

Al₂O₃-Su Nanoakışkanının Manyetik Alan Altında Akış Karakteristiklerinin Sayısal Analizi

Murat ERDEM^{1*}, Müjdat FIRAT², Yasin VAROL²

¹ Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ muratrdm01@gmail.com, ² mujdatfirat@gmail.com, ² yvarol@gmail.com

(Geliş/Received: 26/12/2020;

Kabul/Accepted: 01/04/2021)

Öz: Bu çalışmada, manyetik alan altındaki bir boruda Al₂O₃-su nanoakışkanının akış karakteristikleri laminar şartlar altında sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma ANSYS-FLUENT ticari yazılım programı ile gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan akış yönüne dik verilmiştir. Akışkan sıcaklığı (Ti) boru sıcaklığından (Tw) daha yüksek tutularak akışkanın soğuması sağlanmıştır (Ti > Tw). Reynolds sayısı (Re) = 10, 100, 500, 1000, 2000, Hartmann sayısı (Ha) = 0, 25, 50, 100 ve nanopartikül hacimsel oranı (ϕ) = 0, 0.01, 0.03, 0.05 olarak seçilmiştir. Akışkan hız değişimleri ve basınç değişimleri detaylı olarak incelenmiştir. Akışkan hızı, manyetik alan ve nanopartikül hacimsel oranı ile azalırken, boru merkez uzunluğu boyunca basınç değerleri artmıştır. Manyetik alan ile meydana gelen hız düşüşü nanopartikül eklenmesi ile meydana gelen düşüşten daha fazladır. Aynı şekilde, manyetik alan ile meydana gelen basınç artışı, nanopartikül eklenmesi ile meydana gelen basınç artışından daha fazladır. Sonuç olarak, hem manyetik alan kuvveti hem de nanopartikül ilavesi akışkan hareketi üzerinde etkilidir. Ayrıca, manyetik alan kuvveti ile nanoakışkan hareketi kontrol altında tutulabilir.

Anahtar kelimeler: Manyetohidrodinamik, Nanoakışkan, Nanopartikül, Zorlanmış taşınım

Numerical Analysis of Flow Characteristics of Al₂O₃-Water Nanofluid Under Magnetic Field

Abstract: In this study, the flow characteristics of Al₂O₃-water nanofluid in a pipe under magnetic field have investigated numerically under laminar conditions. The study has carried out with the ANSYS-FLUENT commercial software program. Magnetic field is given perpendicularly to the flow. Fluid temperature (Ti) was kept higher than the pipe temperature (Tw), allowing the fluid to cool (Ti > Tw). Reynolds numbers (Re)=10, 100, 500, 1000, 2000, Hartmann numbers (Ha)=0, 25, 50, 100, and nanoparticle volume fractions (ϕ)=0, 0.01, 0.03, 0.05 have chosen. Fluid velocity and pressure changes are examined in detail. Fluid velocity has decreased with magnetic field and nanofluid volume ratio, while fluid pressure has increased along the center length of the pipe. The velocity drop caused by the magnetic field is greater than that caused by the addition of nanoparticles. Likewise, the pressure increase caused by the magnetic field is higher than the pressure increase caused by the addition of nanoparticles. As a result, both magnetic field strength and nanoparticle addition have an effect on fluid motion. Also, the motion of the nanofluid can be kept under control with the magnetic field.

Keywords: Magnetohydrodynamics, Nanofluid, Nanoparticle, Forced convection

1. Giriş

Günümüzde, termal iletkenliği çok düşük olan su, alkol, gaz yağı vb. temel akışkanlara termal iletkenliği çok daha yüksek olan nanopartiküllerin eklenmesi ile ısı transferini iyileştirme tekniği literatürde sıkça çalışılan güncel konulardan bir tanesidir. Nanoakışkan terimi, nano boyuttaki parçacıkların akışkan içerisindeki süspansiyonudur. Bununla alakalı nanoakışkan terimi ilk olarak Choi [1] tarafından kullanılmıştır. Nanopartiküllerin hem ısı transferine hem de akışkan hareketine olan etkisinin daha iyi anlaşılması için birçok bilimsel çalışma yayımlanmaktadır. Bu araştırmacılar bazıları düşük nanopartikül konsantrasyonlarında termal iletkenliğin yaklaşık %20'ye kadar çıkabileceğini kanıtlamışlardır [1-4].

Manyetik alan, hareket halindeki elektrik yükleri tarafından zamana bağlı değişen elektrik alanlardan veya temel parçacıklar tarafından içsel olarak üretilmektedir. Mühendislik uygulamalarında kullanılan Manyetohidrodinamik (MHD) terimi de, manyetik alan altında elektriksel iletkenliğe sahip olan akışkanların davranışını inceleyen disiplinler arası bir konudur. MHD ile ilgili ilk çalışma Hartmann (Ha) tarafından yapılmıştır [5]. Hartmann, manyetik alana maruz iki paralel plaka arasında elektrik iletkenliğe sahip viskoz ve sıkıştırılmaz bir sıvının davranışını incelemiştir.

Bu çalışma kapsamında bir boru içerisinde MHD nanoakışkan zorlanmış taşınım olayı ele alınmıştır. Bir dairesel kanal içindeki zorlanmış taşınım ısı transferi olayı, güneş kolektörleri, enerji santralleri, yüksek

* Sorumlu yazar: muratrdm01@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-0287-1881, ² 0000-0001-6978-9044, ³ 0000-0003-2989-7125

performanslı kazanlar, soğutma-ısıtma sistemleri, kimyasal katalitik reaktörler ve diğer birçok akış hareketi gibi teknolojik uygulamaların en önemli konularından bir tanesini oluşturmaktadır [6-10]. Literatürde, farklı nanopartikül tipi, nanopartikül hacimsel oranı, değişik geometri ve sınır şartları ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan, Erdem ve Varol [11], Cu-su nanoakışkanına dış manyetik alan uygulayarak akış karakteristikleri ve ısı transferini incelemişlerdir. Çalışmalarında manyetik alanın nanoakışkan hareketini düşürdüğünü ve özellikle yüksek Reynolds sayılarında manyetik alan ve nanopartikül hacimsel oranın artmasıyla ısı transferinde iyileşme meydana geldiğini ortaya koymuşlardır. Erdem [12] üç farklı nanoakışkan tipiyle yaptığı kapsamlı çalışmada manyetik alanın akışkan hareketini kontrol etmede çok etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca Erdem vd. [13], lityum sıvısı için, Erdem ve Varol [14] sıvı PbLi17 için yaptıkları sayısal çalışmada manyetik alanın akışkan hızını azalttığını ve basıncı yükselttiğini belirlemişlerdir. Öztürk [15], sabit ısı akısına maruz iki paralel plaka arasında, elektriksel iletkenliği olan viskoz bir akışkanın daimi, tam gelişmiş, laminar ve bu akışa dik manyetik alanın varlığında ısı transferini analitik olarak incelemiştir. Knudsen sayısı (Kn), Bringham sayısı (Br) ve Hartmann sayısının hız, sıcaklık dağılımı ve ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ha sayısının artmasıyla hız profillerinin düştüğünü rapor etmiştir. Lu vd. [16] çalışmalarında, laminar ve türbülanslı akışlar için bir silindirik elektromanyetik akış ölçer için üç boyutlu MHD ile ilgili bazı simülasyonlarını FLUENT kodu olan MHD modülünü kullanarak oluşturmuşlardır. Her iki akış türü için hız profilleri, elektrik alanı, 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 laminar akışından daha üniform olduğunu savunmuşlardır. Sun vd. [17], iletkenliği olan bir akışkan içerisinde, belirli bir mesafede kendileri de iletken olan iki parçacığın çok güçlü bir manyetik alan 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. İndüklenen manyetohidrokinamik etkileşim kuvvetinin akış alanı ve manyetik akı yoğunluğuna büyük ölçüde bağlı olduğunu savunmuşlardır.

Nanoakışkana manyetik alan uygulamalarından akış karakteristiklerinin incelenmesi günümüzde literatürde çok çalışılan konulardan biridir. Bu çalışmada, manyetik alana maruz bırakılan bir boruda Al₂O₃-su nanoakışkanının hız ve basınç davranışı incelenmiştir. Bunun için Re sayısı, Ha sayısı ve nanopartikül hacimsel oranının etkisi detaylı olarak incelenmiş ve her bir parametrenin etkisi ayrı bir Şekil içerisinde verilerle hangi parametrenin daha etkili olduğu net olarak gözlemlenmeyi hedeflenmiştir. Böylelikle, en etkili olan parametre daha net olarak bir tek Şekil içerisinde ortaya çıkmıştır. Bu çalışmanın analiz sonuçları, özellikle nükleer santrallerde basınç düşümünün manyetik alan ile kontrolünün çok önemli olduğu, uydu çalışmaları, ayrıca diğer pek çok mühendislik uygulamalarında nanoakışkanın manyetik alan ile kontrol edilebilmesi ve ısı transferi olayları gibi konularda literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

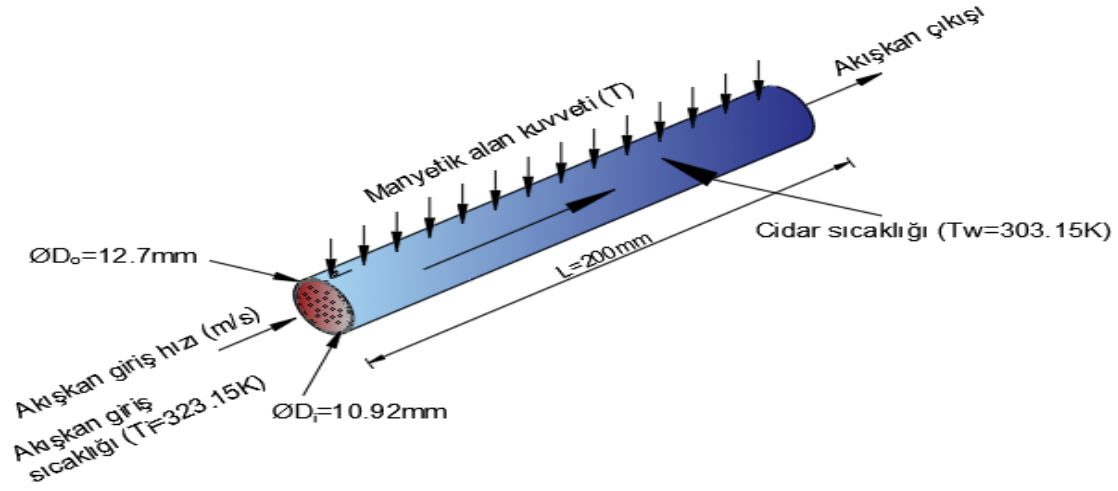
2. Materyal ve Metot

2.1. Problem Tanımlanması ve Ağ Yapısı

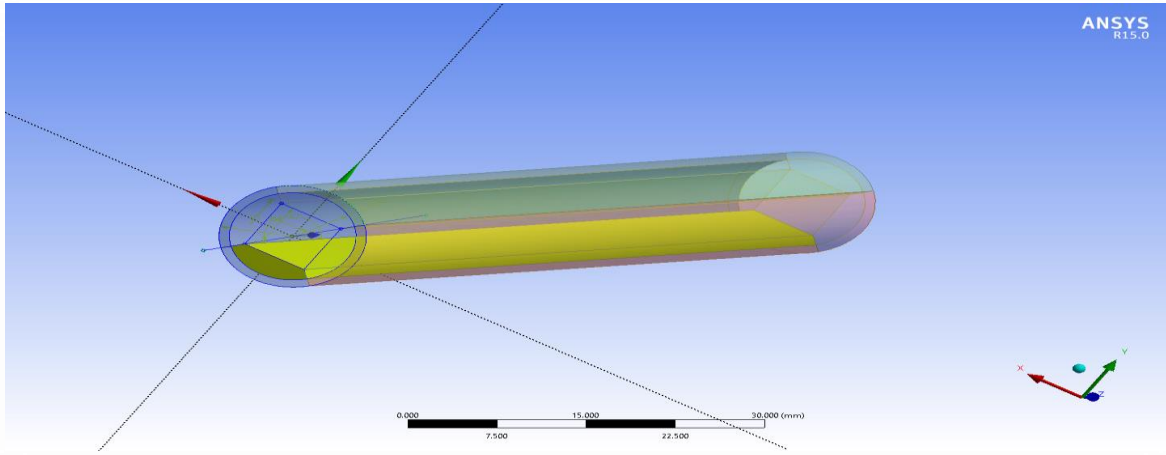
Bu çalışmayı analiz etmek kalınlığı 0.89mm olan bir boru kullanılmıştır. Kullanılan boru modeli ve sınır şartları Şekil 1'de gösterilmiştir. Boru iç çapı 10.92 mm'ye karşılık gelen standart 1/2" boru kullanılmış (boru dış çapı 12.7mm) ve malzeme özellikleri programda buna göre tanımlanmıştır. Akışkan giriş ve cidar sıcaklığı sırasıyla $T_i=50$ ve $T_w=30^\circ\text{C}$ olarak seçilmiştir. Temel akışkana nanopartikül eklenmesindeki en temel amaçlardan bir tanesi termal iletkenliği çok düşük olan temel akışkanın termal iletkenliğini yükseltmektir. Bununla ilgili akışkanın termofiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Burada, C_p , ρ , k , μ ve σ sırasıyla özgül ısı kapasitesi, yoğunluk, ısı iletkenlik, akışkanın dinamik viskozitesi ve elektriksel iletkenlik değerini temsil etmektedir. Suyun C_p ve elektriksel iletkenlik değeri daha yüksek iken, nanopartikülün yoğunluğu ve ısı iletkenliği çok daha yüksektir. Yoğunluk etkisinin basınç ve akışkan hızı üzerindeki etkisi sonuçlar kısmında tartışılmıştır.

Tablo 1. Akışkanın ve nanopartikülün termofiziksel özellikleri [18, 19].

	C_p (J/kg K)	ρ (kg/m ³)	k (W/m K)	μ (Pa.s)	σ (S/m)
Su	4181	988.1	0.644	0.000547	0.05
Al₂O₃	765	3970	25	-	10 ⁻¹²



a)



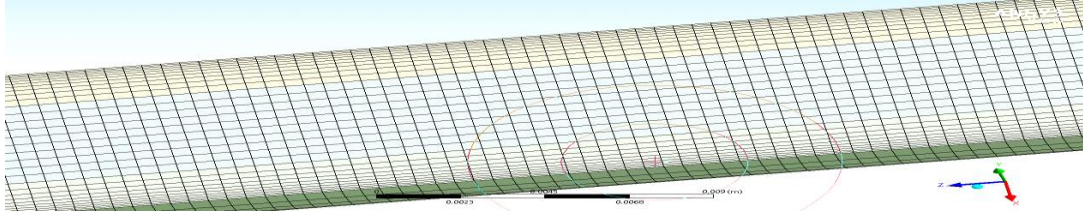
b)

Şekil 1. a) Katı boru modeli ve sınır şartları (ØD_0 =Boru dış çapı, ØD_1 =Boru iç çapı), b) Bölünmüş katı boru modeli

Şekil 1a)'da borunun giriş kısımlarının rengi daha açık iken, sonlara doğru akışkanın daha da soğuduğunu göstermek için mavi renk daha koyu hale getirilmiştir. Boru sıcaklığından daha sıcak olan akışkanın rengi de kırmızı ile gösterilmiş ve nanopartikülleri temsil eden siyah noktalar borunun girişinde gösterilmiştir.

Boru ANSYS-FLUENT'te beş katı parçaya bölünerek oluşturulmuştur. Borunun ortası bir tane kare-karşıt kesitli geometri ile ayrılarak borunun bölünmesi yoluna gidilmiştir. Programda bölünmüş geometri Şekil 1(b)'de gösterilmiştir. Bu şekilde ağ (mesh) yapısı çok daha düzgün ve kaliteli olmaktadır. Bu ağ yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ağ yapısında herhangi bir sapma (yamukluk, yan çizim, birbirini kesme vb.) yoktur. Literatürde bunun programdaki zorluklarından dolayı daha çok tek parça (bütün) olarak oluşturulmaktadır. Ancak bu yöntem bölünmüş ağ yapısı kadar verimli değildir. Bu yüzden geometrinin bölünerek oluşturulması bu çalışmada önerilmektedir. Bununla ilgili daha kapsamlı bilgiler Erdem [12] tarafından ispatlanmıştır.

Çalışmada kullanılan ağ yapısının düğüm sayısı ve hücre sayısı sırasıyla 257000 ve 248000'dir. Ağın kalitesi, sayısal hesaplamaların doğruluğu ve kararlılığında önemli bir rol oynar. Mesh Orthogonal (dörtgensel) ve Skewness (sapma) değerleri sırasıyla 0.965 ve 7.8×10^{-2} 'dir. Orthogonal kalitesi 1 değerine yaklaştıkça mesh kalitesi de aynı oranda artmaktadır [20]. Bu literatüre göre oldukça iyi değerlerdir. Burada geometrinin bölünerek yapılmasının etkisi fazladır.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan ağ yapısı [12]

2.2. Sayısal Hesaplamalar

ANSYS-FLUENT ticari yazılım programında içerisindeki MHD modülü ile bu sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Yönetici denklemler sonlu hacim tekniği ile çözülmüştür. Basınç-hız çifti için daha uygun olduğu düşünülen SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Boru içerisindeki akışkan, Newtonyen, sıkıştırılmaz ve laminar olarak kabul edilmiştir. Küresel-şekilli olan nanopartiküller boyut olarak çok küçük olduğundan (100 nm'den küçük) nanoakışkan tek bir faz gibi davranmaktadır. Bu yüzden analiz tek fazlı akışkan olarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar aşağıdaki formüller yardımıyla çözülmektedir.

Boyutlu Navier-Stokes denklemleri Eş. (1-3) ile belirlenmektedir [21,22]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \nabla P + \nu_{nf} \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{\rho_{nf}} \vec{F} \quad (2)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{T} = \alpha_{nf} \nabla^2 \vec{T} \quad (3)$$

\vec{F} , Lorentz kuvvetinden kaynaklanan kaldırma ve cisim kuvvetidir ve Eş. (4) ile ifade edilir, P: Akışkan basıncı, V: akışkan hızı, ν : akışkanın kinematik viskozitesidir [21, 23].

$$\vec{F} = \vec{g}_y (\sigma\beta)_{nf} (\vec{T} - T_0) + \vec{J} \times \vec{B} \quad (4)$$

Eşitlik 4'teki son terim Lorentz kuvveti olarak tanımlanmakta ve sıvı hareketine neden olmaktadır.

\vec{J} , elektrik akım yoğunluğu Ohm yasası ile bulunmuştur (β : genleşme katsayısı).

$$\vec{J} = \rho_{nf} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (5)$$

\vec{E} , DC elektrik akımıdır ve \vec{B} , z-yönündeki birimi Tesla (T) olan manyetik alan kuvvetidir. Böylece, manyetik alan ve elektrik akımı birbirine diktir ve bu da x ve y yönlerinde Lorentz kuvvetine neden olur. Literatürde bu çalışmada tercih edilen konsantrasyonlarla birlikte farklı konsantrasyonlarla da bu çalışmaya benzer nanopartikül hacimsel oranlarında çalışmalar bulunmaktadır [19, 24, 25]. $T_i=50^\circ\text{C}$ referans giriş sıcaklığında nanoakışkanın termodinamik özellikleri aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmaktadır. Boru cidar sıcaklığı 30°C 'de sabit tutulmuştur ($T_w=30^\circ\text{C}$):

Nanoakışkanın yoğunluğu Eş. 6 ile hesaplanmaktadır [6]. Aynı şekilde elektriksel iletkenlik değeri de [26] Eş. (7) ile hesaplanabilir (nf: nanoakışkan, f: Temel akışkan, s: katı partikül).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (6)$$

$$\sigma_{nf} = (1 - \phi) \sigma_f + \phi \sigma_s \quad (7)$$

Nanoakışkanın özgül ısı kapasitesi Eş. (8) ile bulunur [6].

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_s \quad (8)$$

Nanoakışkanın termal iletkenliği (k_{nf}) Eş. (9), Maxwell-Garnett's (MG modeli) ile belirlenebilir [27].

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (9)$$

Eş. (10), nanoakışkanın dinamik viskozitesini Brinkman modeli ile [28], Eş. (11) ise Ha sayısını hesaplamak için kullanılır [6]. Ha sayısı, ilk olarak Hartmann tarafından sunulan elektromanyetik kuvvetin viskoz kuvvetlere oranıdır.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (10)$$

$$Ha = BR \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f}} \quad (11)$$

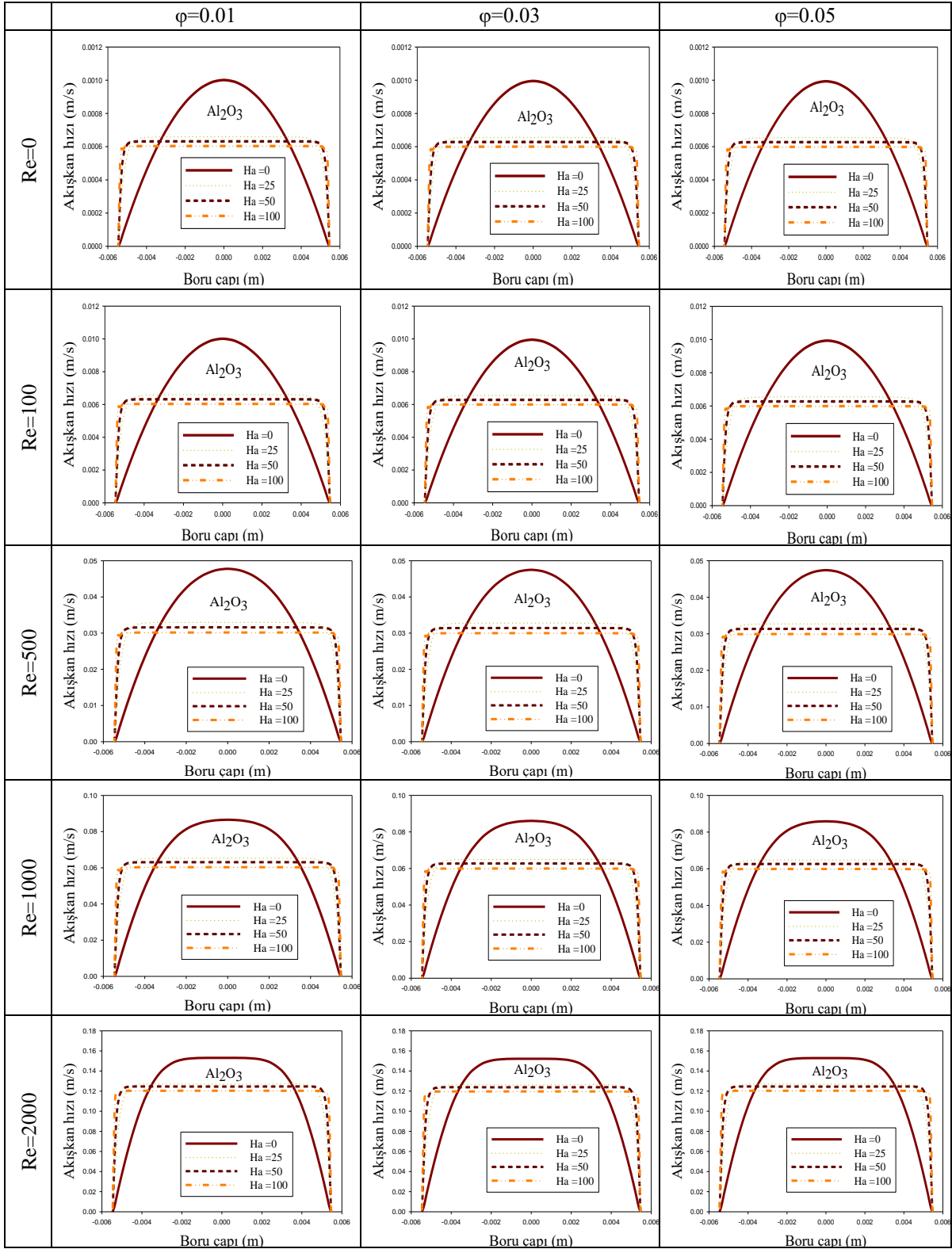
Burada R, borunun yarıçapı (m)'dir.

3. Sonuçlar ve Tartışma

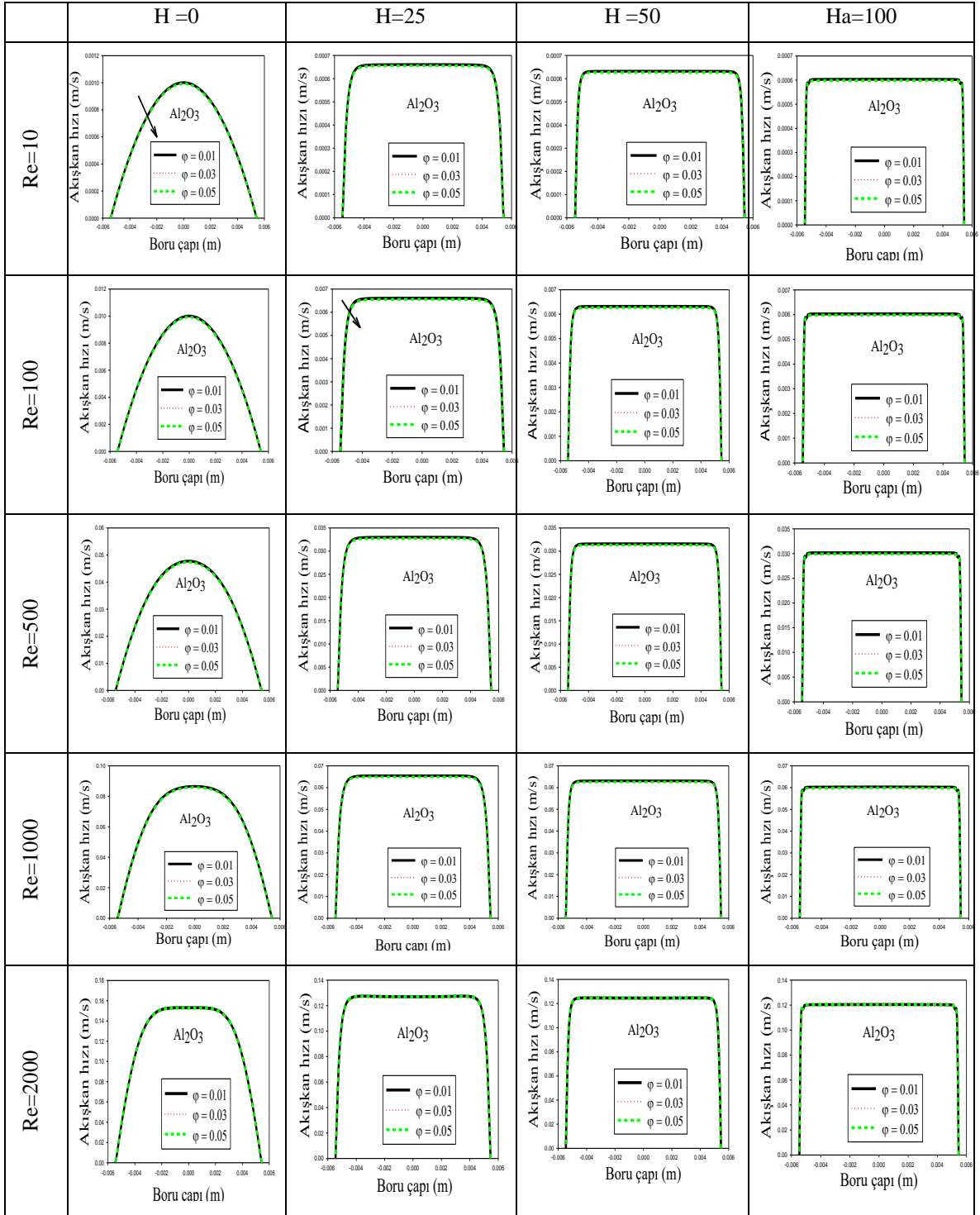
Çeşitli Re sayıları ve nanopartikül hacimsel oranlarında Ha sayısının boru çapı boyunca akışkan hızlarının karşılaştırmaları Al₂O₃-su nanoakışkanı için Şekil 3'te sunulmuştur. Re sayıları sırasıyla, Re=10, 100, 500, 1000, 2000 ve nanopatikül hacimsel oranları $\phi=0.01, 0.03$ ve 0.05 olarak seçilmiştir. Ha sayıları da sırasıyla, Ha=0, 25, 50 ve 100 olarak tercih edilmiştir. Burada laminer şartlarda, hem düşük Re sayısından yüksek Re sayısına geçerken hem de nanopartikülün etkisiyle akışkanın hareketinde nasıl bir değişimin meydana geldiği irdelenmiştir. Her bir grafik içinde, manyetik alan etkisinin olmadığı (Ha=0) ve olduğu üç farklı durumda (Ha=25, 50, 100), manyetik alan kuvveti ile boru çapında meydana gelen hız değişimleri sunulmuştur. Beklenildiği gibi Re sayısının artmasıyla hızlarda büyük bir artış meydana gelmiştir (Re=($\rho V D_i / \mu$)). Şekil ölçekleri, $\phi=0.01$ Al₂O₃-su nanoakışkanı için incelendiğinde Re = 10 için V = 0.0012 m/s, bu değer in Re sayısının artması ile Re = 2000 için V = 0.18 m/s değerine çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca, Re sayısı arttıkça hız eğrilerinin daha çok yatay eksenle paralel olduğu görülmektedir. Bu şekildeki tüm grafikler için, kanala dıştan uygulanan manyetik alan şiddetinin akışkan hızını önemli oranda düşürdüğü tespit edilmiştir. Buradaki düşüş nanopartikülün eklenmesi ile oluşan düşüşten daha fazladır. Manyetik alan etkisi ile hızlardaki bu azalmaların nedeni Lorentz kuvvetinin geciktirici etkisinden kaynaklanmaktadır. Manyetik alan uygulandığında manyetik alanın olmadığı duruma göre hızlardaki düşüşün çok büyük olduğu, ancak manyetik alan altında iken manyetik alan şiddetinin artması ile meydana gelen hız değişiminin daha az olduğu tespit edilmiştir. Başka bir deyişle, manyetik alan altındaki (Ha \neq 0) hız değerlerinin birbirine göre farkı daha az olmuştur.

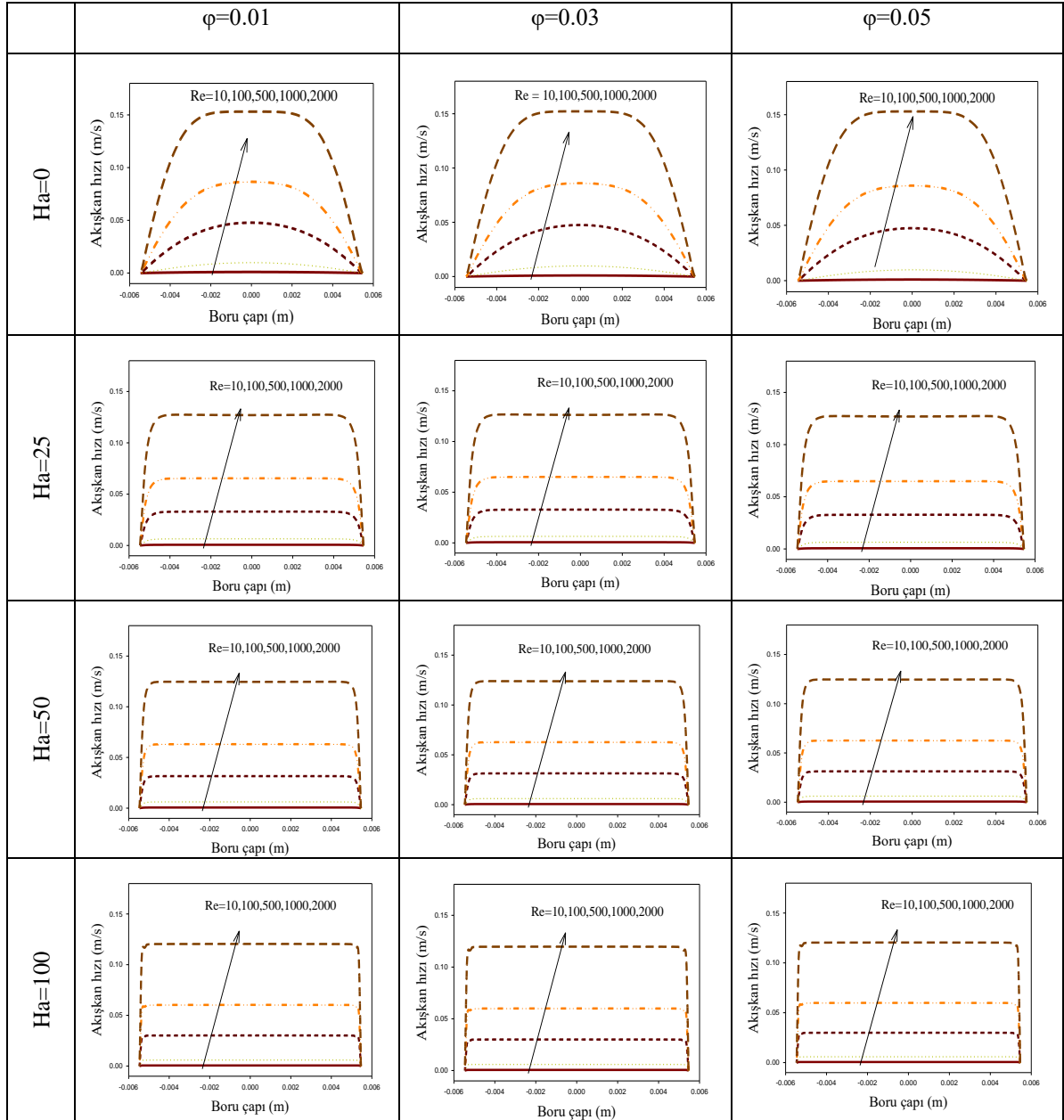
Şekil 4, Al₂O₃-su-nanoakışkanı için farklı Re ve Ha sayılarında, her bir grafiğin içinde nanopartikül hacimsel oranının analizini içermektedir. Nanopartikül hacimsel oranlarının birbirine göre durumunun daha net anlaşılması için her bir grafikte (Şekil 4) $\phi=0.01, 0.03$ ve 0.05 arasındaki değişimler analiz edilmiştir. Al₂O₃-su nanoakışkanında 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 için daha az olduğu görülmektedir. Re=2000'de nanopartikül katkısı neredeyse akışkan hızını hiç değiştirmemiş aşağı-yukarı aynı kalmıştır. Burada Al₂O₃ nanopartikülün termofiziksel özelliklerinden yoğunluğun, temel akışkanın yoğunluğuna yakın olması nedeni ile meydana gelen hız değişimleri arasındaki fark daha az olmuştur. Şekil ölçekleri yakından incelendiğinde en yüksek nanopartikül yoğunluğuna sahip akışkanın hız verilerinin, artan yoğunluğun bir sonucu olarak daha belirgin bir şekilde düştüğü görülmektedir. Şekilden nanopartikül hacimsel oranı arttıkça nanoakışkanın hızının azaldığı sonucu ortaya çıkmıştır.

Şekil 5'teki grafiklerden Re sayısının artması ile akışkan hızlarının arttığı açıkça anlaşılmaktadır. Bu Şekillerde, Re=10 için hız değerlerinin sifira yakın olduğu ve Re sayısının artması ile birlikte hız değerlerinin orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. Bu Şekil satırları incelendiğinde Ha değerlerinin artmasıyla hızların azaldığı Şekil ölçeklerinden görülmektedir. Burada, nanoakışkan 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.



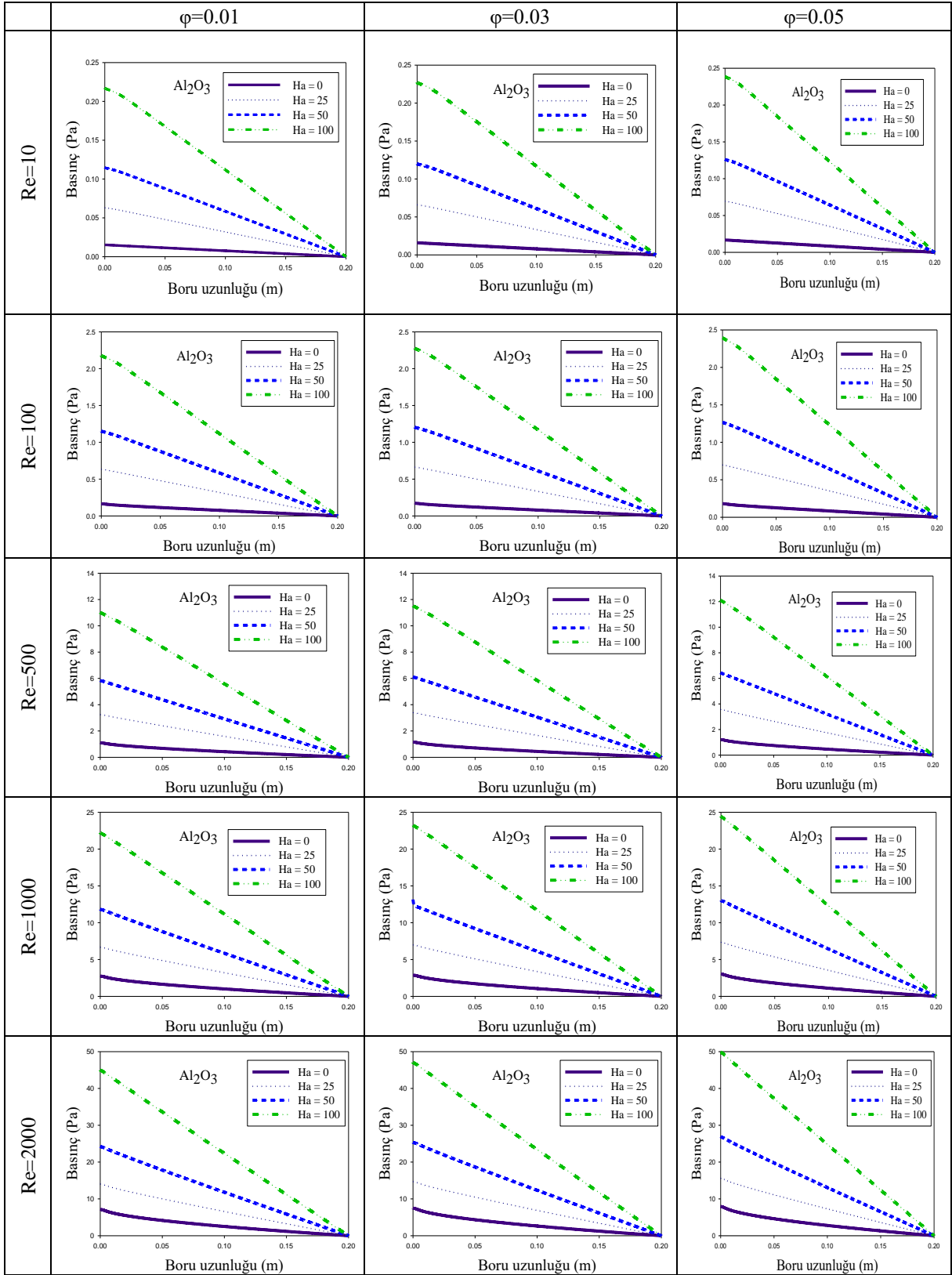
Şekil 3. Al₂O₃-su nanoakışkanının çeşitli Re değerleri ve nanopartikül hacimsel oranlarında manyetik alan kuvvetlerinin boru çapı boyunca akışkan hız profilleri

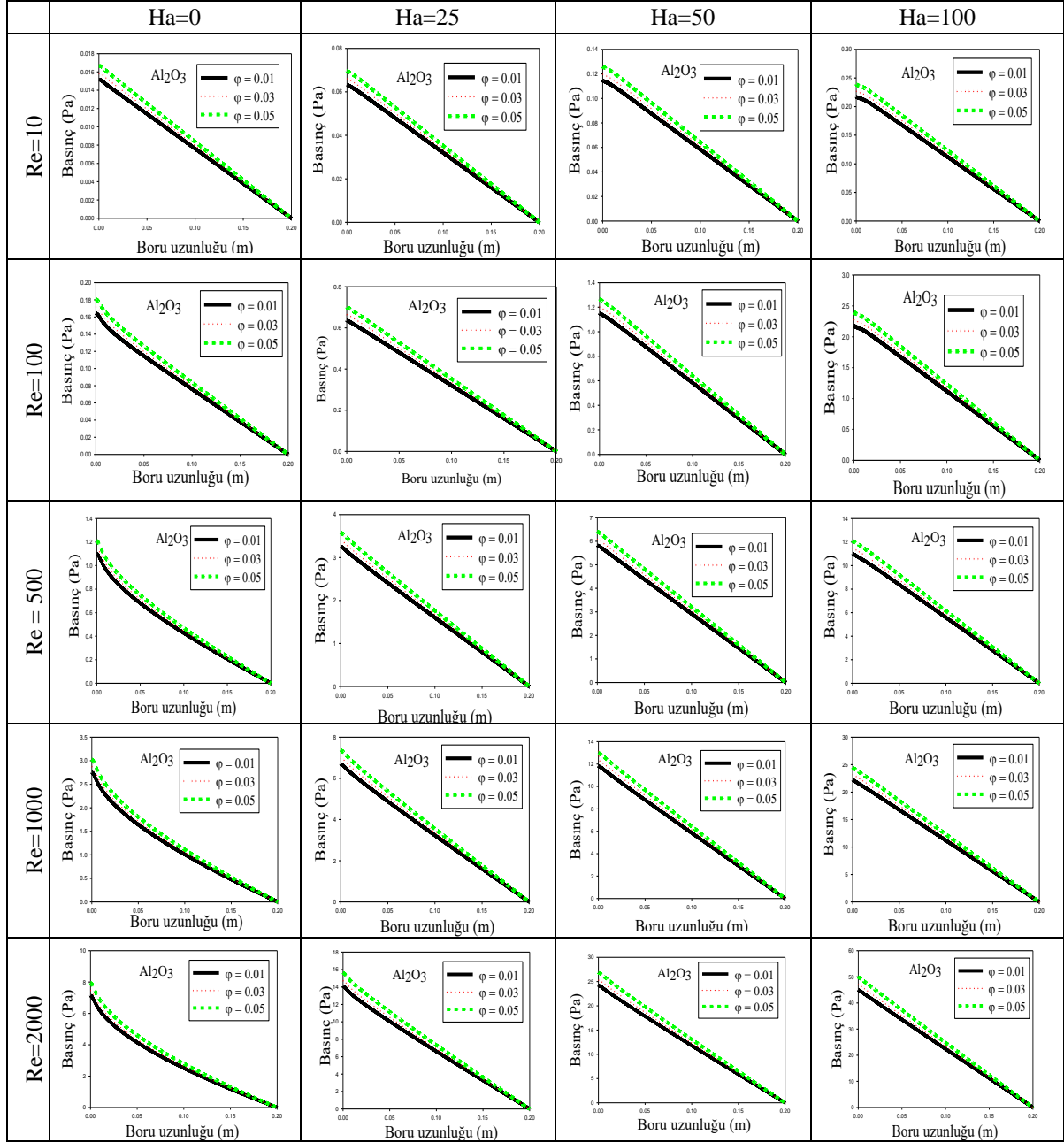
Şekil 4. Farklı Re sayıları ve Ha sayılarında Al_2O_3 -su nanopakışkanı için nanopartikül hacimsel oranlarının kıyaslanması



Şekil 5. Çeşitli nanopartikül hacimsel oranı ve manyetik alan kuvvetlerinde Al₂O₃-su nanoakışkanının çap boyunca Re sayısı ile hız değişimleri

Boru uzunluğu boyunca ($L=0-200\text{mm}$) meydana gelen basınç dağılımları Şekil 6'da analiz edilmiştir. Hem nanopartikül katkısının hem de manyetik alan etkisinin basınç üzerinde arttırıcı bir etkiye sahip olduğu Şekilden anlaşılmaktadır. Buradaki, her bir grafik sabit Re sayısı ve nanopartikül hacimsel oranlarında farklı Ha sayılarının karşılaştırmalarını sunmaktadır. Şekildeki (Şekil 6) 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 değerine sahip nanopartikül hacimsel oranlarını göstermektedir. Şekildeki tüm grafiklerde, manyetik alan kuvvetinin uygulanması dairesel kanalın merkez uzunluğu boyunca basınçlarda ciddi bir artışa neden olduğu görülmektedir. Şekil incelendiğinde hem yukarıdan aşağıya Re sayısının fazlalaşması nedeniyle hem de soldan sağa doğru nanopartikül hacimsel oranının artmasından dolayı basınç değişmelerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Ancak Re sayısındaki artış nedeniyle meydana gelen basınç farkının çok daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durum taşınan akışkan miktarının çok fazla olmasından kaynaklanmıştır.

Şekil 6. Çeşitli Re ve nanopartikül hacimsel oranlarında Al_2O_3 -su nanoakışkanının merkez basınç değerlerinin Ha sayısı ile değişimi

Şekil 7. Farklı Re sayıları ve manyetik alan kuvvetinde Al₂O₃-su nanoakışkanı için nanopartikül hacimsel oranlarının karşılaştırılması

Farklı Re sayıları ve manyetik alan kuvvetinde sırasıyla Al₂O₃-su nanoakışkanının çeşitli nanopartikül hacimsel oranlarında, basınç değişimleri Şekil 7’de tasvir edilmiştir. Şekil sütunları (Şekil 7), Re sayılarını gösterirken satırlar Nanopartikül hacimsel oranları temsil etmektedir. Re sayısı ve manyetik alan şiddetinin artması ile basınçlarda meydana gelen artışın büyük olduğu anlaşılmıştır. Şekil (Şekil 7) incelendiğinde nanopartikülün eklenmesi sonucu basınçlarda artışın olduğu ve nanopartikül hacimsel oranına göre farklı değerler aldığı görülmüştür. Al₂O₃-su nanoakışkanında, nanopartikül hacimsel oranı arttıkça meydana gelen basınç değişimi de artmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar literatürle uyumluluk içindedir [11, 29]. Şekilden manyetik alan şiddeti uygulanmadığında Re sayısının artması ile grafikteki basınç eğrilerinin düz halden parabol hale geldiği ve hem Ha hem de Re sayısının artması ile bu eğrilerin düzleştiği tespit edilmiştir. Şekil 7’deki maksimum ölçekler, Re 10 - Ha=0, 25, 50, 100 için sırasıyla 0.018, 0.08, 0.14, 0.30, Re = 100-Ha=0, 25, 50, 100 için sırasıyla 0.20, 0.8,

1.4, 3, Re 500-Ha = 0, 25, 50, 100 için sırasıyla 1.4, 4, 7, 14, Re 1000-Ha = 0, 25, 50, 100 için sırasıyla 3.5, 8, 14, 30 ve Re 2000-Ha=0, 25, 50, 100 için sırasıyla 10, 18, 30 ve 60 olarak belirlenmiştir. Bu sütun ve satırları birbiri ile kıyaslamak için kolaylık sağlayacaktır.

4. Sonuç

Al₂O₃-su nanoakışkanına ait akış karakteristikleri, manyetik alana maruz bir boruda sayısal olarak bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Farklı Re, Ha ve nanopartikül hacimsel oranlarının etkisini görmek için elde edilen sonuçlar, bu parametrelerin nanoakışkan üzerinde çok etkili olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre manyetik alan, Lorentz kuvvetinin geciktirici etkisiyle, ayrıca nanopartikül hacimsel oranı da akışkanda artmaya neden olan yoğunluktan dolayı akışkanın hızını düşürmüştür. Ancak manyetik alan kuvveti ile meydana gelen hız düşüşü nanopartikül etkisiyle azalan hızdan çok daha fazladır. Yine manyetik alan ve nanopartikül etkisiyle boru merkezi boyunca akışkanın basıncında artma meydana gelmiştir. Akışkan hızlarında olduğu gibi burada da manyetik alanın uygulanması sonucu meydana basınç artışı, nanopartikül eklenmesine göre daha fazla meydana gelmiştir. Artan Re sayısı da hem hızlarda hem de akışkan basıncında ciddi bir artışa neden olmuştur.

Dolayısıyla, manyetik alan nanoakışkanı kontrol etmede etkili bir parametre olarak düşünülebilir.

Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje biriminin (FUBAP) katkılarıyla gerçekleştirilmiştir. (Proje No: TEKF.15.01). Yazarlar bu projeye desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesine teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] Choi SUS, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. No. ANL/MSD/CP-84938, CONF-951135—29, Argonne National Lab., IL, 1995.
- [2] Lee S, Choi SUS, Li S. Eastman J.A., Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nano-particles ASME J Heat Transfer 1999; 121: 280-289.
- [3] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nano fluids containing copper nano-particles. App Phys Lett 2001; 78: 718-720.
- [4] Xuan Y, Li Q. Heat transfer enhancement of nano-fluids. Int J Heat Fluid Flow 2000; 21: 58-64.
- [5] Hartmann J. Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field. Mathematisk Fysiske Meddelelser 1937; 15(6): 1-28.
- [6] Heidary H, Hosseini R, Pirmohammadi M, Kermani MJ. Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel. J magn magn Mater 2015; 374: 11-17.
- [7] Wang BX, Du JH, Peng XF. Internal natural, forced and mixed convection in fluid-saturated porous medium. Trans Phenom Porous Media 1998; 357-382.
- [8] Demirel Y, Al-Ali HH, Abu-Al-Saud BA. Enhancement of convection heat-transfer in a rectangular duct. Appl Energy 1999; 64: 441-451.
- [9] Cheng KC, Hong SW. Effect of tube inclination on laminar convection in uniformly heated tubes for flat-plate solar collectors. Sol Energy 1972; 13: 363-371.
- [10] Esfe MH, Saedodin S, Malekshah EH, Babaie A. Mixed convection inside lid-driven cavities filled with nanofluids. J Therm Anal Calorim 2019; 135: 813-859.
- [11] Erdem M, Varol Y. Numerical investigation of heat transfer and flow characteristics of MHD nano-fluid forced convection in a pipe. J Therm Anal Calorim 2020; 139: 3897–3909.
- [12] Erdem M. Nano parçacık katkılı manyetohidrokinamik akışın deneysel ve sayısal incelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [13] Erdem M, Fırat M, Varol Y. Dairesel bir kanalda soğutma şartları altında MHD sıvı lityum akışın sayısal olarak incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 24: 30-35.
- [14] Erdem M, Varol Y. Numerical investigation of PbLi17 fluid flow forced convection heating under magnetic field. Journal of Materials and Electronic Devices 2019; 1(1): 41-45.
- [15] Öztürk A. MHD slip flow between parallel plates heated with a constant heat flux. J Thermal Science Technol 2013; 33 (1): 11-20.
- [16] Lu B, Xu L, Zhang X. Three-dimensional MHD simulations of the electromagnetic flowmeter for laminar and turbulent flows. Flow Measur Instrument 2013; 33: 239-243.
- [17] Sun ZHI, Zhang X, Guo M, Pandelaers L, Vleugels J, Van der Biest O, Van Reusel K, Blanpian B. Strong magnetic field effects on solid-liquid and particle-particle interactions during the processing of a conducting liquid containing non-conducting particles. J Colloid Interface Sci 2012; 375: 203-212.
- [18] Cengel YA. Heat and Mass Transfer (Third Edition), 2009.

- [19] Sheikholeslami M, Abelman S, Ganji DD. Numerical simulation of MHD nanofluid flow and heat transfer considering viscous dissipation. *Int J Heat Mass Transfer* 2014; 79: 212-222.
- [20] ANSYS Forte Theory Manuel, 2018.
- [21] Yousofvand R, Derakhshan S, Ghasemi K, Siavashi M. MHD transverse mixed convection and entropy generation study of electromagnetic pump including a nanofluid using 3D LBM simulation. *Int J Mech Sci* 2017; 133: 73-90.
- [22] Bejan A. Convection heat transfer. John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 1995.
- [23] Zhao G, Jian Y, Chang L, Buren M. Magnetohydrodynamic flow of generalized Maxwell fluids in a rectangular micropump under an AC electric field. *J Magn Magn Mater* 2015; 387: 111-117.
- [24] Selimefendigil F, Öztop HF. Numerical analysis and ANFIS modeling for mixed convection of CNT-water nanofluid filled branching channel with an annulus and a rotating inner surface at the junction. *Int J Heat Mass Transfer* 2018; 127: 583-599.
- [25] Selimefendigil F, Öztop HF. Magnetohydrodynamics forced convection of nanofluid in multi-layered U-shaped vented cavity with a porous region considering wall corrugation effects. *Int Commun Heat Mass Transfer* 2020; 113: 104551.
- [26] Mahmoudi AH, Pop I, Shahi M. Effect of magnetic field on natural convection in a triangular enclosure filled with nanofluid. *Int J Therm Sci* 2012; 59: 126-140.
- [27] Khanafer K, Vafai K, Lightstone M. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer* 2003; 46(19): 3639-3653.
- [28] Brinkman HC. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J Chem Phys* 1952; 20: 571-581.
- [29] Recebli Z, Selimli S, Gedik E. 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* 2013; 88: 410-417.