

Soğuk Şartlar Altındaki Bir Boruda MHD Nanoakışkanın Zorlanmış Taşınım ile Isı Transferi

Murat ERDEM^{*1}, Yasin VAROL², Müjdat FIRAT³

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

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

³ Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ muratrdm01@gmail.com, ² yvarol@gmail.com, ³ mujdatfirat@gmail.com

(Geliş/Received: 26/12/2020;

Kabul/Accepted: 01/02/2021)

Öz: Mevcut çalışmada manyetik alan etkisi altındaki bir boruda Al_2O_3 -su nanoakışkanının ısı transferi olgusu sayısal olarak incelenmiştir. Dış manyetik alan akışkan yönüne dik olarak uygulanmıştır. Yönetici denklemler ANSYS Fluent ticari yazılım programı ile çözülmüştür. Akışkan sıcaklığı (T_i) boru sıcaklığından (T_w) daha yüksek tutularak akışkanın soğuması sağlanmıştır. Reynolds sayısı (Re), Hartmann sayısı (Ha) ve nanoartikül hacimsel oranı (ϕ) sırasıyla, $Re=10, 100, 500, 1000, 2000$, $Ha=0, 25, 50, 100$ ve $\phi=0.01, 0.03, 0.05$ olarak seçilmiştir. Çalışmada, yerel Nusselt (Nu_x) ve ortalama Nusselt (Nu) sayısı detaylı olarak incelenmiştir. $Re=10$ hariç diğer Re sayılarında manyetik alan uygulanması ve nanopartikül eklenmesi hem yerel hem de ortalama Nu sayısını artırmıştır. Sabit Ha sayısı ve ϕ değerinde Re sayısının artmasıyla ısı transferi artmıştır. Sonuç olarak Re sayısı, Ha sayısı ve nanopartikül hacimsel oranıyla ısı transferinin arttığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Manyetohidrodinamik, Nanoakışkan, Zorlanmış taşınım, Isı transferi.

Heat Transfer with Forced Convection of MHD Nanofluid in a Pipe Under Cold Conditions

Abstract: In the present study, the heat transfer phenomena of Al_2O_3 -water nanofluid in a pipe under the magnetic field effect have been investigated numerically. The external magnetic field is applied perpendicular to the fluid direction. Government equations are solved with ANSYS Fluent commercial software programmer. The fluid temperature (T_i) was kept higher than the pipe temperature (T_w), allowing the fluid to cool. Hartmann number (Ha), Reynolds number (Re) and nanoparticle volume fractions (ϕ) have been selected as $Re=10, 100, 500, 1000, 2000$, $Ha=0, 25, 50, 100$ and $\phi=0.01, 0.03, 0.05$, respectively. In the study, Local Nusselt (Nu_x) and average Nusselt number (Nu) have been examined in detail. Except $Re = 10$, applying a magnetic field and adding nanoparticles in the other Re numbers have been increased both local and average Nu number. The heat transfer has raised with the increase Re numbers in the fixed Ha number and ϕ . As a result, it has been determined that the heat transfer increases with Re number, Ha number, and nanoparticles volume fraction.

Key words: Magnetohydrodynamics, Nanofluid, Forced convection, Heat transfer.

1. Giriş

Nanopartiküllerin ısı transferine olan etkisinin daha iyi anlaşılması için yapılan birçok bilimsel çalışma mevcuttur. Elektriksel iletkenliği olan akışkanların manyetik alan ile ısı transferini değiştirme tekniği literatürde son zamanlarda sıkça çalışılan öncü konulardan bir tanesidir. Nanoakışkan, nano boyuttaki parçacıkların temel akışkan içerisindeki süspansiyonudur. Bununla alakalı nanoakışkan terimi ilk kez Choi [1] tarafından kullanılmıştır. Konuyla alakalı bazı araştırmacılar düşük nanopartikül konsantrasyonlarında termal iletkenliğin yaklaşık % 20'ye kadar çıkabileceğini kanıtlamışlardır [1-4]. Diğer bir uygulama alanı olan Manyetohidrodinamik (MHD), manyetik alan altında elektriksel iletkenliğe sahip olan sıvıların davranışını inceleyen disiplinler arası bir araştırma 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 araştırmıştır. Bir dairesel kanal içindeki zorlanmış taşınım ile ısı transferi olayı da, güneş kolektörleri, enerji santralleri, yüksek performanslı kazanlar, soğutma-ısıtma sistemleri, kimyasal katalitik reaktörler ve diğer birçok akış hareketi ile ısı transferi uygulamaları gibi birçok teknolojik uygulamaların en önemli konularından biridir [6-10]. Literatürde, farklı nanopartikül tipi, nanopartikül hacimsel oranı, değişik geometri ve sınır şartları ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan bazılarını aşağıda verilmiştir. Erdem ve Varol [11], Cu-su nanoakışkanına dış manyetik alan uygulayarak akış karakteristikleri ve ısı transferini incelemişlerdir. Çalışmada özellikle yüksek Re sayılarında, manyetik alan ve nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla ısı transferinde iyileşme meydana

* Sorumlu yazar: muratrdm01@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-0287-1881, ² 0000-003-2989-7125, ³ 0000-0001-6978-9044

geldiğini ortaya koymuşlardır. Erdem [12] değişik nanoakışkan tipleriyle yaptığı çalışmada manyetik alanın ısı transferini arttırmada çok etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca Erdem vd. [13], bir boruda lityum sıvısı için, Erdem ve Varol [14] sıvı PbLi17 üzerinde yaptıkları sayısal çalışmada manyetik alanın akışkanın ısı transferini arttırdığını belirlemişlerdir. Öztürk [15], sabit ısı akısına maruz iki paralel plaka arasından, elektriksel iletkenliği olan bir viskoz akışkanın daimi, tam gelişmiş laminer ve bu akışa dik manyetik alanın varlığında ısı transferini analitik olarak incelemiştir. Knudsen sayısı (Kn), Brinkman sayısı (Br) ve Hartmann sayısının hız, sıcaklık dağılımı ve ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ha sayısının artmasıyla Nu sayısının arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca, Knudsen sayısı arttıkça, kanal duvarındaki sıcaklık atlamalarından dolayı Nu sayısının azaldığını tespit etmiştir.

Lu vd. [16], laminer ve türbülanslı akışlar için bir silindirik elektromanyetik akış ölçer için üç boyutlu MHD ile ilgili bazı simülasyonlarını ANSYS-FLUENT MHD modülünü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Her iki akış türü için 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 ölçerindeki elektrik potansiyeli dağılımının laminer 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. Tek bir küresel parçacığın sürüklenme kuvvetinin sürüklenen bir akış sınırında yaklaşık %15 kadar artabileceği ve indüklenen manyetohidrodinamik etkileşim kuvvetinin akış alanı ve manyetik akı yoğunluğuna büyük ölçüde bağlı olduğunu savunmuşlardır. Nayak vd. [18], sıcaklığa bağlı viskozite ile tel kaplama analizi için üçüncü derece bir sıvının ısı transferi ve sürekli MHD akışı nümerik ve analitik olarak çalışmışlardır. Manyetik alan uygulanmaksızın büyük Br sayılarının sıcaklık dağılımını artırdığı, sabit viskozite durumunda artan manyetik alanın akışkan hızını azalttığını açıklamışlardır. Reynolds modelinde ise, akışkanın newtonsal olmayan özelliği sıcaklığa bağlı değişebilen viskozite ile birlikte hızı arttırmak için uygun bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Muthuraj ve Srinivas [19], içinde gözenekli madde bulunan asimetrik dalgalı bir kanalda, MHD titreşimli akışın hareketini analitik olarak incelemiştir. Akış hızının radyasyon parametresi, Grashof (Gr) ve Pecklet (Pe) sayısındaki artışla artarken, Ha sayısının artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir. Anwar Bég vd. [20] tarafından, Darcian (Da) gözenekli bir ortama sahip iki paralel plaka arasında viskoz, sıkıştırılmaz manyetohidrodinamik bir akış için nümerik bir çözüm geliştirilmiştir. Da değeri ve basınç gradyanının artmasıyla hem birincil hem de ikincil hız alanının arttığı, fakat bu alanların Ha sayısının artmasıyla azaldığını gözlemlenmişlerdir. Bandyopadhyay ve Layek [21], dar bir kanalda manyetohidrodinamik akışı hem sürekli hem de vürcümlü akış için sonlu fark metodunu kullanarak zamana bağlı nümerik olarak çözmüşlerdir. Akış ayrılma bölgesinin manyetik parametrenin artmasıyla azaldığını, vürcümlü akıştaki duvar kayma gerilmesi tepe değerinin zamanla değiştiği ve bu değer maksimum akış hızında en büyük değeri aldığını, her iki akış şartlarında (sürekli ve vürcümlü) manyetik parametrenin sınır tabaka ayrışmasının uygulanan dış manyetik alan ile kontrol edilebileceğini rapor etmişlerdir. Huang ve Li [22], üstü açık dikdörtgen bir kanalda, kanallın altına yarı küresel çıkıntılı duvarlar (protrusion walls) yerleştirerek ısı transfer artırımını (Nu/Nu_0), akış karakteristikleri, sürtünme kayıplarını (f/f_0) ve termal performans sayısal olarak incelemiştir. Manyetik alan yoğunluğu $30 \leq Ha \leq 70$ arasında seçmişlerdir. Çıkıntılı ısı transfer katsayısını artırdığı ve Ha sayısının artmasının bu katsayının azalttığını elde ettikleri sonuçlarla ortaya koymuşlardır. Aminfar vd. [23], dikey bir halkada, manyetiklenme özelliğine sahip ferroakış zorlanmış taşınım kritik ısı akısı üzerindeki manyetik alanın etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneyde temel akışkan olarak su, nanopartikül olarak Fe_3O_4 kullanılmıştır.

Benzer şekilde doğal taşınım üzerinde Kefayati [24], bir dış manyetik kaynak varlığında lineer olarak ısıtılmış bir oyukta ferroakışkan doğal taşınım ısı dağılımının etkisini Lattice Boltzmann Methodu (LBM) yardımıyla nümerik olarak çalışmıştır. Çalışma sıvısı olarak gazyağı ve nano ölçekli kobalt parçacıklarının eklenmesiyle oluşan koloit karışımını oluşturmuştur. Sonuçlar, çeşitli Rayleigh (Ra) sayıları için ferromanyetik parçacıkların artması ısı transferini azalttığını göstermiştir. Sheikholeslami ve Ganji [25], sinüzoidal sıcak duvar ile yarı halka bir oyukta manyetik nanoakışkan ve ısı transferi üzerinde, dıştan uygulanan manyetik alanın etkisini nümerik olarak incelemiştir. Nu sayısının, Ra sayısı ve nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla arttığı ve Ha sayısının artmasıyla azaldığı vurgulanmıştır. Yazarlar ayrıca, düşük Ra sayısı için ısı transferi artırımının, Ha sayısının artan bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuşlardır. Malvandi vd. [26], dikey bir halka boruda Al_2O_3 -su ile dolu nanoakışkanın MHD karma taşınım üzerinde nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Borunun iki tarafına ısı akısı uygulanmıştır. Nanopartikül göçünün etkisini hesaplamak için Brownian hareket yöntemi kullanılmıştır. Isı transferi artırımında bir avantaj olarak görülen nanoakışkanın, manyetik alan varlığında ısı

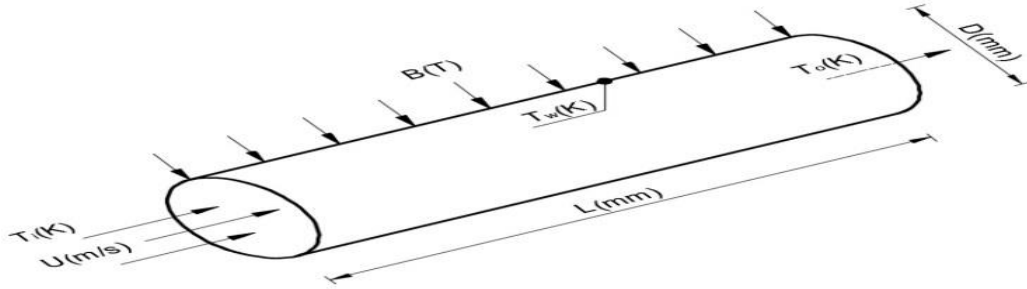
transferini azaltan bir parametre olduğu, fakat temel akışta Ha sayısının artmasıyla ısı transferinin arttığı ortaya konulmuştur.

Nanoakışkana manyetik alan uygulanması ile ısı transferi ve akış karakteristiklerinin incelenmesi günümüzde literatürde çok çalışılan konulardandır. Dünya nüfusunun artması ile enerji kaynaklarının tükenmesi insanoğlunu sürekli yeni ısı transferi tekniklerini araştırmaya sevk etmektedir. Bunlardan bir tanesi de nanopartikül eklenmesi ve manyetik alan şiddeti ile akışkanın kontrol edilerek ısı transferini iyileştirilmesi tekniğidir. Bu amaçla mevcut çalışmada, manyetik alana maruz bırakılan bir boruda Al_2O_3 -su nanoakışkanı ısı transferi açısından incelenmiştir. Bunun için Re sayısı, Ha sayısı ve nanopartikül hacimsel oranının etkisi detaylı olarak incelenmiş ve her bir parametrenin etkisi ayrı bir Şekil içerisinde gösterilerek hangi parametrenin daha baskın olduğunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Böylece, etkili olan parametre daha net olarak belirlenmiştir. Nanoakışkanın manyetik alan kuvveti ile kontrol edilebilmesinde ve yüksek Re sayılarında ısı transferini artırmada çok etkili bir yöntem olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

2. Materyal ve Metot

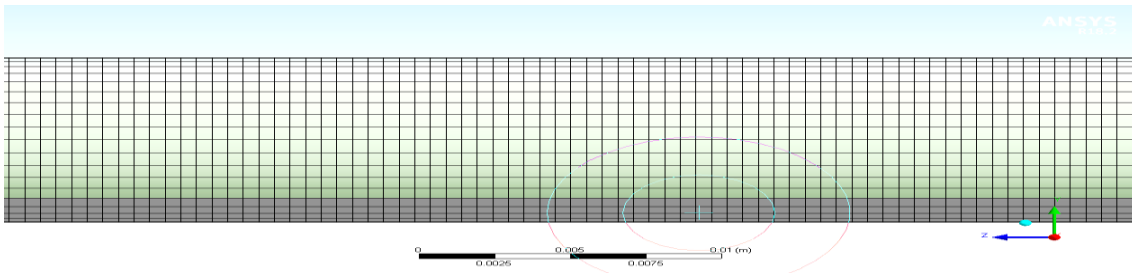
2.1. Problem Tanımlanması ve Ağ Yapısı

Bu çalışmayı analiz etmek için üç boyutlu dairesel bir kanal kullanılmıştır. Kullanılan boru modeli Şekil 1’de gösterilmiştir. Boru çapı 10,92 mm’ye karşılık gelen, boru kalınlığı 0.89mm standart 1/2" plastik boru kullanılmış ve malzeme özellikleri programda buna göre tayin edilmiştir. Akışkan giriş ve duvar sıcaklıkları sırasıyla $T_i=50$ ve $T_w=30^\circ C$ olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Üç boyutlu dairesel kanal modeli (T_i : Akışkan giriş sıcaklığı, $U=V$: Akışkan giriş hızı, B : Manyetik alan şiddeti, T_w : Cidar sıcaklığı, T_o : Çevre sıcaklığı, L : Boru uzunluğu, D : boru çapı)

Boru ANSYS-FLUENT’te beş katı parçaya bölünerek oluşturulmuştur. Borunun ortasına kare-karşıt kesitli bir geometri ile ayrılarak borunun bölünmesi sağlanmıştır. Bu şekilde ağ yapısı çok daha kaliteli olmaktadır. Bu ağ yapısı Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ağ yapısında herhangi bir sapma (yamuk, yan, birbirini kesme vb.) yoktur. Literatürde bunun programdaki zorluklarından dolayı ağ yapısı genelde tek parça olarak oluşturulmaktadır. Ancak bu yöntem bölünmüş ağ yapısı kadar verimli değildir. Bu yüzden geometrinin bölünerek oluşturulması önerilmektedir. Bununla ilgili daha kapsamlı bilgiler Erdem [12] tarafından ispatlanmıştır. Çalışmada kullanılan ağ yapısının düğüm sayısı ve hücre sayısı sırasıyla 202669 ve 194000’dir. Mesh Orthogonal (dörtgensel) ve Skewness (sapma) değerleri de sırasıyla 0. 0.97116 ve 8.8444e-002’dir. Orthogonal kalitesi 1 değerine yaklaştıkça mesh kalitesi de aynı oranda artmaktadır. Bu veriler literatüre göre oldukça iyi olduğu düşünülebilir. Burada geometrinin bölünerek yapılmasının etkisi oldukça büyüktür.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan ağ yapısı

2.2. Sayısal Hesaplamalar

ANSYS-FLUENT ticari yazılım programının içinde mevcut olan MHD modülü ile bu sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. 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. Nanopartiküller küresel-şekilli boyut olarak çok küçük olduğundan nanoakışkan tek bir faz gibi davranmaktadır. Bu yüzden hesaplamalar tek fazlı akışkan olarak gerçekleştirilmiştir.

Boyutlu Navier-Stokes denklemleri Eş. 1-3 ile belirlenmektedir [27,28]:

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

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

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

\vec{F} , Lorentz kuvvetinden kaynaklanan kaldırma ve cisim kuvveti Eş. 4 ile ifade edilir [27, 29].

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

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

\vec{J} , elektrik akım yoğunluğu Ohm yasası ile bulunmuştur:

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

\vec{E} , DC elektrik akımıdır ve \vec{B} , z yönündeki manyetik alandır. Böylece, manyetik alan ve elektrik akımı birbirine diktir ve bu da x ve y yönlerinde Lorentz kuvvetine neden olmaktadır. Baz akışkan ve nanopartiküllerin termodinamik özellikleri Kaynak [12]'den alınmıştır. $T_i=50^\circ\text{C}$ referans giriş sıcaklığında nanoakışkanın termodinamik özellikleri aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır.

Nanoakışkanın yoğunluğu Eş. 6 ile hesaplanmaktadır.

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

Nanoakışkanın özgül ısı kapasitesi Eş. 7 ile bulunur.

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_s \quad (7)$$

Nanoakışkanın termal iletkenliği (k_{nf}) takip edilen Eş. 8, Maxwell-Garnett's (MG modeli) ile hesaplanır.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (8)$$

Eş. 9 ve Eş. 10, sırasıyla nanoakışkanın dinamik viskozitesini (Brinkman modeli) ve Ha sayısını hesaplamak için kullanılır (ν_f -akışkanın kinematik viskozitesi).

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (9)$$

$$Ha = BR \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f}} \quad (10)$$

Yerel Nusselt sayısı, sıcak duvarın kenarındaki ısı dengesinden (Eş. 11) elde edilmektedir [1].

$$Nu_x = \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{(\partial T / \partial n)L}{(T_w - T_i)} \quad (11)$$

Ortalama Nusselt sayısı (Nu), yerel Nusselt sayılarının kanal uzunluğu (L) boyunca entegre edilerek hesaplanır (Eş. 12).

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (12)$$

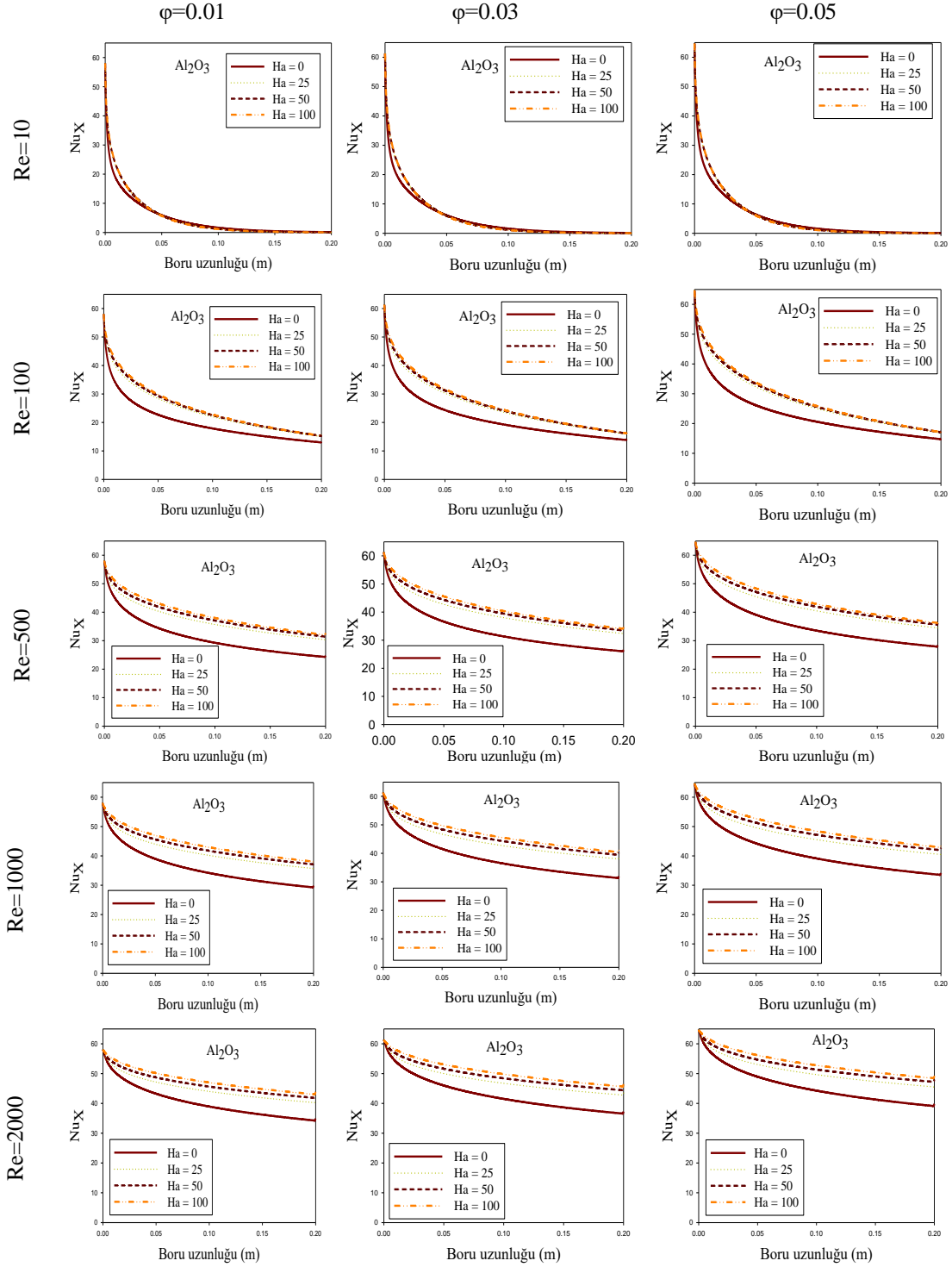
3. Sonuçlar ve Tartışma

Sıcak akışkanla duvar arasındaki sıcaklıktan hesaplanan yerel Nu değerlerinin boru uzunluğu boyunca değişimleri çalışma kapsamında irdelenmiştir. Detaylı olarak incelenen çalışmadan Re sayısı, Ha sayısı ve nanopartikül hacimsel oranının Nu değerlerini önemli oranda iyileştirdiği anlaşılmıştır. Kapsamlı sonuçlar grafik olarak sunulmuştur.

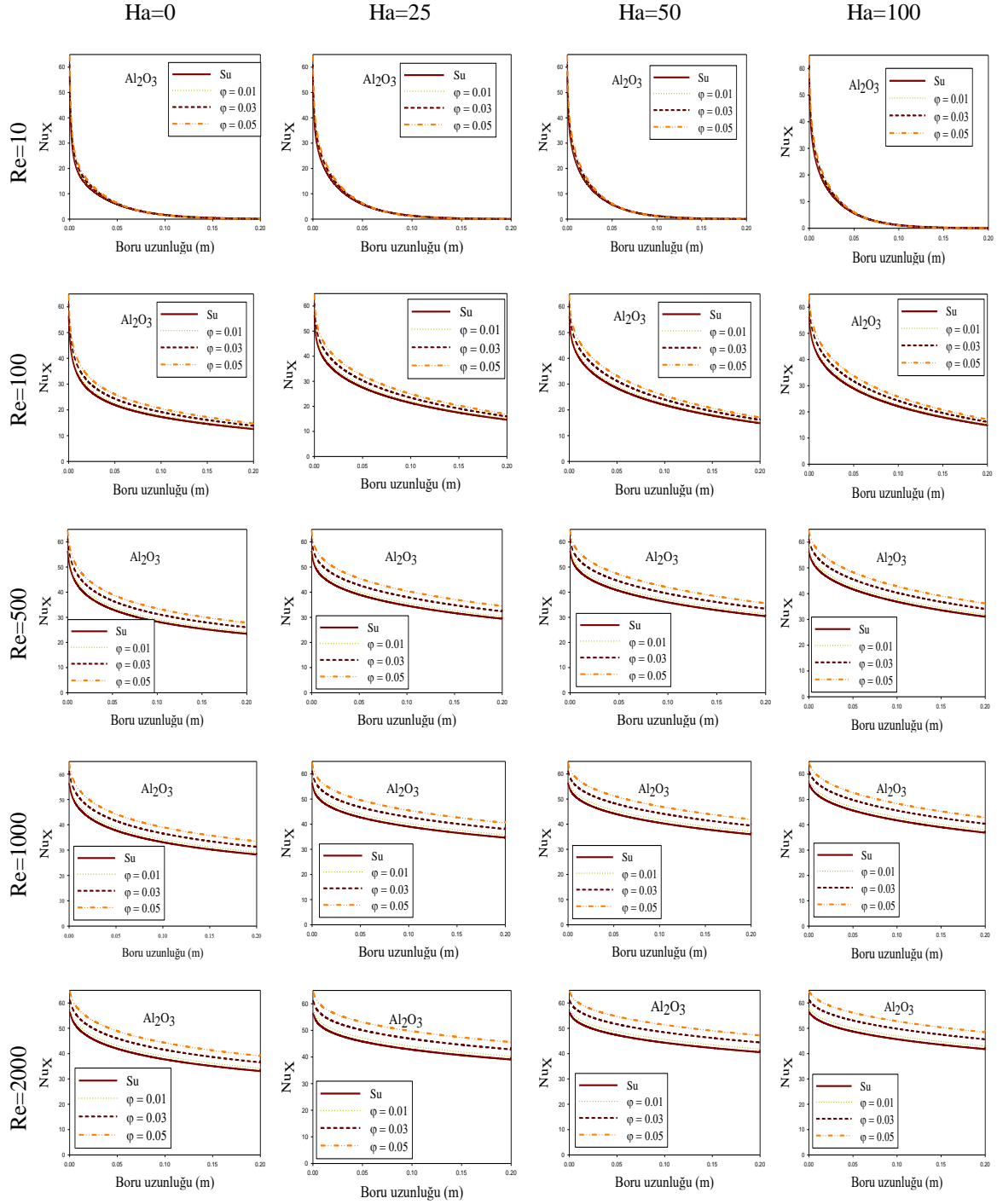
Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki Al_2O_3 -su nanoakışkanına ait yerel Nu sayılarının boru uzunluğu boyunca Ha sayısı değişimleri Şekil 3'te verilmiştir. En düşük Re sayısına sahip akışkan için kanalın yaklaşık 0.04m mesafesine kadar yerel Nu sayısının, manyetik alan kuvvetinin etkisi ile saf akışkana göre önce arttığı ve bu noktadan sonra değerlerin azaldığı tespit edilmiştir. Bu değerler Ha=25 için $Nu_x=5.845$, Ha=50 için $Nu_x=6.231$, Ha=100 için $Nu_x=6.750$ değerinden sonra azalarak saf akışkandan daha az değerler almaya başlamıştır (Re=10- $\phi=0.01$). Re=10 ve $\phi=0.03$ parametresi için, sırasıyla Ha=25, 50 ve 100 değerlerinde Nu_x sayıları sırasıyla $Nu_x=6.280$, 6.832 ve 7.436 değerinden sonra saf akışkana göre azalmaya başlamıştır. Aynı şekilde Re=10 ve $\phi=0.05$ için, sırasıyla Ha=25, 50 ve 100 için yerel Nu değerleri, $Nu_x=6.799$, 7.426, 7.973 değerlerine ulaştıktan sonra saf akışkana göre azalma eğilimine geçmiştir. Bu değişim, çalışma kapsamında elde edilen en önemli sonuçlardan bir tanesidir. Bu durumun nedeni, akışkan hızının oldukça düşük olması ve manyetik alan kuvveti ile akışkan hızının daha da azalmasından kaynaklanmaktadır. Başka bir deyişle taşınım olayının belirli bir noktadan sonra çok az gerçekleşmesi olarak da açıklanabilir. Burada doğal taşınım olayına benzer bir sonuç ortaya çıkmıştır. İletim taşınımından daha baskın olmuştur. Ayrıca Re = 10 parametresinde manyetik alanın ısı transferini arttırdığı, ancak manyetik alan kuvvetlerinin birbirlerine göre neredeyse hiç ısı transferini değiştirmediği tespit edilmiştir. Re=100'de manyetik alan şiddetinin yerel Nu sayısını artırdığı ve kanalın sonuna doğru aşağı-yukarı birbirine eşitlendiği görülmektedir. Diğer üç Re sayısında (500, 1000, 2000) Ha sayısının artmasıyla birlikte yerel Nu sayılarında artış olduğu daha net olarak anlaşılmış ve kanalın girişinden çıkışına kadar bu artış düzenli olarak devam etmiştir. Re sayısının artmasıyla orantılı olarak meydana gelen yerel Nu sayısı değişimi daha fazla olmuştur. Kanalın tam girişindeki yerel Nu sayılarının değerleri, nanopartikülün eklenmesinin ısı transferini iyileştirdiğini kanıtlamaktadır.

Nanopartikül eklenmesi ile akışkan üzerinde meydana gelen ısı transferi olayını daha net anlamak için, Şekil 4'te Al_2O_3 -su nanoakışkanının farklı nanopartikül hacimsel oranlarında yerel Nu sayılarının karşılaştırılmaları gösterilmiştir. Manyetik alan şiddetinin olmadığı (Ha=0) ve olduğu (Ha=25, 50 ve 100) durum ile beş farklı Re sayısı (Re=10, 100, 500, 1000, 2000) için sonuçlar gözlemlenmiştir. Şekil incelendiğinde nanopartiküllerin ısı transferi üzerinde çok etkili olduğu net şekilde görülmüştür. Nanopartikül hacimsel oranın yüksek değerlerinde yerel Nu sayısı daha fazla çıkmıştır. Diğer grafiklerin tümünde kanal boyunca nanopartiküllerin katkısıyla ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Yerel Nu ile ilgili daha önceki sonuçlarda açıklandığı gibi bu durumun akışkanın çok yavaş hareket etmesi ile akışkan taşınımının çok az meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yani iletimle olan ısı transferi mekanizmasının taşınım ile olan ısı transferine göre daha baskın olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

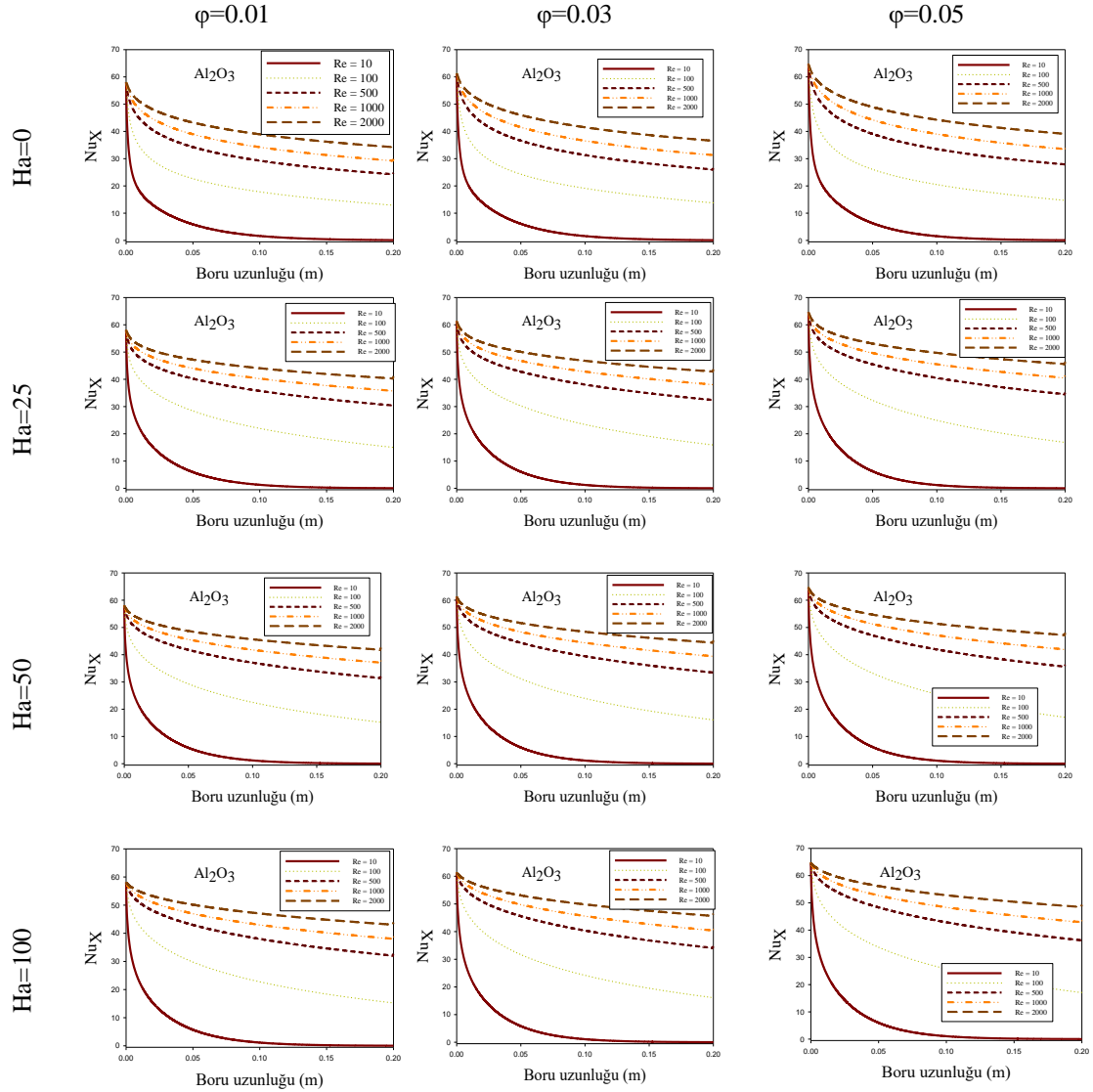
Şekil 5'de Al_2O_3 -su nanoakışkanının üzerinde farklı Ha sayıları ve nanopartikül hacimsel oranlarında Re sayısı etkisi sunulmuştur. Ortaya çıkan sonuçlar beklenildiği gibi Re sayısının ısı transferini arttırmada çok etkili olduğu belirlenmiştir. Çalışılan bütün parametrelerde Re sayısının artmasıyla daha fazla akışkan taşındığından ısı transferi çok ciddi bir oranda artmıştır.



Şekil 3. Al_2O_3 – su nanoakışkanının boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayısının Ha sayısı ile değişimi

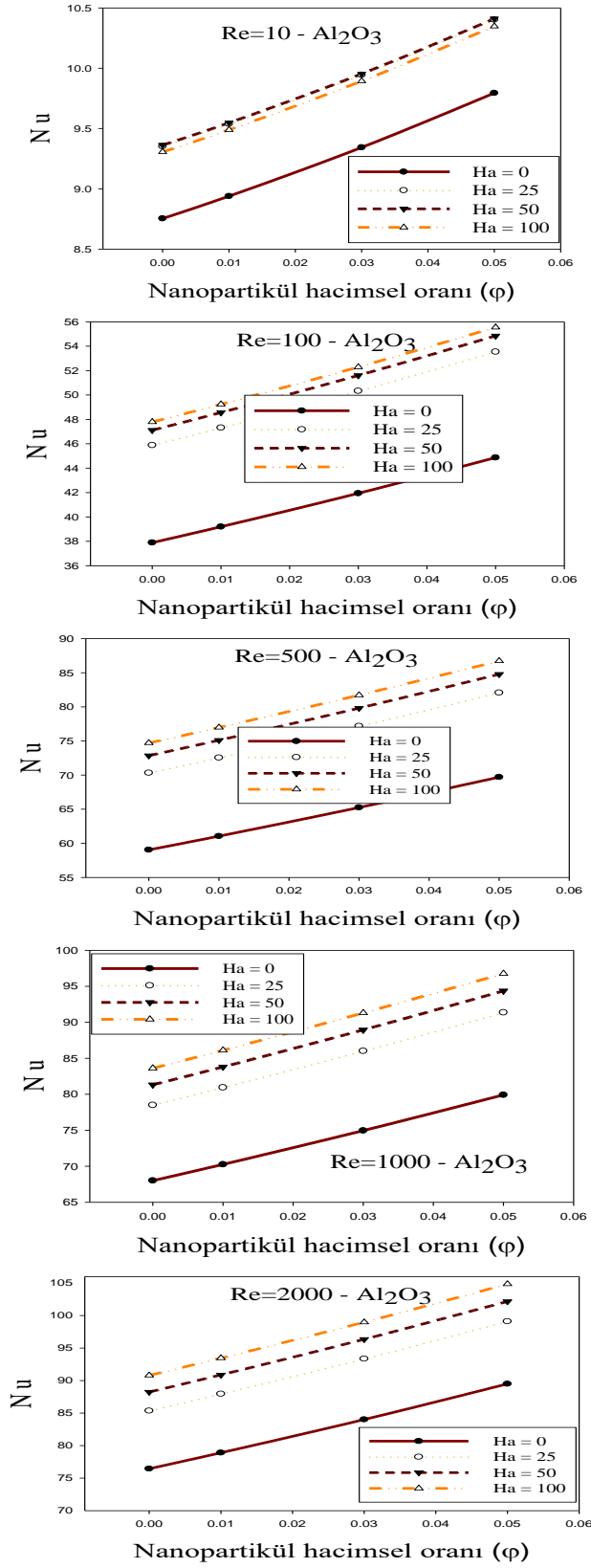


Şekil 4. Al₂O₃ – su nanoakışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının nanopartikülle değişimi



Şekil 5. Al_2O_3 – su nanoakışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının Re sayısı ile değişimi

Elde edilen ortalama Nu değerlerinin nanopartikül hacimsel oranıyla değişimi farklı Re ve Ha değerleri için Şekil 6’da verilmiştir. Re=10 hariç bütün çalışma parametrelerinde Ha sayısı, Re sayısı ve nanopartikül hacimsel oranı ortalama Nu sayısı üzerinde arttırıcı bir etki meydana getirmiştir. Ancak Re=10’da 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 bahsedilen akışkanın çok yavaş hareket etmesi durumu etkili olmuştur. Yerel Nu sayılarında da ısı transferinin kanalın yaklaşık $\frac{1}{4}$ ’ünden sonra azalma eğilimi gösterdiği ve toplamda iletim değerlerinin taşınım değerlerinden daha fazla olduğu belirtilmişti. En düşük ortalama Nu sayısı, su ($\phi=0$), Re=10 ve Ha=0 için Nu=8.753 iken, en yüksek değer $\phi=0.05$, Re=2000 ve Ha=100 için Nu=104.843 olarak elde edilmiştir. Burada düşük Re sayısından sonra elde edilen diğer sonuçlar Heidary vd. [6] ile Erdem ve Varol [11] tarafından, ortalama Nu sayısı, nanopartikül hacimsel oranı ve Ha sayısı arasındaki ilişkiyi incelerken gerçekleştirdikleri sayısal sonuçlarla oldukça uyumlu bir eğilim göstermiştir.



Şekil 6. Al₂O₃-su nanoakışkanının ortalama Nu sayısı üzerinde φ, Re ve Ha etkisi

4. Sonuç

Al_2O_3 -su nanoakışkanı için ısı transferi olayı, manyetik alana maruz olan bir boruda sayısal olarak incelenmiştir. Farklı Re, Ha ve nanopartikül hacimsel oranlarının etkisini görmek için elde edilen sonuçlar, bu parametrelerin ısı transferi üzerinde çok etkili olduğunu göstermektedir. Beklenildiği gibi Re sayısı ile hem yerel hem de ortalama Nusselt sayısı artmıştır. Re=100, 500, 1000 ve 2000 için, manyetik alan ve nanopartikül eklenmesi ile birlikte yerel ve ortalama Nu sayısı artmıştır. Re=10 için manyetik alan ve nanopartikül hacimsel oranının artması ile birlikte yerel Nu sayılarında hem azalma hem de artma meydana gelmiştir, bu durum (azalma) akışkanın çok az hareket ettiğinden kaynaklanmaktadır. Ancak, Re=10 şartında ortalama Nu sayısı nanopartikül ile artarken, Ha sayısının 50'den 100'e geçerken azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durumda çalışma kapsamında elde edilen önemli sonuçlardan bir tanesidir. Nanoakışkanların etkisini daha iyi anlamak için farklı geometrilerde, farklı sınır şartlarında hem deneysel hem de sayısal çalışmalar gerçekleştirilerek daha önemli sonuçların elde edilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu sayısal 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 JA. 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(6): 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(1): 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] Nayak MK, Dash GC, Singh LP. Steady MHD flow and heat transfer of a third grade fluid in wire coating analysis with temperature dependent viscosity. Int J Heat Mass Transfer 2014; 79: 741-754.
- [19] Muthuraj R, Srinivas S. A note on heat transfer to MHD oscillatory flow in an asymmetric wavy channel. Int Commun Heat Mass Transfer 2010; 37: 1255-1260.

- [20] Anwar Bég O, Sim L, Zueco J, Bhargava R. Numerical study of magnetohydrodynamic viscous plasma flow in rotating porous media with Hall currents and inclined magnetic field influence. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 2010; 15: 345-359.
- [21] Bandyopadhyay S, Layek GC. Study of magnetohydrodynamic pulsatile flow in a constricted channel. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 2012; 17: 2434-2446.
- [22] Huang H, Li B. Heat transfer enhancement of free surface MHD-flow by a protrusion Wall. *Fusion Engineer Design* 2010; 85(7-9): 1496-1502.
- [23] Aminfar H, Mohammadpourfard M, Maroofiazar R. Experimental study on the effect of magnetic field on critical heat flux of ferrofluid flow boiling in a vertical annulus. *Experiment Thermal Fluid Sci* 2014; 58: 156-169.
- [24] Kefayati GHR. Natural convection of ferrofluid in a linearly heated cavity utilizing LBM. *J Molecul Liquids* 2014; 191: 1-9.
- [25] Sheikholeslami M, Ganji DD. Ferrohydrodynamic and magnetohydrodynamic effects on ferrofluid flow and convective heat transfer. *Energy* 2014; 75: 400-410.
- [26] Malvandi A, Safaei MR, Kaffash MH, Ganji DD. MHD mixed convection in a vertical annulus filled with Al₂O₃-water nanofluid considering nanoparticle migration, *J Magn Magn Mater* 2015; 382: 296-306.
- [27] 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.
- [28] Bejan A. *Convection heat transfer*. John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 1995.
- [29] 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.