit olarak çıkmıştır.



Şekil 3.53. $Re = 1000$ 'de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtmada sıcaklık etkisi ($\Delta T = 20$)



Şekil 3.54. Re = 1000’de CuO – su nano akışkanının soğutma ve ısıtmada sıcaklık etkisi ($\Delta T = 20$)



Şekil 3.55. $V = 0.05\text{m/s}$, bakır boruda ısıtma soğutma etkisi (Sabit hızda ve termo fiziksel özellikler hem soğutma hem de ısıtma için eşit)

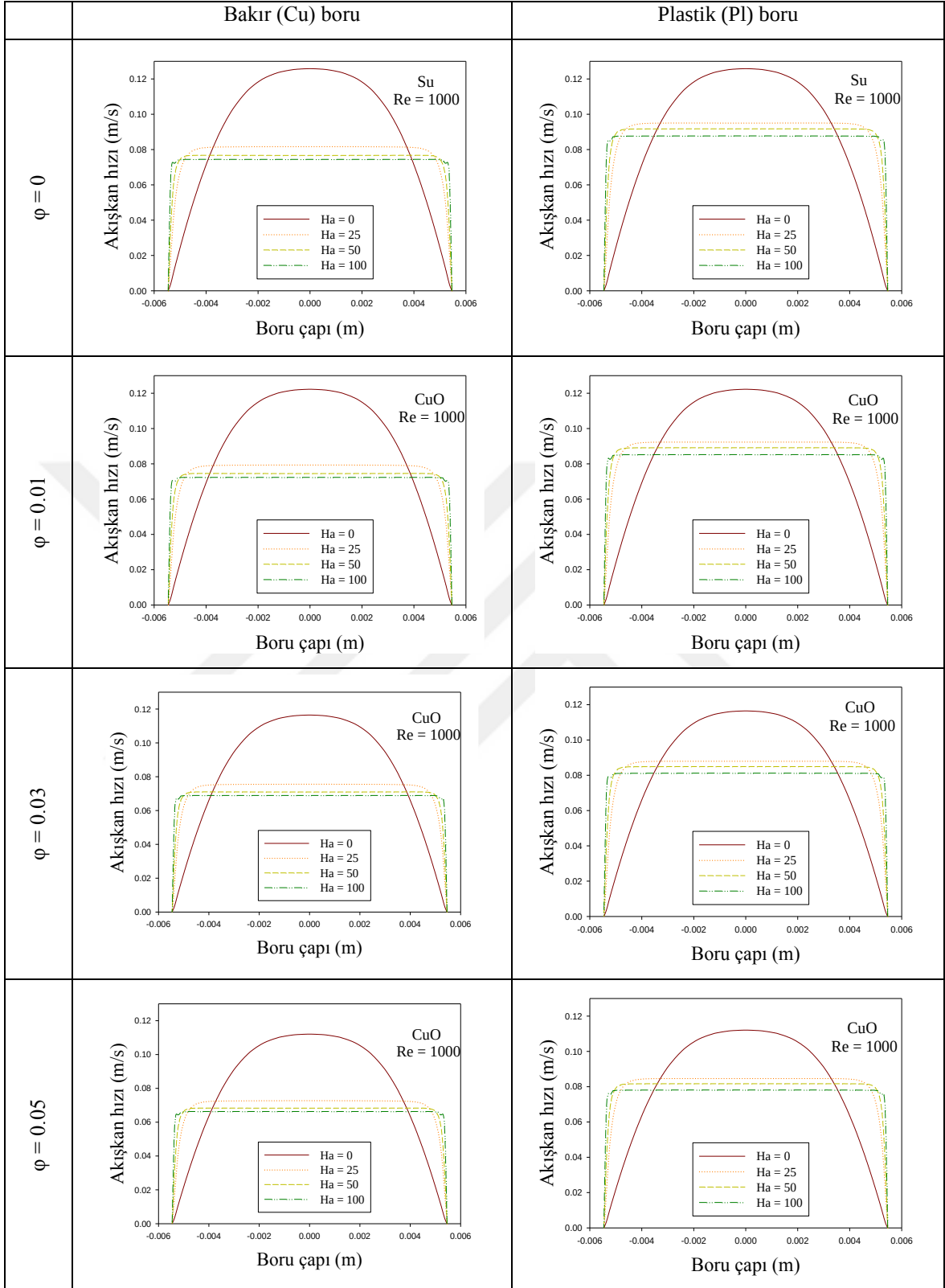
Soğutma ve ısıtma için önceki sonuçları daha iyi anlamak için burada akışkanın termo fiziksel özellikleri ve giriş hızlarının değişmediği varsayılarak hız, basınç ve sıcaklık analizi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 3.55’de grafiksel olarak verilmiştir. Birinci sütun manyetik alanın olmadığı $Ha = 0$ için, ikinci sütunda ise manyetik alanın uygulandığı $Ha = 100$ durumunu temsil etmektedir. Sabit Re sayısında manyetik alanın, ısıtma ve soğutma için akışkanın davranışını ve sıcaklığını değiştirdiği bilinmektedir. Fakat akışkanın termo

fiziksel özellikleri ve kanala giriş hızı sabit tutulduğunda ısıtma ve soğutma için akışkanın davranışında her hangi bir farkın meydana gelmediği tespit edilmiştir.

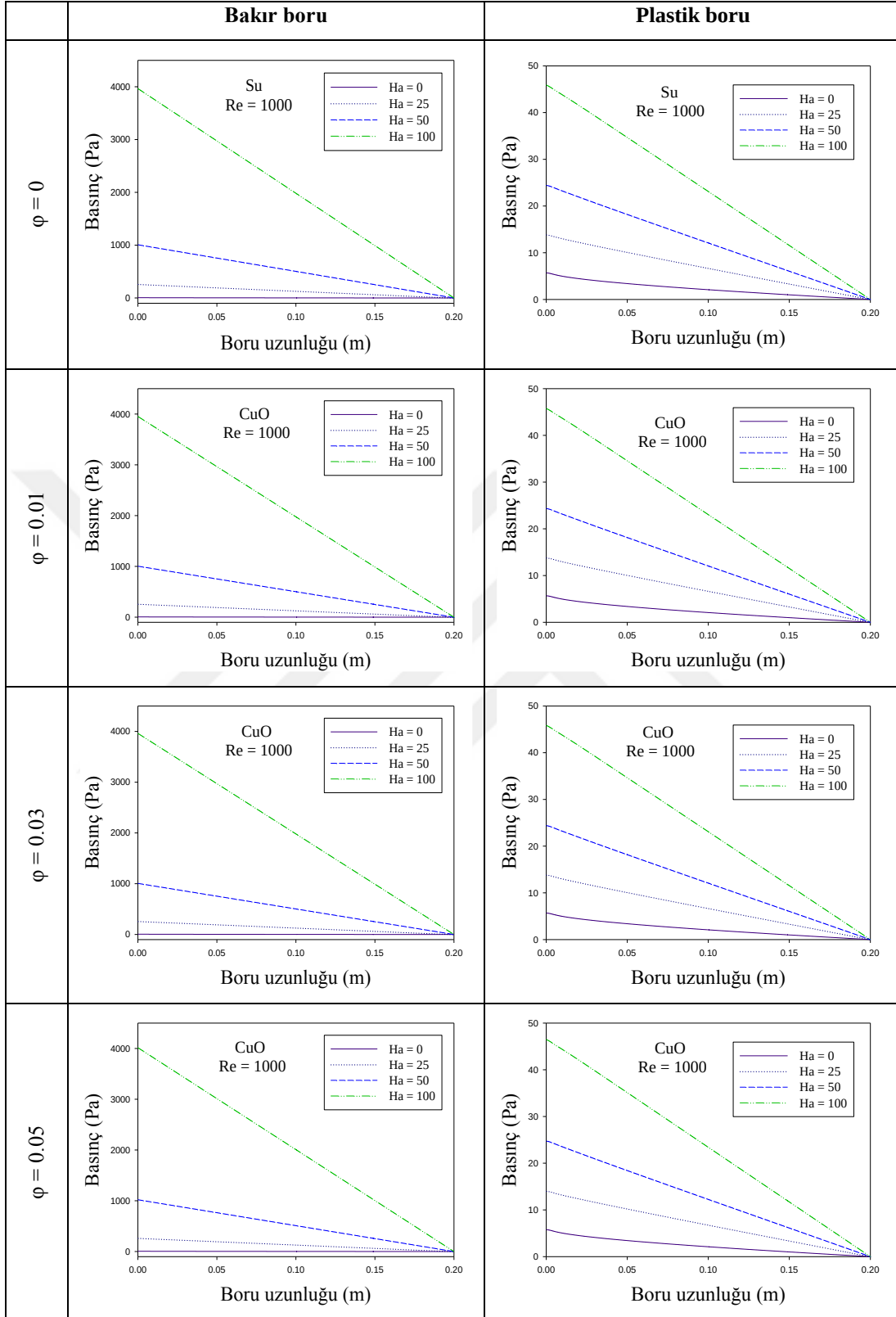
3.9. Kanal Malzeme Yapısının Nano Akış Üzerindeki Etkisi

Çalışmanın bu kısmında sabit özelliklere sahip akışkan, hem bakır (Cu) hem de plastik (PI) malzemen oluşan boru için sayısal olarak analizler gerçekleştirilmiştir. Her iki malzemede de boru içi akışkanın ısıtılması yoluyla analiz gerçekleştirilmiştir. Kanalin yapılan malzemesinin akış üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Farklı boru malzemesi için CuO – su nano akışkanının hız değişimleri Şekil 3.56’da verilmiştir. Analiz $Re = 1000$ için yapılmıştır. Birinci sütunda Cu ve ikinci sütunda PI malzemeden yapılan boru için elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Önceki çalışmalarda olduğu gibi burada tekrar her bir sonuç farklı Ha sayısı için gerçekleştirilmiştir. Manyetik alanın olmadığı $Ha = 0$ durumu için tüm nano hacimsel oranları için akışkan hızında her hangi bir değişikliğe yol açmamıştır. Ancak manyetik alan kuvveti uygulandığında boru malzemesinin önemli bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. Her iki malzemede (Cu ve PI) nano parçacık artırımı hızlarda düşmeye neden olmuştur. Malzemesi Cu olan sonuçlardan elde edilen boru çapı hız değerlerinin plastik malzemeye göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni bakırın elektrik iletim katsayısının plastikten çok daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sayede bakır manyetik alan ile çok daha fazla etkileşime girmiş ve bunun sonucunda manyetik alan kuvveti, Lorentz kuvvetinin geciktirici etkisiyle akışkan hızını daha fazla engellemiştir. Daha önceki sonuçlara benzer olarak burada yine her bir grafikte manyetik alan şiddeti ile hızlarda meydana gelen düşme daha azdır. Aynı şekilde nano parçacıkların da akışkan hızını düşürdüğü, Şeklin yukarisından aşağısına bakıldığında anlaşılmaktadır. Çalışmanın bu kısmında gözlemlenen ilginç sonuçlardan bir tanesi de manyetik alan altında bakır boruda iterasyon bakımından çözüme çok daha hızlı bir sürede ulaşılmasıdır. Bunun da bakırın manyetik alan ile çok daha hızlı bir şekilde etkileşime girdiğinden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.56. Farklı boru malzemesi için CuO – su nano akışkanının hız değişimleri ($Re = 1000$)

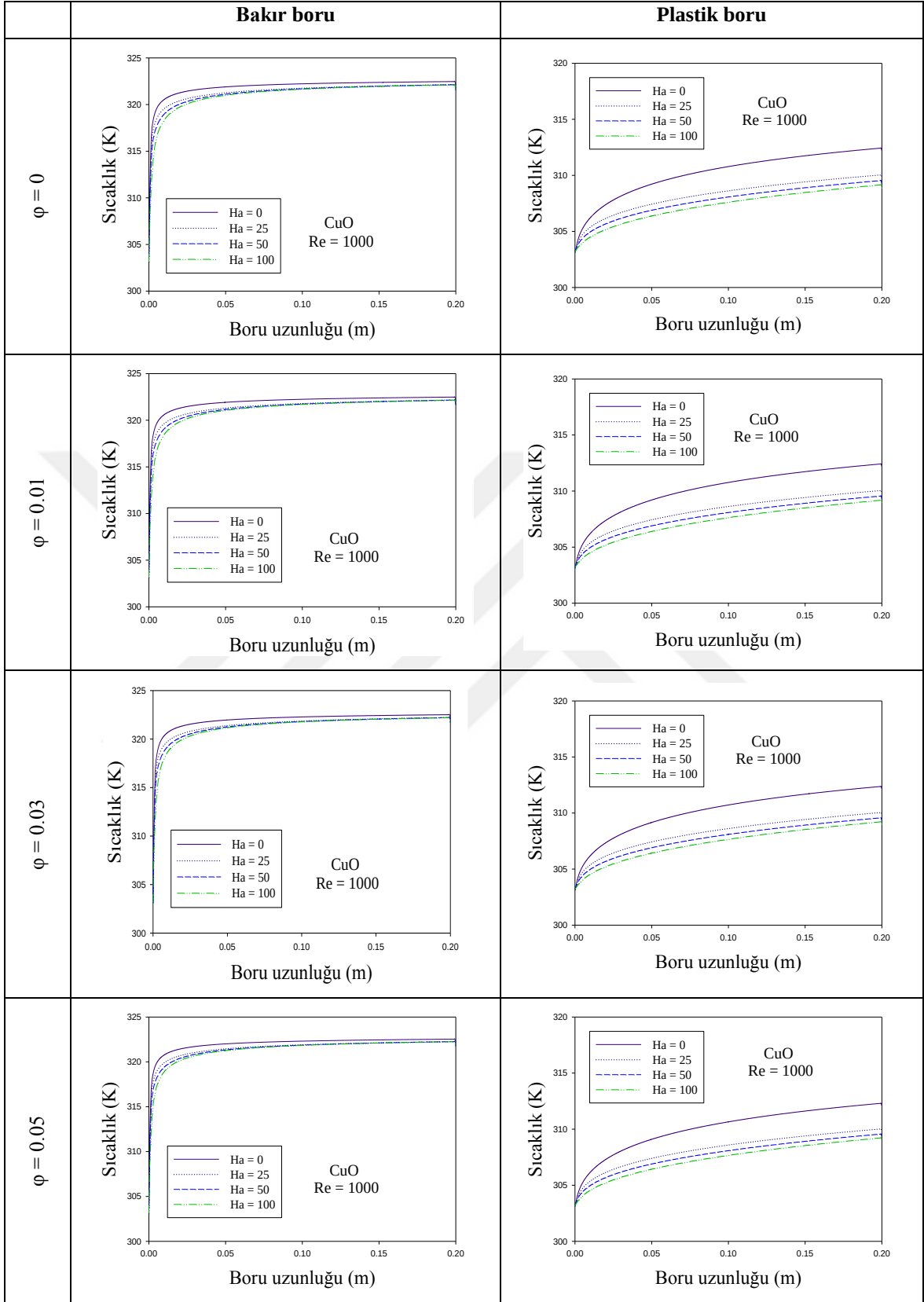


Şekil 3.57. Farklı boru malzemesi için CuO – su nano akışkanının basınç değişimleri (Re = 1000)

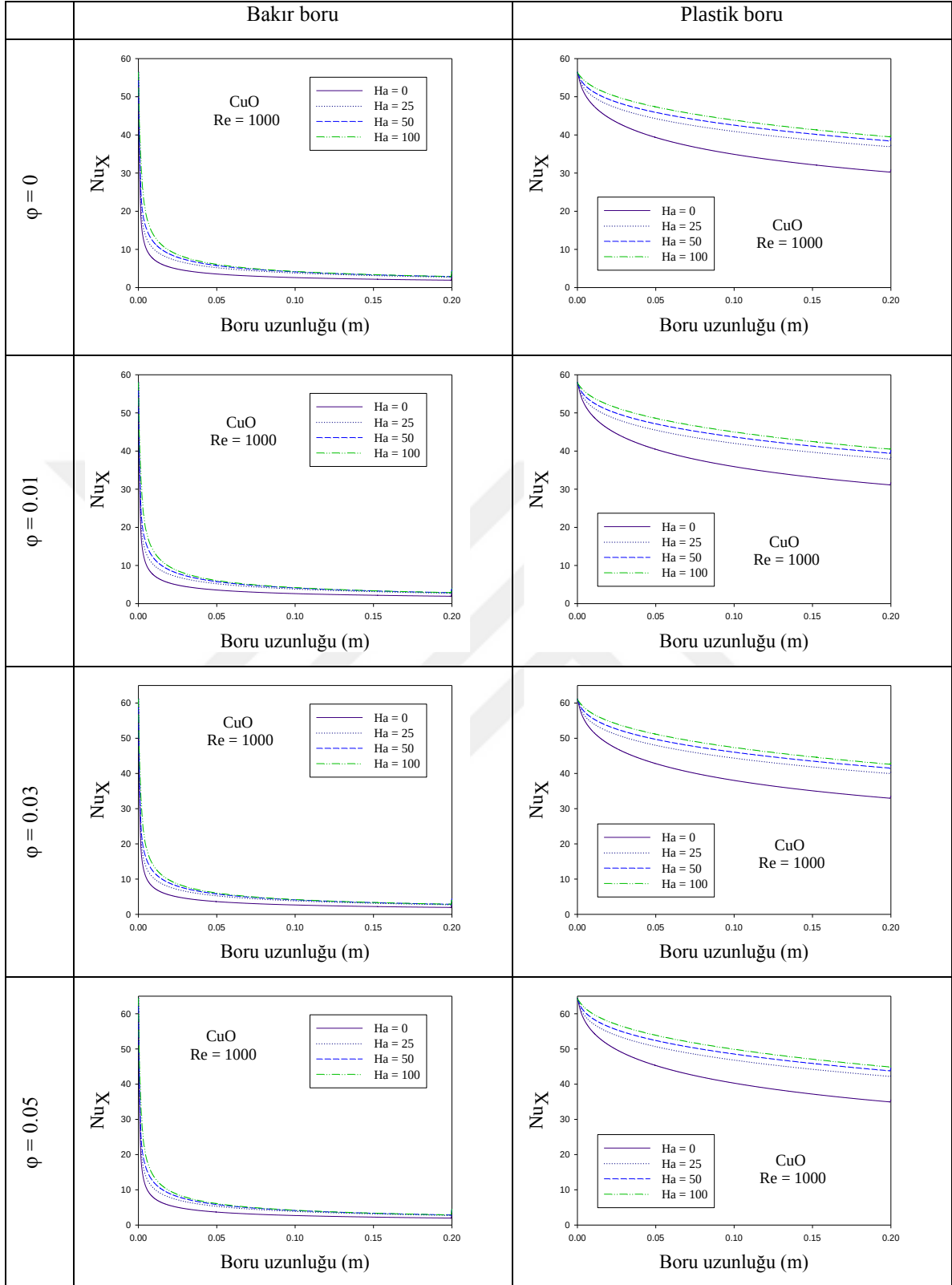
Farklı nano hacimsel oranları ve manyetik alan kuvvetlerinde bakır ve plastik boru için elde edilen basınç düşümleri Şekil 3.57’de sunulmuştur. Hem saf akışkan hem de nano parçacık katkısı olan akışkan için kanal uzunluğunun merkezi boyunca elde edilen basınç grafikleri irdelenmiştir. Buradaki bütün parametrelerde önceki sonuçlara benzer olarak manyetik alan kuvveti çok ciddi bir basınç artışına neden olmuştur. Fakat bakır borudan elde edilen basınç değerleri plastik borudan elde edilen basınç değerlerine göre çok daha büyük olmuştur. Bakır malzemenin elektrik iletkenliğinin çok yüksek olması, manyetik alan kuvvetinin akışkana çok büyük bir baskı yapmasına neden olmuştur. Ayrıca, nano parçacık etkisiyle meydana gelen basınç farkları birbirine göre ihmal edecek kadar az değişmiştir.

Şekil 3.58, bakır ve plastik gibi farklı iki malzemeden yapılan boru içinde akan CuO – su nano akışkanın sıcaklık değişimlerinin analizini içermektedir. Birinci sütunda bakır, ikinci sütunda plastik boru ile ilgili elde edilen sıcaklık verileri sunulmuştur. Bu her iki malzemede de ısıtılan akışkanın sıcaklığı manyetik alan kuvveti ile düşmüştür. Birinci sütunda yani bakır borudan elde edilen sıcaklık değerlerinin ani bir şekilde yükseldiği ve kısa mesafeden sonra sürekli rejime ulaştığı tespit edilmiştir. Plastik boruda ise akışkanın kanalın sonuna kadar sürekli olarak yükseldiği ve sürekli rejime ulaşmadığı görülmektedir. Bu, bakır borunun ısı iletkenlik katsayısının plastik borunun ısı iletkenlik değerinden çok daha büyük olmasındandır ($k_{Cu} \gg k_{Pl}$). Bu nedenle boru çok daha hızlı bir şekilde ısınmış buda akışkanın ani ısınmasına neden olmuştur.

Bakır ve plastik borunun içinden geçen nano akışkanın boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayılarını gösteren sonuçlar Şekil 3.59’da verilmiştir. Her iki borudaki (Cu ve Pl), grafiklerde manyetik alan kuvvetinin etkisiyle yerel Nu sayısının arttığı görülmektedir. Bu artış plastik boru için boru uzunluğu boyunca tüm manyetik alan şiddetlerinde bir birinden farklı iken, bakır boruda kanalın yarısından itibaren bu değerlerin yaklaşık olarak birbirine eşitlendiği belirlenmiştir. Sıcaklık sonuçlarına benzer olarak yerel Nu değerleri bakır boruda ani düşmüşken, plastik boruda daha yavaş bir şekilde düşmüştür. Bu durum önce telaffuz edildiği gibi bakır borunun çok daha hızlı bir şekilde ısındığından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.58. Farklı boru malzemesi için CuO – su nano akışkanının sıcaklık değişimleri ($Re = 1000$)

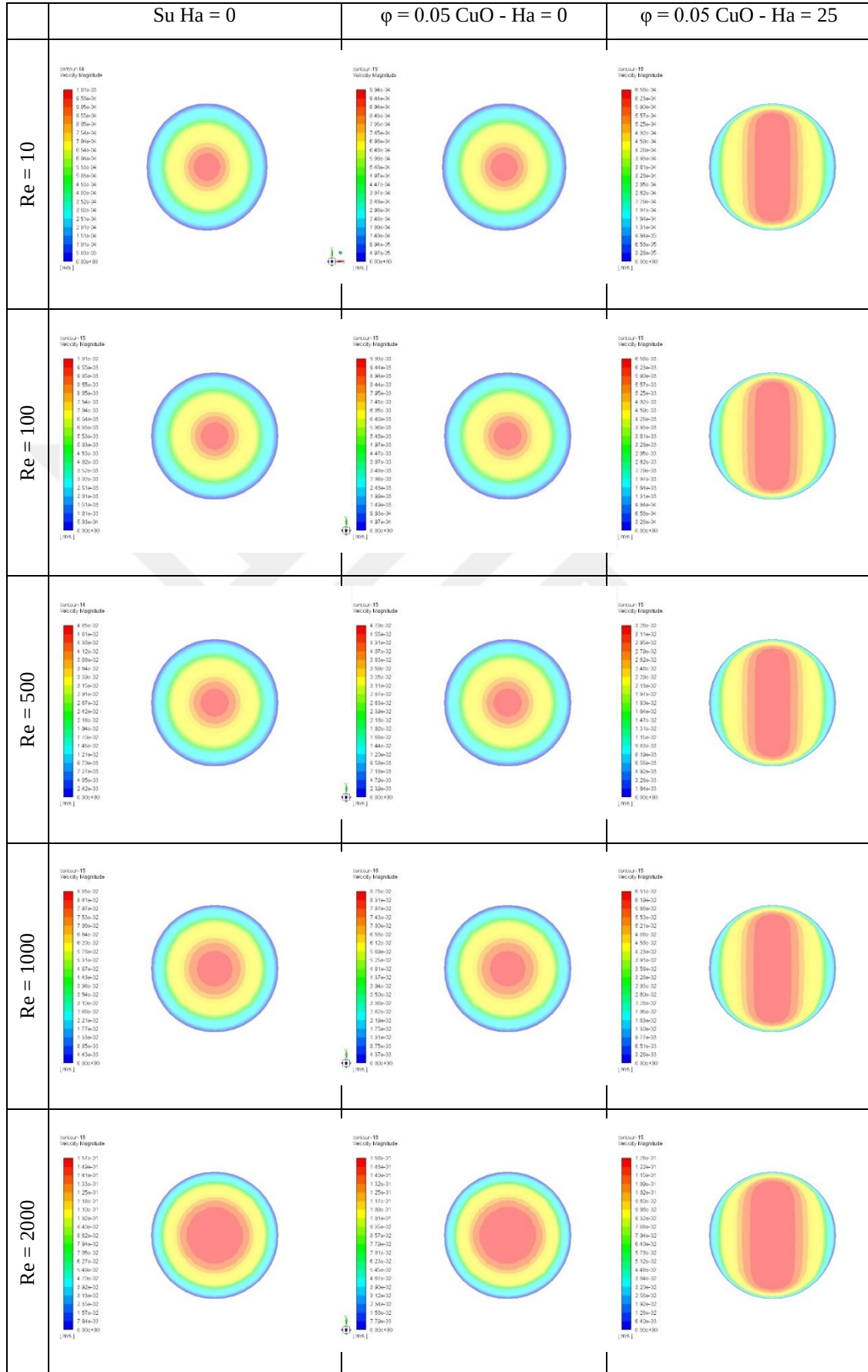


Şekil 3.59. Farklı boru malzemesi için CuO – su nano akışkanının yerel Nu değişimleri (Re = 1000)

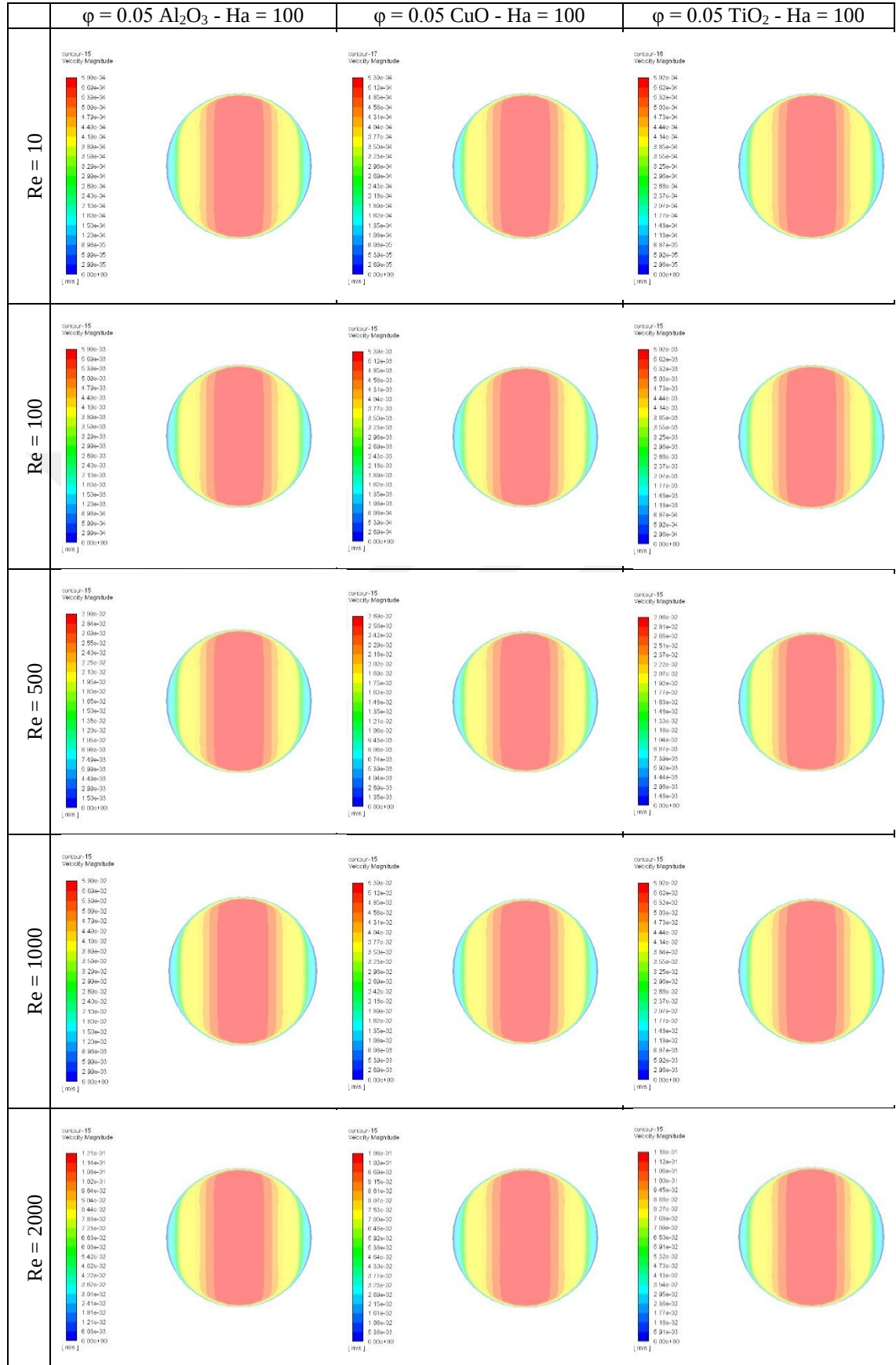
3.10. Akışkanın Hız ve Sıcaklık Konturları

Kanalın çıkışından girişine doğru 20 mm mesafedeki boru çapında hız ve sıcaklık konturları bu bölümde araştırılmıştır.

Şekil 3.60'ta, CuO – su nano akışkanının boru çapı hız konturları verilmiştir. Birinci ve ikinci sütunda manyetik alan etkisi yok iken, ilk sütun saf suyu ikinci sütun %5 nano parçacık katılmış nano akışkan bulunmaktadır. Sağdaki son sütunda ise yine içinde %5 nano akışkan hacimsel oranında fakat manyetik alan kuvveti uygulanmış akışkanı göstermektedir. Buradaki (Şekil 3.60) her bir satır ise sırasıyla yukarıdan aşağıya doğru $Re = 10, 100, 500, 1000, 2000$ 'i göstermektedir. Manyetik alan olmayan konturlarda akış profili aynı gözükmemekte iken manyetik alan altında olan kısımda akış şeklinin neredeyse tamamen değiştiği açıkça görülmektedir. Görüntüler arasında özellikle MHD'siz konturlarda meydana gelen farkı Şekil ölçeklerine (Şekil 3.60) bakılınca anlaşılmaktadır. Birinci sütunda $Re = 10$ için hız değeri $1.02e-3$ m/s, $Re = 100$ için hız değeri $1.02e-2$ m/s, $Re = 500$ için bu değer $4.85e-02$ m/s, $Re = 1000$ için $8.85e-02$ m/s ve $Re = 2000$ için $1.57e-01$ m/s olduğu görülmüştür. Bu değerler ikinci sütunda nano parçacık katkısı ve üçüncü sütunda özellikle manyetik etkiden dolayı azalmıştır. $Re = 10$ için birinci satırda su için bu değer $1.02e-3$ m/s iken, ikinci sütunda nano etkisiyle $9.94e-04$ m/s, aynı satırın üçüncü sütununda ise $6.55e-04$ m/s olmuştur. Burada nano parçacık ve manyetik alanın etkisiyle hızlarda düşüş meydana geldiği konturlar üzerinde de gözlemlenmiştir.



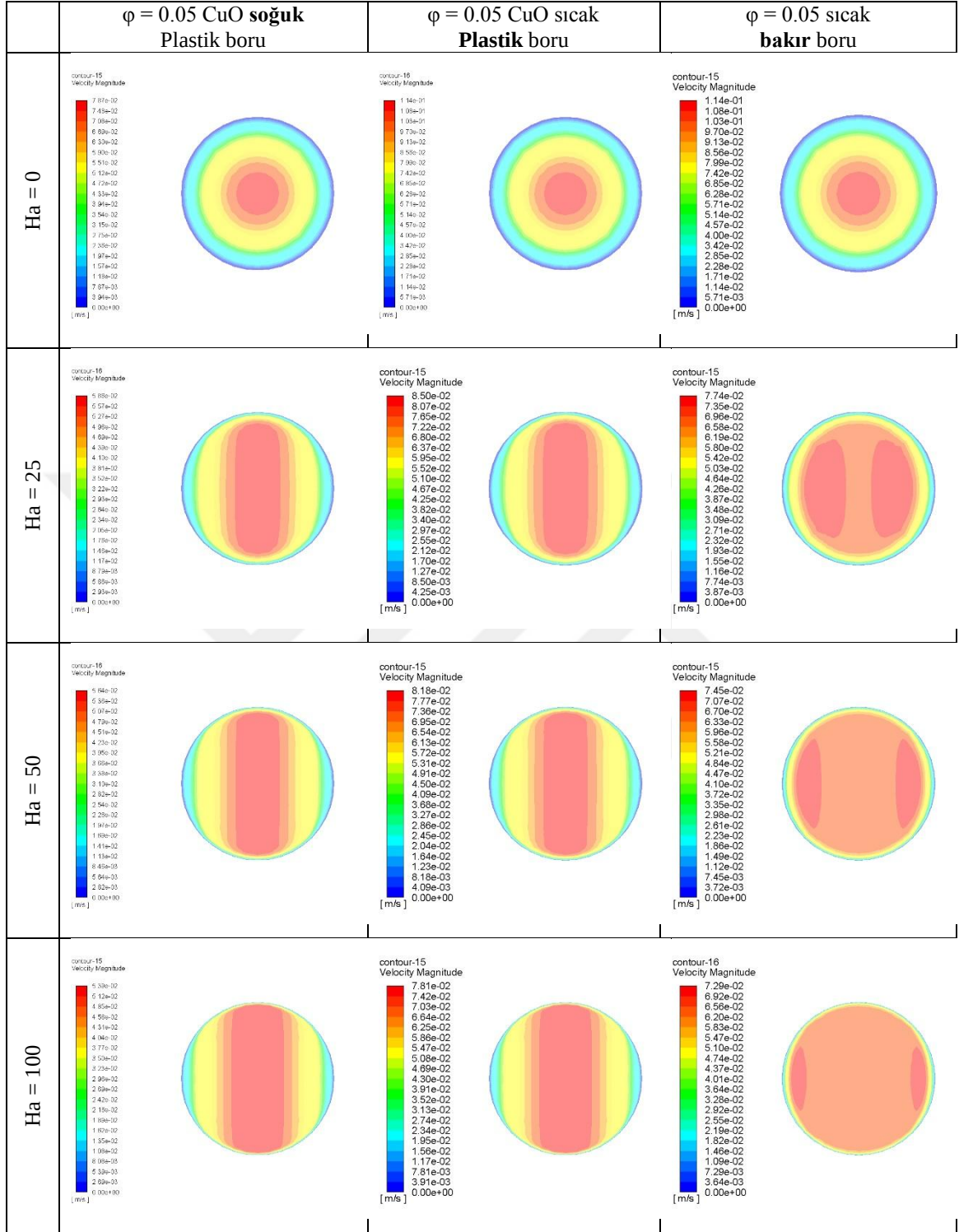
Şekil 3.60. CuO için farklı Re sayılarında nano parçacık ve manyetik alan etkisi (Hız konturları)



Şekil 3.61. Farklı nano parçacık tipleri için farklı Re sayılarında nano parçacık ve manyetik alan etkisi (Hız konturları)

Farklı nano parçacık tiplerinin bazı Re sayıları ile nano parçacık ve manyetik alan etkilerini gösteren hız konturları Şekil 3.61’de gösterilmiştir. Bütün sonuçlar manyetik alan altında ($Ha = 100$) ve $\phi = 0.05$ ’lik nano hacimsel oranına sahiptir. Birinci sütun Al_2O_3 , ikincisi CuO ve üçüncüsü TiO_2 – su nano akışkanını, her bir satır ise sırasıyla $Re = 10, 100, 500, 1000$ ve 2000 ’i göstermektedir. Şekil ölçekleri (Şekil 3.61) incelendiğinde bütün ölçek üst değerlerinin birbirinden farklı olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin $Re = 2000$ değeri için Al_2O_3 için hız değeri $1.21e-01$ iken, CuO için $1.08e-01$ ve TiO_2 için $1.18e-01$ m/s değerlerini almıştır. Bu şekilde tüm konturlarda en az hız düşüşü Al_2O_3 ’de olmuşken, en fazla düşüş nano akışkan hız sonuç eğrilerinde olduğu gibi CuO için olduğu görülmektedir. Yani hızlar arasında $V_{CuO} < V_{TiO_2} < V_{Al_2O_3}$ bağıntısı vardır. Burada yine beklenildiği gibi Re sayısı ile orantılı olarak akışkan hız değerleri artmıştır.

Boru ve plastik malzemeden oluşan ve hem ısıtma hem de soğutma çalışma şartlarında altında olan boruda, içinden $\phi = 0.05$ CuO olan nano akışkanına ait hız konturları Şekil 3.62’de verilmiştir. Konturlar $Re = 1000$ ’de ve ΔT sıcaklık farkı $20^\circ C$ ($T_i = 30$ iken $T_w = 50$, $T_i = 50$ iken $T_w = 30$) alınmıştır. Birinci sütun plastik soğuk cidar sıcaklığı, ikinci sütunda sıcak plastik boru ve üçüncü satır (sağda) sıcak bakır boruya ait konturlar sunulmuştur. Plastik boru hem ısıtma hem de soğutma olduğu zaman manyetik alanın uygulanmadığı durumda iç tarafta meydana gelen girdap yuvarlakken, manyetik alan ile beraber bir dikdörtgene benzer bir hal almıştır. Ancak ısıtma altında yani sıcak olan bakır boruda manyetik alan varlığında akış alanının girdap sayısı ikiye çıkmış ve manyetik alan şiddetinin artmasıyla orantılı olarak girdapların alanı küçülmüştür. Manyetik alan etkisi yok iken en düşük hız soğuk plastik boruda meydana gelmişken sıcak plastik ve bakır boruda bu değer değişmemiştir. $Ha = 25$ ’te yine en düşük hız soğuk plastik için elde edilmişken sonra sıcak bakır boru ve daha sonra da sıcak plastik boru için elde edilmiştir. Bu değerlerin büyüklükleri $Ha = 50$ ve 100 içinde aynı sırayı izlemiştir. MHD’siz durumda sonuç eğrilerinde daha önce defa telaffuz edildiği gibi akışkanın termo fiziksel özellikleri ile ilgilidir. Soğutma altında akışkan daha sıcak olduğundan dinamik viskozitesi de o oranda düşük olmuş ve dolayısıyla akışkan giriş hızı düşmüştür. Ancak manyetik alan altında daha farklı olması termo fiziksel özelliklerinin yanında malzemenin elektriksel iletkenliği (Siemens/m veya $1/ohm\cdot m$) ile de alakalıdır. Elektrik iletkenliği daha yüksek olan boruda (Cu) manyetik alan akışkan üzerinde daha baskın bir rol oynamıştır.

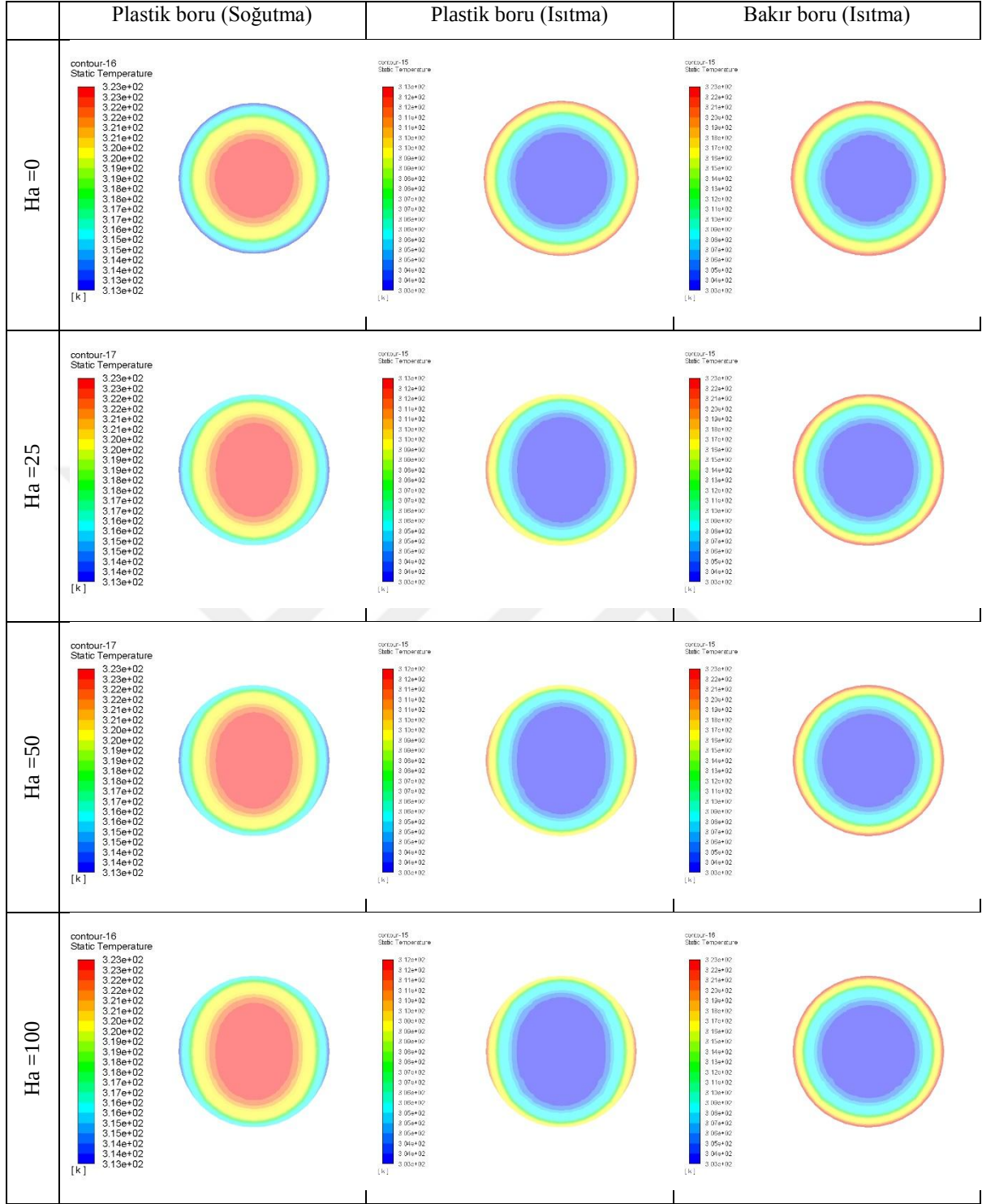


Şekil 3.62. Farklı malzeme ve sıcaklıktaki boruda değişik Ha sayılarında hız konturlarının karşılaştırılması ($\phi = 0.05$ CuO - $Re = 1000$)

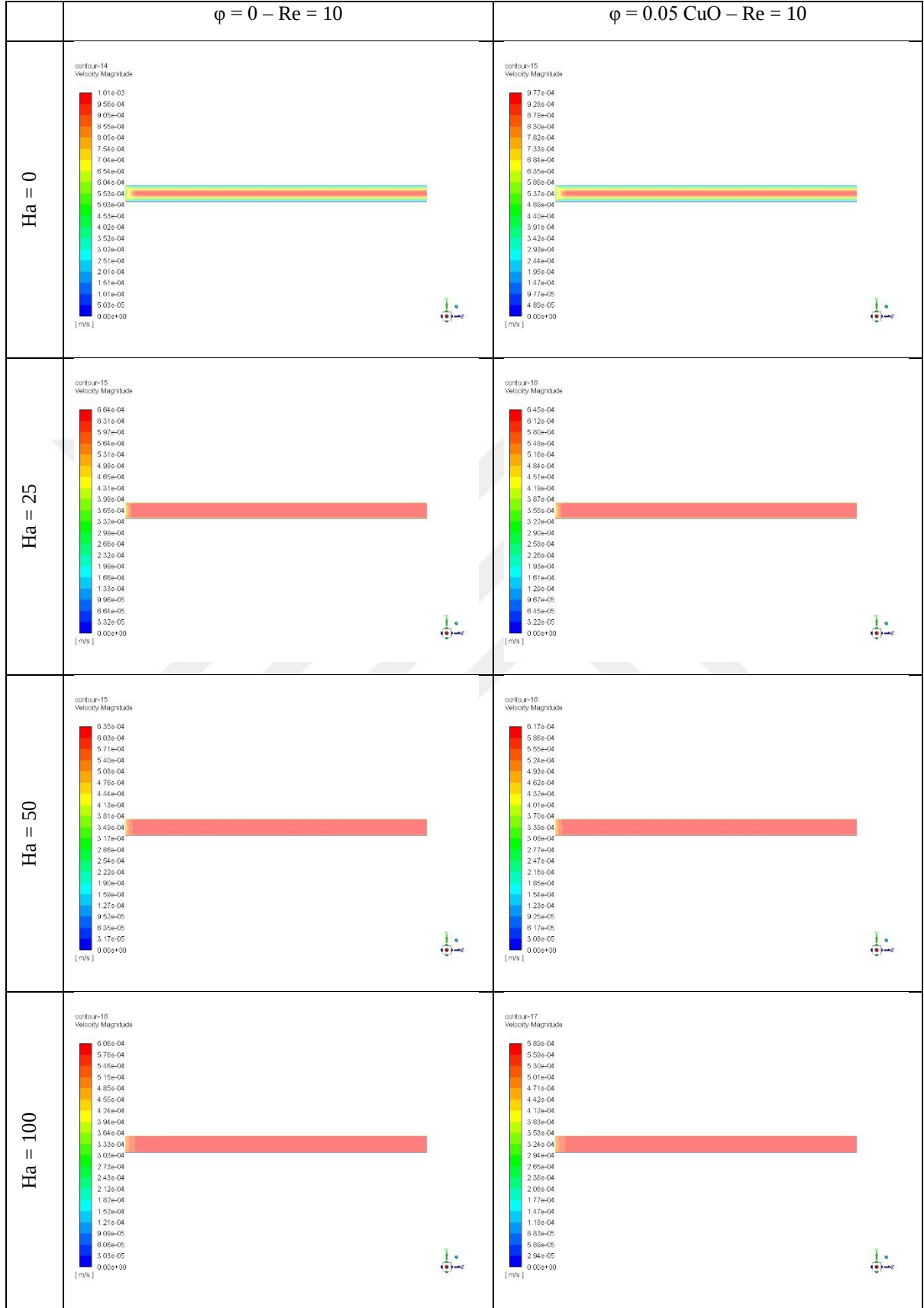
3.11. Kanal Malzeme Yapısının Sıcaklık Konturları Değişimleri

Bu kısımda, ısıtma ve soğutma şartlarında plastik ve bakır borunun içinden geçen nano akışkanına ait çap sıcaklık konturları irdelenmiştir. Birinci sütunda sıcak akışkanın plastik borunun içinde soğutulması, ikinci sütunda yine plastik boruda ama ısınan soğuk akışkan ve sağdaki son sütunda bakır borunun içinde ısınan soğuk akışkan mevcuttur. En yüksek boru veya akışkan sıcaklığı 323 K iken en düşük akışkan veya boru sıcaklığı 303K olarak konturlar alınmıştır.

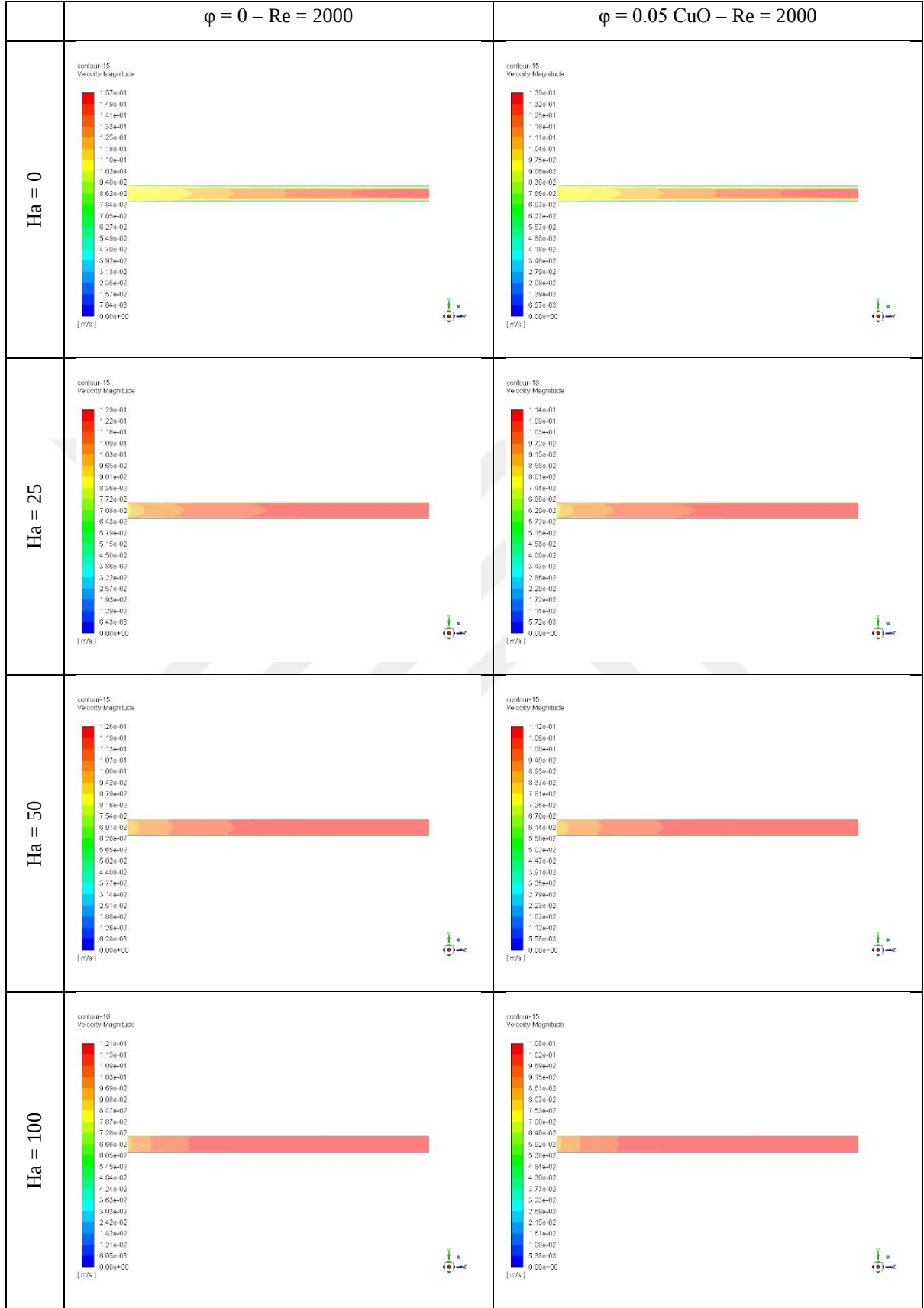
Farklı boru malzemesi ile ısıtma ve soğutma altındaki nano akışkanın sıcaklık konturlarının değişimi Şekil 3.63'te verilmiştir. Akışkan veya borunun en soğuk yerleri mavi, en sıcak yerleri ise kırmızı rengini göstermektedir. $Ha = 0$ olduğu durumda tüm sonuçlarda konturların içinde meydana gelen sıcaklık dağılımları dairesel bir hal almıştır. Hem ısıtma hem de soğutma altında olan plastik boruda içteki dairesel alan (ısınan plastik boru) Ha sayısı ile orantılı olarak biraz elips şeklini almıştır. Ancak bakır boruda manyetik alan akış alanı şeklini değiştirmemiştir. İkinci ve üçüncü sütundaki plastik boru ile bakır boruya bakıldığında ise bakır borunun çok daha fazla ısındığı belirlenmiştir. Akış alanındaki sıcaklık maksimum 312 K – 313 K arasında iken bakır boruda bu değer 323 K'e ulaşmıştır. Ayrıca bakır borudaki boru kenarı sıcaklık tabakasının daha kalın olduğu net şekilde görülmektedir.



Şekil 3.63. Farklı boru malzemesi ile ısıtma ve soğutma altındaki akışkanın sıcaklık konturlarının değişimi



Şekil 3.64. Saf su ve nano akışkanda Ha sayısının etkisinin kıyaslanması ($\text{Re} = 10$)



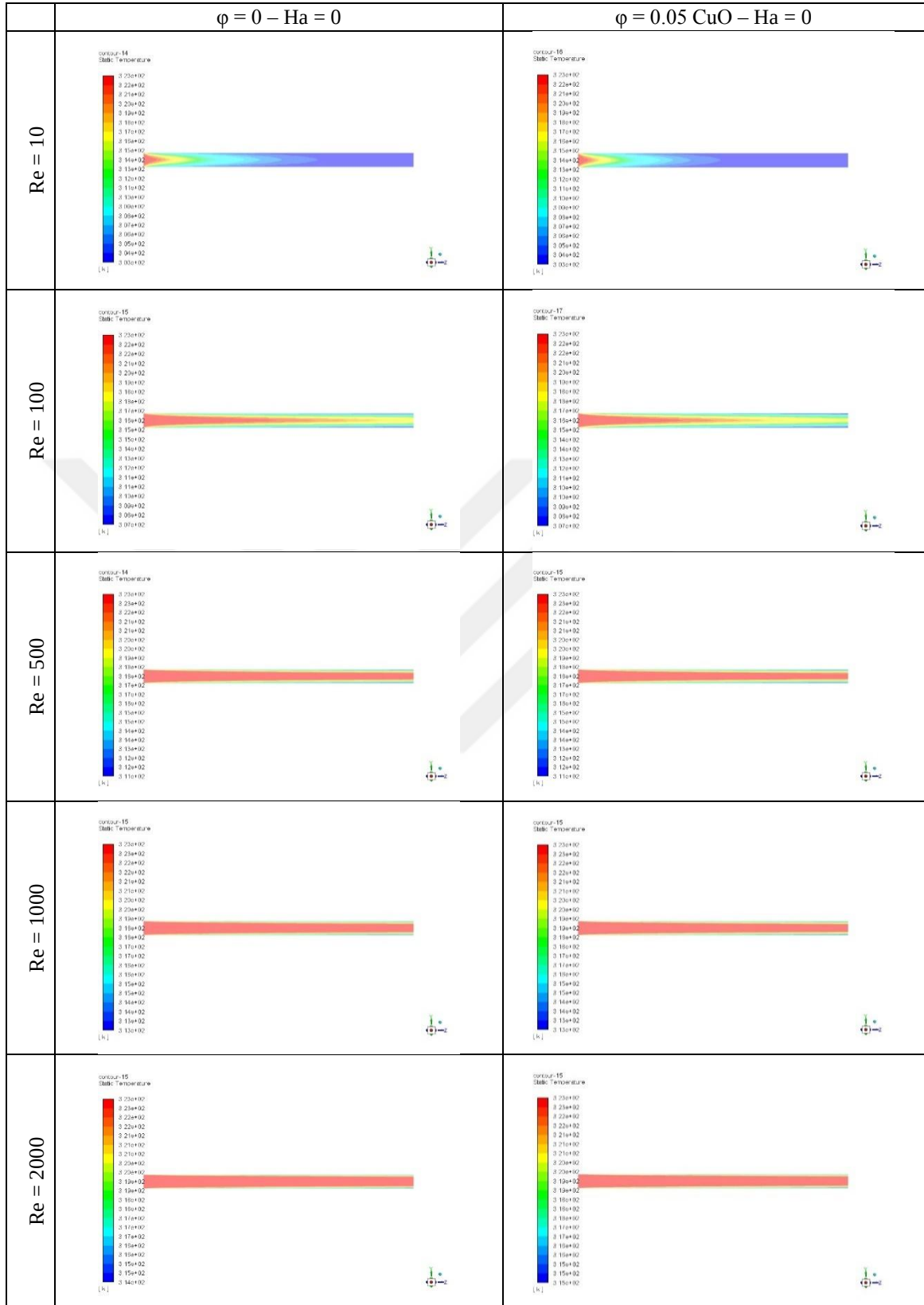
Şekil 3.65. Saf su ve nano akışkanda Ha sayısının etkisinin kıyaslanması ($\text{Re} = 2000$)

Şekil 3.64 ve Şekil 3.65’de saf su (birinci sütun) ve %5’lik nano akışkan hacimsel oranında ve farklı Ha sayılarında, kanal uzunluğu boyunca iki boyutlu bir düzlemde hız dağılımları gösterilmiştir. Birinci sütunlar nano parçacık katkısı olmayan saf suyu, ikinci sütunda %5 CuO katkısıyla oluşan nano akışkanın hız konturlarını göstermektedir. Şekil 3.64, $Re = 10$ ve Şekil 3.65, $Re = 2000$ ’de analizler gerçekleştirilmiştir. $Re = 10$ ’da görüntü olarak çok bir fark gözükmemekte iken $Re = 2000$ ’de Ha etkisiyle görüntüler daha fazla bir değişim meydana gelmiştir. Saf su ve nano akışkan arasında da görüntü olarak fazla bir fark belirlenememiştir. Ancak en belirgin fark Şekillerin (Şekil 3.64-3.65) her birinin yanındaki ölçeklere bakıldığında görülebilmektedir. Burada hem nano hem de manyetik alanın etkisiyle hızlarda düşüşler meydana gelmiştir. Saf su için $Re = 10$ ’da $Ha = 0$ ’dan $Ha = 100$ ’e kadar akışkan hızı $1.01e-03$ m/s’den $6.06e-04$ ’e kadar düşmüştür. Aynı Şekilde saf akışkanın $Re = 2000$ değerinde $Ha = 0$ ’dan $Ha = 100$ ’e kadar akışkan hızı $1.57e-01$ m/s’den $1.12e-01$ m/s’ye kadar azalmıştır. Aynı şekilde nano akışkan olan kısımda da benzer şekilde hızlarda azalma meydana gelmiştir.

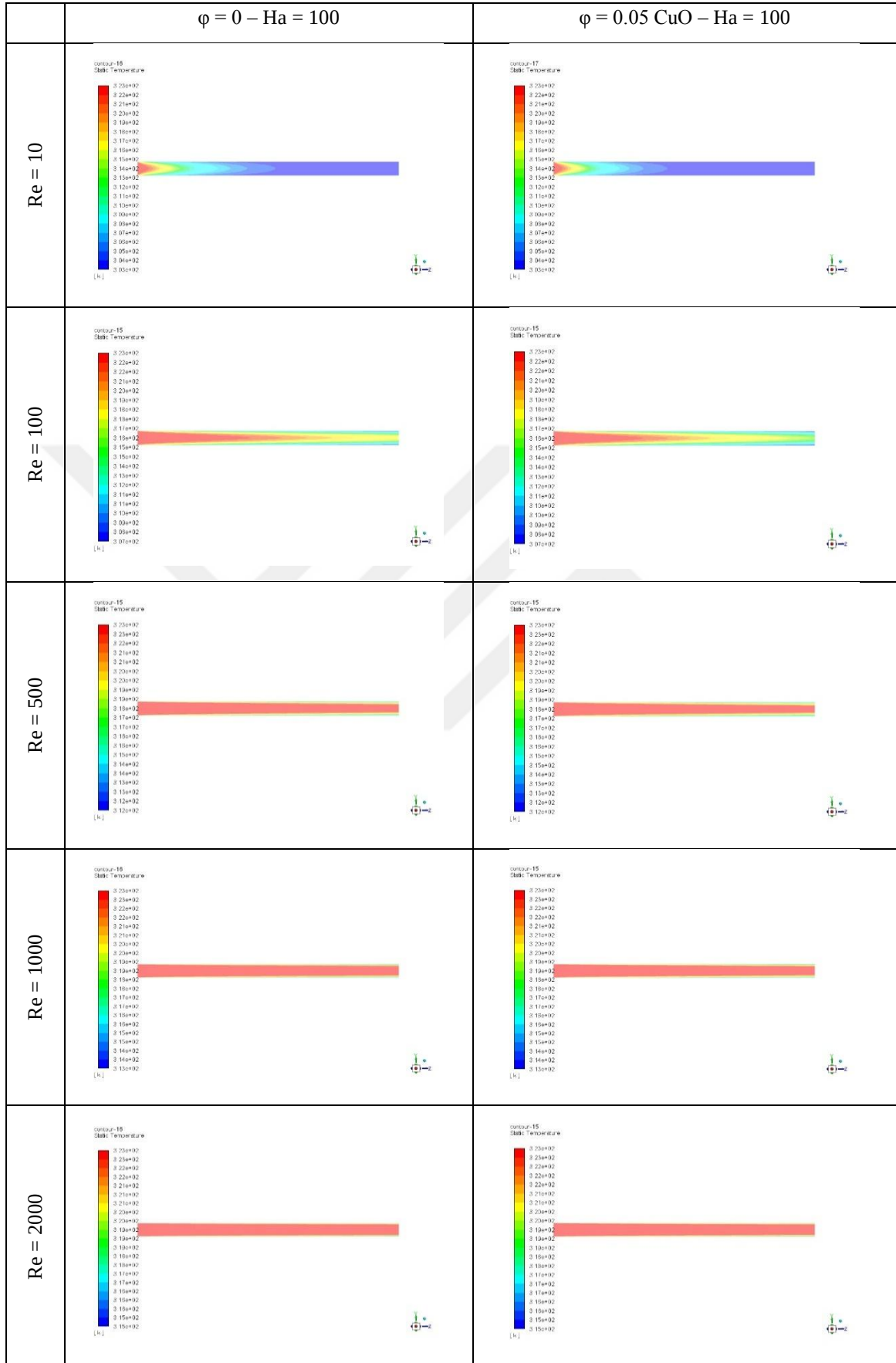
3.12. Boyuna Sıcaklık Konturları Üzerinde Re Etkisi

Çalışmanın bu bölümünde soğutma şartları altında farklı Re sayılarında akış alanındaki sıcaklık etkisinin konturları tartışılmıştır. Sütunlar nano katılmış ile katılmamış akışı temsil etmektedir.

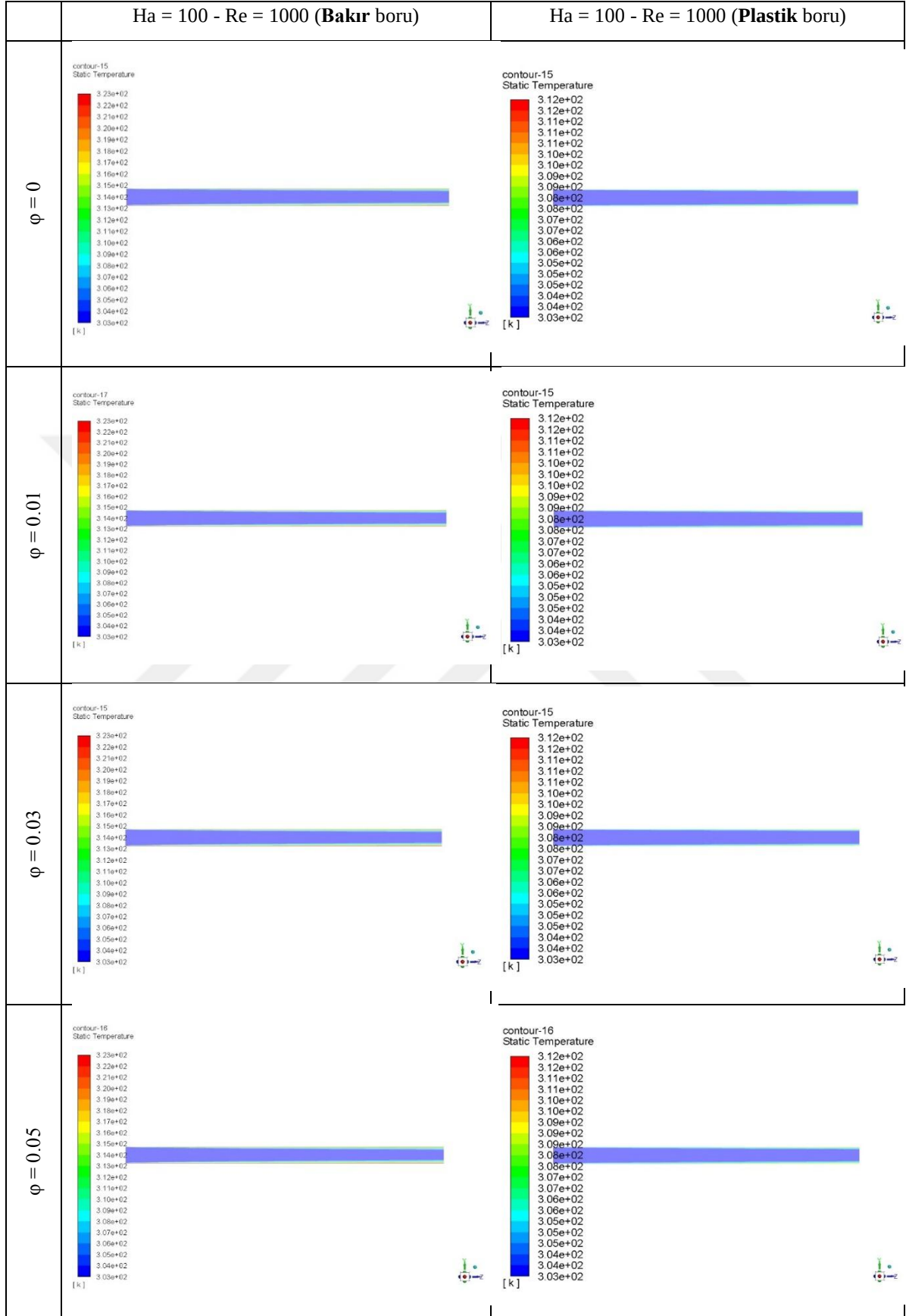
Manyetik alan varlığı olmaksızın beş farklı Re sayısı ve saf akışkan ile nano akışkan arasında farka ait sıcaklık konturları Şekil 3.66’da ve aynı şartlarda manyetik alan şiddetine maruz akışkan ise Şekil 3.67’de sunulmuştur. Re sayısı arttıkça taşınan sıcak akışkanın artışı anlaşılmaktadır. $Re = 10$, 100 ve 500 arasındaki fark çok barizken $Re = 500$, 1000 ve 2000 arasındaki fark daha az vuku bulmuştur. Re sayısının artışına bağlı olarak sıcak akışkan alanı artmış ve soğuk tabaka ters orantılı olarak incelmıştır. Soldaki ilk sütunda ise saf akışkan var iken sağdaki %5 nano parçacık katılmış nano akış mevcuttur. Nano parçacık eklenmiş soğutma altındaki akışkanda soğuk akış bölgesinin daha büyük (mavi renkli bölge) olduğu özellikle $Re = 10$ ve 100’de görülmektedir. 100 Ha’lık manyetik alana maruz bırakılan akışkandaki konturlar genel olarak manyetik alan olmayan konturlara benzer bir eğilim göstermiştir. Nano eklenmesi de manyetik alanın olmadığı duruma benzer olmuştur.



Şekil 3.66. Farkı Re sayıları ve nano hacimsel oranında boyuna sıcaklık konturları ($Ha = 0$)



Şekil 3.67. Farkı Re sayıları ve nano hacimsel oranında boyuna sıcaklık konturları ($Ha = 100$)



Şekil 3.68. CuO – su nano akışkanının bakır ve plastik boru arasındaki sıcaklık konturları (Re = 1000) ısıtma altında

Bakır ve plastik boruda ısınan akışkanlar ($T_w > T_i$) arasında farka ait konturlar Şekil 3.68’de gösterilmiştir. Sayfanın ilk sütununda bakır ikinci sütununa (sağda) plastik boru içindeki sıcak alan konturları konulmuştur. Buradaki sonuçlar hem saf akışkan hem de nano akışkanın farklı hacimsel oranları için elde edilmiştir. Sonuçlar (Şekil 3.68) incelendiğinde bakır borunun termal iletkenliği plastik boruya göre çok daha fazla olduğundan bakır boruda duvara yakın sıcak alanın (kırmızı renk) daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum hem nano katkılı hem de nano katkısız akışkan için olmuştur.



4. SONUÇLAR

Bu çalışma, silindirik bir kanal içerisinde birbirinden farklı nano akışkanların akış karakteristikleri ve ısı transferi olayını, deneysel ve sayısal çalışma sonucundan elde edilen verilerin analizini kapsamaktadır. Çalışmada, önce mevcut çalışmanın literatür doğrulaması, sonra deneysel ve sayısal çalışmanın kıyaslanması ve en son olarak kapsamlı sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal karşılaştırma $B = 0, 0.1, 0.2$ ve $0.3T$ dış manyetik alan kuvveti ve $\phi = 0.02$ (%2) nano parçacık içeren Fe_3O_4 – su nano akışkanı için hız ve basınç eğrileri çizilerek karşılaştırılmıştır. Literatür doğrulaması da üç boyutlu silindirik bir boruda lityum sıvısı için gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın geriye kalan bölümünde analizlerin tümü sayısal olarak yapılmıştır. Temel akışkan olan su, Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 için basınç, hız ve ısı transferi sonuçları Şekil üzerinde tartışılmıştır. Burada, çalışmalar beş farklı Re (10, 100, 500, 1000, 2000), temel akışkan ve üç farklı nano hacimsel oranı (0.01, 0.03, 0.05), üç farklı manyetik alan kuvveti ($Ha = 25, 50, 100$) ile manyetik alanın olmadığı ($Ha = 0$) durum için sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuçlar genel olarak literatürle uyumluluk göstermiştir. Çalışma ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Çalışmamızın doğrulunu test etmek için literatürde benzer bir çalışma ile hız ve basınç verileri karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Hem literatür doğrulamasında hem de deneysel ile sayısal çalışma karşılaştırılmasında dıştan uygulanan manyetik alan kuvveti akışkan hızını Lorentz kuvvetinin etkisi ile engellemiş ve basıncı arttırmıştır. Her iki durumda birbirine uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. İlk uygulanan manyetik alan kuvveti akışkan hareketini daha fazla değiştirmişken manyetik alan kuvvetleri arasındaki akışkan davranışları arasındaki farklar daha düşük olmuştur.

Nano hacimsel oranı ve manyetik alan kuvvetinin artması ile akışkanın hız ve basınç değerlerinde meydana gelen değişim daha fazla olmuştur. Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 ve basınç için yapılan analizde en yüksek hız, en yüksek basınç değeri Al_2O_3 – su nano akışkanı için elde edilmiş iken en düşük hız ve basınç değeri CuO – su nano akışkanı için elde edilmiştir. Al_2O_3 ve TiO_2 nano akışkanlarında nanonun artması ile hızlarda meydana gelen değişim çok az iken, CuO – su nano akışkanında çok fazla düşmüştür. Bu CuO nano parçacığının yoğunluğunun çok büyük olmasından kaynaklanmıştır. $Re = 10$ 'da tüm nano

akışkanlar için boru çapı hız eğrileri kanalın ortasında parabolik iken, Re sayısının artması ile bu eğrilerin düz bir hal aldığı anlaşılmıştır. Aynı zamanda Ha sayısının artmasıyla da bu eğriler parabolik halden düz hale geçmiştir. Bu durum, akışkanın laminlerden türbülansa doğru geçmeye başladığı şeklinde yorumlanabilir.

Manyetik alanın olmadığı ($B = 0T$) durumda merkez basınç eğrilerinde biraz eğrilik var iken, kanalın manyetik alana maruz kalmasıyla bu eğriler düzleşmiştir. Re sayısının artmasıyla da özellikle $Ha = 0$ için basınç eğrilerindeki eğrilik artmaktadır. Nano akışkan hacimsel oranının artması ile basınç değerleri Al_2O_3 ve TiO_2 nano akışkanlarında belirgin bir artma olmasına rağmen, en büyük yoğunluğa sahip CuO – su nano akışkanında bu değişim basınç değerleri için yok denecek kadar azdır. Ayrıca Re sayısının artması ile basınç değerleri ciddi oranda artmıştır.

Nano hacimsel oranı, manyetik alan kuvveti ve Reynolds sayısının artması ile genel olarak Yerel Nu değerleri artmıştır. Ancak en düşük hıza sahip $Re = 10$ 'da yerel Nu değerlerinde değişim çok az iken Re sayısının artmasıyla meydana gelen fark daha fazla meydana gelmiştir. Düşük Re sayısına sahip her üç nano akışkan tipinde kanalın yaklaşık 0.04 m mesafesine kadar ısı transferinde taşınım baskın iken, bu noktadan sonra iletimin daha baskın olduğu anlaşılmıştır. $Re = 100$ 'de manyetik alan etkisiyle ısı transferi artmış, ancak kanalın sonuna doğru biraz azalmış ve neredeyse kanalın en sonunda eşitlenmiştir. Diğer üç yüksek Re sayısında manyetik alan kuvvetinin artması ile yerel Nu değerleri açık şekilde artış göstermiştir. $\phi = 0.01$ nano hacimsel oranında ve $Re = 10$ 'da nano akışkanlar arasında meydana gelen değişim yok denecek kadar azdır. Nano hacimsel oranın artması ve Re sayısının artması ile ısı transferindeki artış daha bariz olmuştur. En yüksek ısı transferi Al_2O_3 – su nano akışkanı için meydana gelmiştir. Burada en düşük yoğunluğa sahip olan Al_2O_3 nano parçacığıdır. Buda kanal içerisinde daha yüksek hareket etmesinden dolayı nano akışkanın daha yüksek bir enerjiye sahip olduğundan kaynaklanmıştır. Literatürde de buna benzer sonuçlara rastlamak oldukça mümkündür.

Ortalama Nusselt (Nu) değerlerine bakıldığında $Re = 10$ hariç, bütün şartlar altında nano parçacık eklenmesi, kanal içindeki akışkana dıştan manyetik alan verilmesi ve Re sayısını arttırmak Nu sayısını yükseltmiştir. $Re = 10$ için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bütün akışkan tiplerinde manyetik alan ilk uygulandığında önce ısı transferi artmış, daha sonra artma yavaş bir şekilde seyretmiş, ancak $Ha = 100$ 'de ısı transferinde iletimin daha baskın meydana geldiği belirlenmiştir. Bunda daha önce bahsi geçen akışkanların yavaş akması şeklinde yorumlanmıştı. Yerel Nu sayılarında da ısı

transferinin kanalın $\frac{1}{4}$ 'ünden sonra azalma eğilimi gösterdiği ve toplamda iletim değerlerinin taşınım değerlerinden daha fazla olduğu belirtilmişti. Aynı zamanda yine $Re = 10$ CuO için Nu , $\phi = 0.03$ 'e kadar çok az düştüğü ve 0.05 değeri için arttığı tespit edilmiştir. Burada akışkanın termal iletkenlik katsayısı da etkin bir oynamıştır. Al_2O_3 – su nano akışkanı için en düşük ve en yüksek Nu sayıları sırasıyla 8.939059 ($Ha = 0$, $\phi = 0.01$, $Re = 10$) ve 104.8434 ($Ha = 100$, $\phi = 0.05$, $Re = 2000$) olarak bulunmuştur. CuO – su nano akışkanı için en düşük ve en yüksek Nu sayıları sırasıyla 8.739499 ($Ha = 0$, $\phi = 0.01$, $Re = 10$) ve 103.2701 ($Ha = 100$, $\phi = 0.05$, $Re = 2000$) bulunmuştur. En son olarak da TiO_2 – su nano akışkanı için en düşük ve en yüksek Nu sayıları sırasıyla 8.883341 ($Ha = 0$, $\phi = 0.01$, $Re = 10$) ve 102.7756 ($Ha = 100$, $\phi = 0.05$, $Re = 2000$) değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak, termofiziksel özellikleri literatürden alınıp bu tezde kullanılan nano akışkanlar arasında en düşük ve en yüksek Nu sayıları arasında sırasıyla $CuO < TiO_2 < Al_2O_3$ ($Ha = 0$, $\phi = 0.01$, $Re = 10$), $TiO_2 < CuO < Al_2O_3$ ($Ha = 100$, $\phi = 0.05$, $Re = 2000$) ilişkisi vardır.

ΔT sıcaklık farkları incelendiğinde, sabit cidar sıcaklığına sahip boruda akışkan sıcaklığının artmasıyla yani akışkan ve cidar sıcaklığı arasındaki farkın büyümesiyle hız ve basınç değerleri düşmüş, ancak ısı transferinde sıcaklık farkından dolayı herhangi bir fark oluşmamıştır. Meydana gelen değişim nano parçacığın eklenmesiyle ısı transferini geliştirmiştir.

Isıtma ve soğutma için akışkan hız sonuçlarına bakıldığı zaman, ısıtma altındaki akışkanın hızının daha yüksek olduğu açıkça görülmüştür. Bu, ısıtma altındaki ısınan soğuk akışkanın viskozitesinin daha yüksek olduğundan kaynaklanmıştır. Basınç değerlerinde, soğutma etkisinde olan akışkanın ısıtma etkisindeki akışkanın basıncından çok daha az değerler aldığı izlenmiştir. Ancak soğutma ile ısıtma arasında meydana gelen ısı transferi oranı hemen hemen eşit olarak çıkmıştır.

Kanal malzemesi incelenirken, malzemesi Cu olan sonuçlardan elde edilen boru çapı hız değerlerinin plastik malzemeye göre daha düşük olduğu, ancak basıncın çok daha yüksek, aynı zamanda sıcaklığın da daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Bu tez çalışmasından, genel olarak manyetik alan, nano parçacık, Re sayısı, kanal malzemesinin cinsi ve ΔT sıcaklık faktörlerin akışkan davranışı üzerinde çok etkili olduğu belirlenmiştir. Manyetik alan ile nano akışkan hareketinin kontrol edilebileceği, ayrıca çalışılan nano parçacıklar arasında tüm koşullarda en iyi ısı transferini Al_2O_3 nano parçacığının eklenmesi ile elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

5. ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında, doğrulama testleri dışında kalan analizlerin neredeyse tamamı sayısal olarak yapılmıştır. Deneysel koşullardaki zorluklar nedeniyle çok az deney yapma şansı elde edilmiştir. Manyetik alan bölgesinin içinde yer alan test bölgesinde birçok elektronik cihazın manyetik alandan etkilenmesi, şebeke elektriğinden kaynaklı çok büyük Tesla değerlerinde manyetik alanın üretilmemesi daha sağlıklı ölçümlerin elde edilmesine engel olmuştur. Ayrıca yapılan sayısal analizlerde kullanılan nano akışkanların termofiziksel özelliklerinin birbirinden farkı olması kafalarda soru işareti bırakmasına yol açmaktadır.

Nano akışkanlarla ilgili en önemli problemlerden bir tanesi nano akışkanların ısı transferini artırıyor mu yoksa azaltıyor mu sorusudur. Literatürde bununla ilgili tartışmalar hala devam etmektedir. Hem bu problemle hem de genel olarak konuyla ilgili bazı öneriler aşağıda özetlenmiştir.

Nano akışkanlarla ilgili tartışmalar devam ettiği için hem deneysel hem de sayısal olmak üzere çok sayıda çalışma yapılmalıdır. Bu çalışmalar farklı nano tipleri, farklı geometriler ve farklı sınır şartları gibi parametrelerle çeşitlendirilmelidir. Yukarıda nano akışkanların termofiziksel özellikleri literatürde farklılık gösterdiği için bununla ilgili farklı koşullarda kapsamlı deneylerle birçok çalışma yapılmalı ve gerçeğe daha yakın olan değerler sunularak literatüre katkı sağlanmalıdır. Nano parçacıkların temel akışkan içerisindeki topaklaşmaları engellemek için ultrasonik karıştırıcılarda belli bir süre (bu süre nano tipine göre değişiklik gösterebilir) kaldıktan sonra çıkartılmalı ve ne kadar sürede çökme gösterdiği tespit edilmelidir. Literatürde bununla ilgili maalesef çok az bilgi mevcuttur. Nano parçacıkları daha uzun süre askıda tutmak için ne gibi katkı maddelerinin eklenmesi gerektiği ve hangi fiziksel işlemlere maruz kalması gibi araştırmalarda arttırılmalıdır.

Sonuç olarak nano akışkanlar ile ilgili problemler hala kesin olarak çözülemediğinden bununla ilgili deneysel ve sayısal çalışmalar çoğaltılarak devam edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **White, F.M.**, 2004. Akışkanlar Mekaniği Kitabı (4. Basımdan Türkçesi), Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [2] **Choi, U.S.**, 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nano-particles, *ASME Fluids Eng. Div.* **231**, 99–103.
- [3] **Hartmann, J.**, 1937. Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field, *Mathematisk Fysiske Meddelelser*, **15 (6)**, 1-28.
- [4] **M'hamed, B., Sidik, N.A.C., Yazid, M.N.A.W.M., Mamat, R., Najafi, G. and Kefayati, G.H.R.** 2016. A Review on why researches apply external magnetic field on nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **78**, 60-67.
- [5] **Salman, B.H., Mohammed, H.A. and Kherbeet, A. Sh.**, 2012. Heat transfer enhancement of nanofluids flow in in microtube with constant heat flux, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **39**, 1195-1204.
- [6] **Kimouche, A., Metaoui, A., Oztop, H.F. and Abu-Hamdeh, N.**, 2017. Analysis of heat transfer of different nanofluids flow through an abrupt expansion pipe, *Applied Thermal Engineering*, **112**, 965-974.
- [7] **Hemmat Esfe, M., Saedodin, S. and Mahmoodi, M.**, 2014. Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO–water nanofluid under turbulent flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **52**, 68-78.
- [8] **Öztürk, A.**, 2013. MHD slip flow between parallel plates heated with a constant heat flux, *Journal of Thermal Science and Technology*, **33 (1)**, 11-20.
- [9] **Lu, B., Xu, L. and Zhang, X.**, 2013. Three-dimensional MHD simulations of the electromagnetic flowmeter for laminar and turbulent flows, *Flow Measurement and Instrumentation*, **33**, 239-243.
- [10] **Kiyasatfar, M. and Pourmahmoud, N.**, 2016. Laminar MHD flow and heat transfer of power-law fluids in square microchannels, *International Journal of Thermal Sciences*, **99**, 26-35.

- [11] **Sun, Z.H.I., Zhang, X., Guo, M., Pandelaers, L., Vleugels, J., Van der Biest, O., Van Reusel, K. and Blanpian, B.,** 2012. Strong magnetic field effects on solid–liquid and particle–particle interactions during the processing of a conducting liquid containing non-conducting particles, *Journal of Colloid and Interface Science*, **375**, 203-212.
- [12] **Nayak, M.K., Dash, G.C. and Singh, L.P.,** 2014. Steady MHD flow and heat transfer of a third grade fluid in wire coating analysis with temperature dependent viscosity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **79**, 741-754.
- [13] **Muthuraj, R. and Srinivas, S.,** 2010. A note on heat transfer to MHD oscillatory flow in an asymmetric wavy channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, 1255-1260.
- [14] **Satyamurthy, P., Swain, P.K., Tiwari, V., Kirillov, I.R., Obukhov, D.M. and Pertsev, D.A.,** 2015. Experiments and numerical MHD analysis of LLCB TBM Test-section with NaK at 1 T magnetic field, *Fusion Engineering and Design*, **91**, 44-51.
- [15] **Anwar Bég, O., Sim, L., Zueco, J. and Bhargava, R.,** 2010. Numerical study of magnetohydrodynamic viscous plasma flow in rotating porous media with Hall currents and inclined magnetic field influence, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulant*, **15**, 345-359.
- [16] **Awang Kechil, S. and Hashim, I.,** 2009. Approximate analytical solution for MHD stagnation-point flow in porous media, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **14**, 1346-1354.
- [17] **Bandyopadhyay, S. and Layek, G.C.,** 2012. Study of magnetohydrodynamic pulsatile flow in a constricted channel, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, **17**, 2434-2446.
- [18] **Yang, Z., Zhou, T., Chen, H. and Ni, M.,** 2010. Numerical study of MHD pressure drop in rectangular ducts with insulating coatings, *Fusion Engineering and Design*, **85**, 2059-2064.
- [19] **Zhang, X., Xu, Z. and Pan, C.,** 2010. Numerical analysis of MHD duct flow with a flow channel insert, *Fusion Engineering and Design*, **85**, 2090-2094.

- [20] **Huang, H. and Li, B.**, 2010. Heat transfer enhancement of free surface MHD-flow by a protrusion Wall, *Fusion Engineering and Design*, **85** (7-9), 1496-1502.
- [21] **Mistrangelo, C. and Bühler, L.**, 2007. Numerical investigation of liquid metal flows in rectangular sudden expansions, *Fusion Engineering and Design*, **82**, 2176-2182.
- [22] **Kang, W., Xu, Z. and Pan, C.**, 2006. MHD stabilities of liquid metal jet flows with gradient magnetic field, *Fusion Engineering and Design*, **81**, 1019-1025.
- [23] **Hashizume, H.**, 2006. Numerical and experimental research to solve MHD problem in liquid blanket system, *Fusion Engineering and Design*, **81**, 1431-1438.
- [24] **Luo X-Y., Ying, A. and Abdou, M.**, 2006. Numerical study of MHD effect on liquid metal free jet under complex magnetic fields, *Fusion Engineering and Design*, **81**, 1451-1458.
- [25] **Hughes, M., Pericleous, K.A. and Cross, M.**, 1994. The CFD analysis of simple parabolic and elliptic MHD flows, *Applied Mathematical Modelling*, **18**, 150-155.
- [26] **Kim, C.N.**, 2014. Liquid metal magnetohydrodynamic flows in an electrically conducting rectangular duct with sudden expansion, *Computers & Fluids*, **89**, 232-241.
- [27] **Bühler, L., Horanyi, S. and Arbogast, E.**, 2007. Experimental investigation of liquid-metal flows through a sudden expansion at fusion-relevant Hartmann numbers, *Fusion Engineering and Design*, **82**, 2239-2245.
- [28] **Mistrangelo, C. and Bühler, L.**, 2009. Influence of helium cooling channels on magnetohydrodynamic flows in the HCLL blanket, *Fusion Engineering and Design*, **84**, 1323-1328.
- [29] **Morley, N.B., Ni, M-J., Munipalli, R., Huang, P. and Abdou, M.A.**, 2008. MHD simulations of liquid metal flow through a toroidally oriented manifold, *Fusion Engineering and Design*, **83**, 1335-1339.
- [30] **Starke, K., Bühler, L. and Horanyi, S.**, 2009. Experimental MHD – flow analyses in a mock-up of a test blanket module for ITER, *Fusion Engineering and Design*, **84**, 1794-1798.

- [31] **Ke, Y., Wang, H.Y. and Wu, Y.C.,** 2003. MHD simulation of the liquid metal/helium gas dual-cooled waste transmutation blanket for FDS, *Fusion Engineering and Design*, **69**, 431-435.
- [32] **Lyublinski, I.E., Evtikhin, V.A., Vertkov, A.V., Ezhov, N.I. and Shcherbakov, V.M.,** 2005. Experimental study of lithium MHD flow in slotted channel from V-4Ti-4Cr alloy, *Fusion Engineering and Design*, **75(79)**, 1071-1074.
- [33] **Aoyagi, M., Ito, S., Hashizume, H. and Muroga, T.,** 2010. MHD pressure drop characteristics in a three-surface-multi-layered channel under a strong magnetic field, *Fusion Engineering and Design*, **85**, 1181-1184.
- [34] **Chen, H., Zhou, T., Yang, Z., Lü, R., Zhu, Z. and Ni, M.,** 2010. Magnetohydrodynamic experimental design and program for Chinese liquid metal LiPb experimental loop DRAGON-IV, *Fusion Engineering and Design*, **85**, 1742-1746.
- [35] **Bhattacharyay, R., Patel, A., Ellappan, R., Swain, P.K., Satyamurthy, P., Kumar, S., Ivanov, S., Shishko, A., Platacis, E. and Ziks, A.,** 2013. Liquid metal MHD experimental activities for LLCB TBM development, *Fusion Engineering and Design*, **88**, 2244-2250.
- [36] **Recebli, Z., Selimli, S. and Gedik, E.,** 2013. Three dimensional numerical analysis of magnetic field effect on Convective heat transfer during the MHD steady state laminar flow of liquid lithium in a cylindrical pipe, *Computers & Fluids*, **88**, 410-417.
- [37] **Sutevski, D., Smolentsev, S. and Abdou, M.,** 2014. 3D numerical study of pressure equalization in MHD flow in a rectangular duct with insulating flow channel insert, *Fusion Engineering and Design*, **89**, 1370-1374.
- [38] **Patel, A., Bhattacharyay, R., Swain, P.K., Satyamurthy, P., Sahu, S., Rajendrakumar, E., Ivanov, S., Shishko, A., Platacis, E. and Ziks, A.,** 2014. Liquid metal mhd studies with non-magnetic and ferro-magnetic structural material, *Fusion Engineering and Design*, **89**, 1356-1361.
- [39] **Takeuchi, J., Satake, S., Morley, N. B., Kunugi, T., Yokomine, T. and Abdou, M.A.** 2008. Experimental study of MHD effects on turbulent flow of Flibe simulant fluid in circular pipe, *Fusion Engineering and Design*, **83**, 1082-1086.

- [40] **Rao, J.S. and Sankar, H.**, 2011. Numerical simulation of MHD effects on convective heat transfer characteristics of flow of liquid metal in annular tube, *Fusion Engineering and Design*, **86**, 183-191.
- [41] **Patel, A., Bhattacharyay, R., Srinivasan, R., Rajendrakumar, E., Bhuyan, P., Satyamurthy, P. Swain, P. and Goswami, K.S.**, 2012. 3D thermo-fluid MHD simulation of single straight channel flow in LLCB TBM, *Fusion Engineering and Design*, **87**, 498-502.
- [42] **Swain, P.K., Satyamurthy, P., Bhattacharyay, R., Patel, A. Shishko, A., Platacis, E., Ziks, A., Ivanov, S. and Despande, A.V.**, 2013. 3D MHD lead-lithium liquid metal flow analysis and experiments in a test-section of multiple rectangular bends at moderate to high Hartmann numbers, *Fusion Engineering and Design*, **88**, 2848-2859.
- [43] **Zhang, X., Pan, C. and Xu Z.**, 2013. Effect of contact resistance on liquid metal MHD flows through circular pipes, *Fusion Engineering and Design*, **88**, 2228-2234.
- [44] **Li, F.C., Sutevski, D., Smolentsev, S. and Abdou, M.**, 2013. Experimental and numerical studies of pressure drop in PbLi flows in a circular duct under non-uniform transverse magnetic field, *Fusion Engineering and Design*, **88**, 3060-3071.
- [45] **Albest-Chico, X., Grigoriadis, D.G.E., Votyakov, E.V. and Kassinos, S.**, 2013. Direct numerical simulation of turbulent liquid metal flow entering a magnetic field, *Fusion Engineering and Design*, **88**, 3108-3124.
- [46] **Takeuchi, J., Satake, S., Miraghaie, R., Yuki, K., Yokomine, T., Kunugi, T., Morley, N.B. and Abdou, M.A.**, 2006. Study of heat transfer enhancement/suppression for molten salt flows in a large diameter circular pipe Part I: Benchmarking, *Fusion Engineering and Design*, **81**, 601-606.
- [47] **Xu, S-J., Zhang, N-M. and Ni, M-J.**, 2013. Influence of flow channel insert with pressure equalization opening on MHD flows in a rectangular duct, *Fusion Engineering and Design*, **88**, 271-275.
- [48] **Yamamoto, Y., Kunugi, T., Satake, S. and Smolentsev, S.**, 2008. DNS and $k-\varepsilon$ model simulation of MHD turbulent channel flows with heat transfer, *Fusion Engineering and Design*, **83**, 1309-1312.

- [49] **Smolentsev, S., Badia, S., Bhattacharyay, R., Bühler, L., Chen, L., Huang, Q., Jin, H.G., Krasnov, D., Lee, D-W., Mas de les Valls, E., Mistrangelo, C., Munipalli, R., Ni, M-J., Pashkevich, D., Patel, A., Pulugundla, G., Satyamurthy, P., Snegirev, A., Sviridov, V., Swain, P., Zhou, T. and Zikanov, O.,** 2015. An approach to verification and validation of MHD codes for fusion applications, *Fusion Engineering and Design*, **100**, 65-72.
- [50] **Yamamoto, Y. and Kunugi, T.,** 2015. Direct numerical simulation of MHD heat transfer in high Reynolds number turbulent channel flows for Prandtl number of 25, *Fusion Engineering and Design*, **90**, 17-22.
- [51] **Sheikholeslami, M., Hatami, M. and Ganji, D.D.,** 2013. Analytical investigation of MHD nanofluid flow in a semi-porous channel, *Powder Technology*, **246**, 327-336.
- [52] **Karimipour, A., D’Orazio, A. and Shadloo, M.S.,** 2017. The effects of different nano particles of Al_2O_3 and Ag on the MHD nano fluid flow and heat transfer in a microchannel including slip velocity and temperature jump, *Physica E*, **86**, 146-153.
- [53] **Hatami, M., Hatami, J. and Ganji, D.D.,** 2014. Computer simulation of MHD blood conveying gold nanoparticles as a third grade non-Newtonian nanofluid in a hallow porous vessel, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **113**, 632-641.
- [54] **Sheikholeslam, M., Hayat, T., Muhammad, T. and Alsaed, A.,** 2018. MHD forced convection flow of nanofluid in a porous cavity with hot elliptic obstacle by means of Lattice Boltzmann method, *International Journal of Mechanical Sciences*, **135**, 532-540.
- [55] **Ellahi, R.,** 2013. The effects of MHD and temperature dependent viscosity on the flow of non-Newtonian nanofluid in a pipe: Analytical solutions, *Applied Mathematical Modelling*. **37**, 1451-1467.
- [56] **Zaidi, S.Z.A. and Mohyud-Din, S.T.,** 2016. Convective heat transfer and MHD effects on two dimensional Wall jet flow of a nanofluid with passive control model, *Aerospace Science and Technology*, **49**, 225-230.

- [57] **Malvandi, A. and Ganji, D.D.**, 2014. Brownian motion and thermophoresis effects on slip flow of alumina/water nanofluid inside a circular microchannel in the presence of a magnetic field, *International Journal of Thermal Sciences*, **84**, 196-206.
- [58] **Hatami, M., Nouri, R. and Ganji, D.D.**, 2013. Forced convection analysis for MHD Al_2O_3 - water nanofluid flow over a horizontal plate, *Journal of Molecular Liquids*, **187**, 294-301.
- [59] **Aminfar, H., Mohammadpourfard, M. and Maroofiazar, R.**, 2014. Experimental study on the effect of magnetic field on critical heat flux of ferrofluid flow boiling in a vertical annulus, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **58**, 156-169.
- [60] **Selimefendigil, F. and Öztıp, H.F.**, 2014. Effect of a rotating cylinder in forced convection of ferrofluid over a backward facing step, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **71**, 142-148.
- [61] **Aminfar, H., Mohammadpourfard, M. and Mohseni, F.**, 2012. Two-phase mixture model simulation of the hydro-thermal behavior of an electrical conductive ferrofluid in the presence of magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **324**, 830-842.
- [62] **Aminfar, H., Mohammadpourfard, M. and Ahangar Zonouzi, S.**, 2013. Numerical study of the ferrofluid flow and heat transfer through a rectangular duct in the presence of a non-uniform transverse magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **327**, 31-42.
- [63] **Sheikholeslami, M., Vajravelu, K. and Rashidi, M.M.**, 2016. Forced convection heat transfer in a semi annulus under the influence of a variable magnetic field, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **92**, 339-348.
- [64] **Bennia, A. and Bouaziz, M.N.**, 2017. CFD modelling of turbulent forced convective heat transfer and friction factor in a tube for Fe_3O_4 magnetic nanofluid in the presence of a magnetic field, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **78**, 127-136.
- [65] **Gedik, E., Kurt, H., Recebli, Z. and Keçebaş, A.**, 2012. Unsteady flow of two-phase fluid in circular pipes under applied external magnetic and electrical fields, *International Journal of Thermal Sciences*, **53**, 156-165.

- [66] **Gedik, E., Kurt, H., Recebli, Z. and Balan, C.,** 2012a. Two-dimensional CFD simulation of magnetorheological fluid between two fixed parallel plates applied external magnetic field, *Computers & Fluids*, **63**, 128-134.
- [67] **Kefayati, G.H.R.,** 2014. Natural convection of ferrofluid in a linearly heated cavity utilizing LBM, *Journal of Molecular Liquids*, **191**, 1-9.
- [68] **Sheikholeslami, M. and Ganji, D.D.,** 2014. Ferrohydrodynamic and magnetohydrodynamic effects on ferrofluid flow and convective heat transfer, *Energy*, **75**, 400-410.
- [69] **Sheikholeslami, M. and Gorji-Bandpy, M.,** 2014. Free convection of ferrofluid in a cavity heated from below in the presence of an external magnetic field, *Powder Technology*, **256**, 490-498.
- [70] **Sheikholeslami, M., Bandpy, M.G., Ellahi, R., Hassan, M. and Soleimani, S.,** 2014. Effects of MHD on Cu-water nanofluid flow and heat transfer by means of CVFEM, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **349**, 188-200.
- [71] **Bourantas, G.C., Loukopoulos, V.C.,** 2014. MHD natural-convection flow in an inclined square enclosure filled with a micropolar-nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. **79**, 930-944.
- [72] **Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M. and Vajravelu, K.,** 2015. Lattice Boltzmann simulation of magnetohydrodynamic natural convection heat transfer of A_2O_3 -water nanofluid in a horizontal cylindrical enclosure with an inner triangular cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **80**, 16-25.
- [73] **Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M. and Ganji, D.D.,** 2014. Lattice Boltzmann method for MHD natural convection heat transfer using nanofluid, *Powder Technology*, **254**, 82-93.
- [74] **Mejri, I., Mahmoudi, A., Abbasi, M.A. and Omri, A.,** 2014. Magnetic field effect on entropy generation in a nanofluid-filled enclosure with sinusoidal heating on both side walls, *Powder Technology*, **266**, 340-353.
- [75] **Mahmoudi, A., Mejri, I., Abbasi, M.A. and Omri, A.,** 2015. Analysis of MHD natural convection in a nanofluid-filled open cavity with non uniform boundary condition in the presence of uniform heat generation/absorption, *Powder Technology*, **269**, 275-289.

- [76] **Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., Ganji, D.D. and Soleimani, S., 2014.** Heat flux boundary condition for nanofluid filled enclosure in presence of magnetic field, *Journal of Molecular Liquids*, **193**, 174-184.
- [77] **Sheikholeslami, M., Ganji, D.D., Gorji-Bandpy, M. and Soleimani, S., 2014.** Magnetic field effect on nanofluid flow and heat transfer using KKL model, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **45**, 795-807.
- [78] **Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M. and Ganji, D.D., 2014.** MHD free convection in an eccentric semi-annulus filled with nanofluid, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **45**, 1204-1216.
- [79] **Sheikholeslami, M., Gorji Bandpy, M., Ellahi, R. and Zeeshan, A., 2014.** Simulation of MHD CuO–water nanofluid flow and convective heat transfer considering Lorentz forces, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **369**, 69-80.
- [80] **Ghasemi, B., Aminossadati, S.M. and Raisi, A., 2011.** Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, **50**, 1748-1756.
- [81] **Freidoonimehr, N., Rashidi, M.M. and Mahmud, S., 2015.** Unsteady MHD free convective flow past a permeable stretching vertical surface in a nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, **87**, 136-145.
- [82] **Mahmoudi, A.H., Pop, L., Shahi, M. and Talebi, F., 2013.** MHD Natural convection and entropy generation in a trapezoidal enclosure using Cu-water nanofluid, *Computers & Fluids*, **72**, 46-62.
- [83] **Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M. and Ganji, D.D., 2013.** Numerical investigation of MHD effects on Al₂O₃-water nanofluid flow and heat transfer in a semi-annulus enclosure using LMB, *Energy*, **60**, 501-510.
- [84] **Sheikholeslami, M., Li, Z. and Shamlooei, M., 2018.** Nanofluid MHD natural convection through a porous complex shaped cavity considering thermal radiation, *Physics Letters A*, (Basimda 2018).
- [85] **Hasanuzzaman, M., Öztop, H.F., Rahman, M.M., Rahim, N.A., Saidur, R. and Varol, Y., 2012.** Magnetohydrodynamic natural convection in trapezoidal cavities, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **39**, 1384-1394.

- [86] **Kumar, A. and Singh, A.K.**, 2013. Unsteady MHD free convective flow past a semi-infinite vertical wall with induced magnetic field, *Applied Mathematics and Computation*, **222**, 462-471.
- [87] **Afify, A.A.**, 2007. Effects of variable viscosity on non-Darcy MHD free convection along a non-isothermal vertical surface in a thermally stratified porous medium, *Applied Mathematical Modelling*, **31**, 1621-1634.
- [88] **Öztop, H.F., Rahman, M.M., Ahsan, A., Hasanuzzaman, M., Saidur, R., Al-Salem, K. and Rahim, N.A.** 2012. MHD natural convection in an enclosure from two semi-circular heaters on the bottom Wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, 1844-1854.
- [89] **Di Piazza, I. and Ciofalo, M.**, 2002. MHD free convection in a liquid-metal filled cubic enclosure. I. Differential heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **45**, 1477-1492.
- [90] **Kahveci, K. and Öztuna, S.**, 2009. MHD Natural convection flow and heat transfer in a laterally heated partitioned enclosure, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, **28**, 744-752.
- [91] **Jha, B.K., Aina, B. and Ajiya, A.T.**, 2015. MHD natural convection flow in a vertical parallel plate microchannel, *Ain Shams Engineering Journal*, **6**, 289-295.
- [92] **Sathiyamoorthy, M. and Chamkha, A.**, 2010. Effect of magnetic field on natural convection flow in a liquid gallium filled square cavity for linearly heated side Wall (s), *International Journal of Thermal Sciences*, **49**, 1856-1865.
- [93] **Gajbhiye, N.L. and Eswaran, V.**, 2015. Numerical simulation of MHD flow and heat transfer in a rectangular and smoothly constricted enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **83**, 441-449.
- [94] **Dada, M.S. and Disu, A.B.**, 2015. Heat transfer with radiation and temperature dependent heat source in MHD free convection flow in a porous medium between two vertical wavy walls, *Journal of the Nigerian Mathematical Society*, **34 (2)**, 200-215.
- [95] **Pirmohammadi, M. and Ghassemi, M.**, 2009. Effect of magnetic field on convection heat transfer inside a tilted square enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **36**, 776-780.

- [96] **Selimefendigil, F. and Öztop, H.F.**, 2014. Numerical study of MHD mixed convection in a nanofluid filled lid driven square enclosure with a rotating cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **78**, 741-754.
- [97] **Malvandi, A., Safaei, M.R., Kaffash, M.H. and Ganji, D.D.**, 2015. MHD mixed convection in a vertical annulus filled with Al_2O_3 -water nanofluid considering nanoparticle migration, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **382**, 296-306.
- [98] **Dhanai, R., Rana, P. and Kumar, L.**, 2016. MHD mixed convection nanofluid flow and heat transfer over an inclined cylinder due to velocity and thermal slip effects: Buongiorno's model, *Powder Technology*, **288**, 140-150.
- [99] **Nasrin, R. and Alim, M.A.**, 2012. Control volume finite element simulation of MHD forced and natural convection in a vertical channel with a heat-generating pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, 2813-2821.
- [100] **Rahman, M.M., Saidur, R. and Rahim, N.A.**, 2011. Conjugated effect of joule heating and magneto-hydrodynamic on double-diffusive mixed convection in a horizontal channel with an open cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **54**, 3201-3213.
- [101] **Ahmed, S.E., Mansour, M.A. and Mahdy, A.**, 2013. MHD mixed convection in an inclined lid-driven cavity with opposing thermal buoyancy force: Effect of non-uniform heating on both side walls, *Nuclear Engineering and Design*, **265**, 938-948.
- [102] **Pekmen, B. and Tezer-Sezgin, M.**, 2014. Numerical solution of buoyancy MHD flow with magnetic potential, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **71**, 172-182.
- [103] **Kefayati, G.H.R., Gorji-Bandpy, M., Sajjadi, H. and Ganji, D.D.**, 2012. Lattice Boltzman simulation of MHD mixed convection in a lid-driven square cavity with linearly heated Wall, *Scientia Iranica B*, **19(4)**, 1053-1065.

- [104] **Kefayati, G.H.R.**, 2015. Magnetic field effect on heat and mass transfer of mixed convection of shear-thinning fluids in a lid-driven enclosure with non-uniform boundary conditions, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **51**, 20-33.
- [105] **Alam, Md. S. and Khan, M.A.H.**, 2014. MHD effects on mixed convection flow through a diverging channel with circular obstacle, *Procedia Engineering, (10th International Conference on Mechanical Engineering, ICME 2013)*, **90**, 403-410.
- [106] **Mukhopadhyay, S. and Mandal, I.C.**, 2015. Magnetohydrodynamic (MHD) mixed convection slip flow and heat transfer over a vertical porous plate, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **18**, 98-105.
- [107] **Rahman, M.M., Alim, M.A. and Sarker, M.M.A.**, 2010. Numerical study on the conjugate effect of joule heating and magneto-hydrodynamics mixed convection in an obstructed lid-driven square cavity, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, 524-534.
- [108] **Azad, A.K., Rahman, M.M. and Öztop, H.F.**, 2014. Effects of Joule heating on magnetic field inside a channel along with a cavity, *Procedia Engineering, (10th International Conference on Mechanical Engineering, ICME 2013)*, **90**, 389-396.
- [109] **Bal, G.**, 2014. Elektrik Makinaları – 1 (Güncellenmiş 4. Baskı), Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [110] **Edminister, J. A.**, 2000. Elektromanyetik, Nobel Yayın Dağıtım (2. Baskıdan çeviri), Ankara.
- [111] **[R. Moreau, R.]**, 1990. Magnetohydrodynamics, Kluwer Academic Publishers.
- [112] <http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.0/120/FLUENT/flmhd.pdf>.
- [113] **Gedik, E.**, 2012. Silindirik borularda manyetohidrodinamik akışın deneysel olarak incelenmesi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile sayısal analizi, *Doktora Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [114] **Heidary, H., Hosseini, R., Pirmohammadi, M. and Kermani, M.J.**, 2015. Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **374**, 11-17. (zorlanmış taşınım ort. Nu benzeri için referans gösterilendir)

- [115] **Brinkman, H.C.**, 1952. The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *J. Chem. Phys.* **20**, 571-581.
- [116] **Cengel, Y.A.**, 2009. *Heat and Mass Transfer*, (Third Edition).
- [117] **Sheikholeslami, M., Abelman, S. and Ganji, D.D.**, 2014. Numerical simulation of MHD nanofluid flow and heat transfer considering viscous dissipation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **79**, 212-222.
- [118] **Ramana Reddy, J.V., Sugunamma, V. and Sandeep, N.**, 2017. Impact of nonlinear radiation on 3D magnetohydrodynamic flow of methanol and kerosene based ferrofluids with temperature dependent viscosity, *Journal of Molecular Liquids*, **236**, 93-100.



ÖZGEÇMİŞ

Murat ERDEM, 1 Ekim 1982’de Mardin’de doğmuştur. İlköğrenimini Mardin’de, orta öğrenimini 1998’de Nusaybin Endüstri Meslek lisesi Tesviye bölümünde tamamlamıştır. 1999 – 2003 yıllarında E.Ü.A.Ş. Nusaybin ÇAĞÇAĞ hidroelektrik santralinde makine operatörü ve teknik bakım elemanı olarak çalışmıştır. 2003 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği bölümünde lisans eğitimine başlamış ve 2007’de bu bölümden dereceyle mezun olmuştur. 2007 – 2009 yıllarında Mardin ilinin Nusaybin ilçesinde bulunan Nusaybin Misak-ı Milli İlköğretim okulunda ücretli öğretmenlik yapmıştır. Elazığ Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi A.B.D. Enerji Bilim dalında yüksek lisans eğitime 2009 yılında başlamış, 2011 yılında “Balığın Tepsili Kurutucuda Kurutma Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi” isimli tez başlığıyla mezun olmuştur. 2012 yılında, yine Fırat Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim dalı Enerji bilim dalında Doktora eğitimine başlamıştır. Eylül 2012’de Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulunda Akademik Uzman olarak göreve başlamış, daha sonra YÖK tarafından tüm Uzman kadroların Öğretim Görevlisi kadrosuna dönüştürülmesi ile Öğretim görevli olarak çalışmaya başlamış ve halen görevine bu ünvan ile devam etmektedir.