

NANOAKIŞKAN KULLANILAN U-DÖNÜŞLÜ ÇİFT BORULU ISI DEĞİŞTİRİCİSİ AKIŞININ SAYISAL ANALİZİ

Hüseyin KAYA^{1*}, Recep EKİCİLER²

¹Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği
Bartın, Türkiye

²Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Ankara, Türkiye

hkaya@personel.bartın.edu.tr (ORCID 0000-0003-0575-0161)

recepekiciler@gazi.edu.tr (ORCID 0000-0003-1367-9465)

Özet

Bu çalışmada, farklı hacimsel konsantrasyondaki su bazlı Al₂O₃, CuO, SiO₂, ZnO nanoakışkanları, U-dönüş dirsekli çift borulu ısı değiştiricinin bir iç borusundaki akışın taşınım ısı transferi ve sürtünme faktörü performansı sayısal olarak incelenmiştir. Türbülanslı akış şartlarında gerçekleştirilen hesaplamalarda nanoakışkanların hacimsel konsantrasyonları %1.0, %2.0, %3.0 ve %4.0 olarak belirlenmiş ve sonuçlar bu değerler için elde edilmiştir. Reynolds sayı aralığı 15000 – 30000 kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile hesaplamalar yapılmış olup en yüksek Nusselt sayısı, %4.0 hacimsel konsantrasyonuna sahip Al₂O₃/su nanoakışkanı için %51.9 artış oranı ile elde edilmiştir. Nanoakışkan hacimsel konsantrasyonunun artması ile Nusselt sayısı artarken Darcy sürtünme katsayısı değerinde nanoakışkan tipi ve hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak bir değişim gözlenmemiştir.

Anahtar Kelimeler: HAD, Nanoakışkan, Zorlanmış taşınım, Isı değiştirici

NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW IN A DOUBLE PIPE HEAT EXCHANGER WITH U-RETURN BEND

Abstract

In this study, water-based Al₂O₃, CuO, SiO₂, ZnO nanofluids at different volume concentrations, convection heat transfer and friction factor performance of the flow in an inner pipe of a double-tube heat exchanger with a U-return bend were numerically investigated. Calculations were performed under turbulent flow conditions and the

volume concentrations of nanofluids were specified as 1.0%, 2.0%, 3.0% and 4.0%. Calculations were conducted by using CFD method for Reynolds number range 15000 - 30000, and the highest Nusselt number was obtained with 51.9% enhancement for Al₂O₃/water nanofluid with 4.0% volume concentration. While the Nusselt number increased with the increase in the nanofluid volume concentration, no change was observed in the Darcy friction coefficient depending on the nanofluid type and volume concentration.

Keywords: CFD, Nanofluid, Forced convection, Heat exchanger

1. Giriş

Mühendislikte ısı transferi uygulamaları oldukça önemli bir yer tutmakta olup ısı değiştirici uygulamaları yaygın olarak tüm endüstrilerde kullanılmaktadır. Metal sanayisinde, gıda endüstrisi, tekstil sanayi vb. alanlarda ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılmaktadır. Karşıt akışlı ısı değiştiriciler yaygın olarak kullanılan tipler olup bunlarda çalışma akışkanı olarak genellikle su, etilen glikol gibi konvansiyonel akışkanlar kullanılmaktadır [1]. Isı transfer ekipmanlarında eğimli borulara genellikle rastlanmaktadır [2]. Birçok uygulamada ısı transferi performansının artırılması araştırmacılar için her daim önemli olmuştur [3]. Bu nedenle, bu alanda yapılan araştırmalar daha çok daha verimli çalışma akışkanları elde etmek ve uygulamada kullanmak için yapılmaya devam etmektedir. Nanoakışkan olarak bilinen diğer akışkanlara göre yeni sayılabilecek akışkan tipinin üretimi ve ısı transferi uygulamalarında kullanımı ile ilgili çalışmalar son on yılda oldukça popüler hale gelmiştir [4–7]. Nanoakışkanlar, geleneksel ısı transferi akışkanlarına nano boyuttaki metal, metal oksit, karbon nanotüp partiküllerinin homojen dispersiyonu ile üretilebilmektedir. Bu tip akışkanların en önemli özelliğinin stabilizasyonun elde edilmesi olup, termal performans ancak bu şekilde artma eğilimi göstermektedir [8]. En büyük sorunlar burada ortaya çıkmakta olup bunlar topaklaşma ve çökelmedir. Bunlardan kaçınabilmek için nanoakışkan üretimi esnasında farklı yöntemler bulunmakta olup bunlardan en çok uygulananı homojen stabilizasyon için ajan (surfactant) kullanmaktır [9,10]. Partiküller arasındaki kuvvetlerin dengelenerek zeta potansiyel değerlerinin çökelme ve topaklaşma olmayacak düzeyde tutulabilmesini sağlamaktadır [11–13].

Elias vd. tarafından yapılan çalışmada farklı partikül şekillerine sahip %50-%50 su etilen glikol bazlı Böhmit alümina nanopartikülleri ile nanoakışkanlar (%0.2 - %1.0) üretilmiş ve çift borulu ısı değiştiricisinde çalışma akışkanı olarak kullanılmıştır. Akış alanına farklı açılarda tamponlar yerleştirilmiş ve laminar akış şartlarında en yüksek ısı transferi katsayısı 20° tampon açısında silindirik partiküllerle elde edilmiştir [14]. Isı değiştiricisinde nanoakışkan kullanımı ile yapılan diğer bir çalışmada helisel sargılı ısı değiştiricide CuO/su ve TiO_2 /su nanoakışkanları laminar akış şartlarında HAD yöntemiyle incelenmiştir. En yüksek %2.0 hacimsel konsantrasyonun kullanıldığı çalışmada en yüksek ısı değiştirici etkenliği CuO/su nanoakışkanı ile %90 olarak bu konsantrasyonda elde edilmiştir. Aynı şartlarda Nusselt sayısı (Nu) artışı ise %97 olarak gerçekleşmiştir [15]. Zamzaman vd. tarafından çift borulu ve plakalı ısı değiştiricisinde Al_2O_3 /etilen glikol ve CuO/etilen glikol nanoakışkanları çalışma akışkanı olarak kullanılmış ve çift borulu değiştiricide ağırlıkça %1.0 Al_2O_3 konsantrasyonu için %26 ve ağırlıkça %1.0 CuO konsantrasyonu için %37 Nu sayısı artışı gözlemlenmiştir. Plakalı ısı değiştiricisi için aynı şartlarda ısı transferi iyileştirmeleri ise sırasıyla Nu sayısı için %38 ve %49 olarak elde edilmiştir [16]. Laminar zorlanmış bileşik taşınım akış şartlarında, su bazlı Al_2O_3 , SiO_2 , CuO ve ZnO nanoakışkanları farklı kesitli blokaj (dairesele, kare ve üçgen kesitli) bulunan ileri basamaklı bir kanalda ısı transferi performansı çalışması gerçekleştirilmiştir. Partikül çapı ve hacimsel konsantrasyon parametrelerinin Nu sayısına etkisi incelenmiş olup, partikül çapı küçüldüğünde ve hacimsel konsantrasyonun arttığında Nu sayısının artış gösterdiği belirlenmiştir [17]. CuO/su nanoakışkanı türbülator yerleştirilmiş dairesele kesitli bir ısı değiştiricisinde çalışma akışkanı olarak kullanılmış ve ısı transferi ve entropi üretimi türbülanslı akış şartlarında HAD çalışması yapılmıştır. Türbülator dönüş açısının artması sürtünme ile oluşan entropi üretimini arttırdığı belirlenmiştir. Isı transferi ve sürtünme ile oluşan entropi üretimi ile Bejan sayısı için yeni korelasyonlar önerilmiştir [18]. Bahmani vd. tarafından çift borulu ısı değiştiricisinde Al_2O_3 /su nanoakışkanı kullanılmış olup Nu sayısı ve ısı verim analizi sonlu hacimler metodu ile sayısal olarak yapılmıştır. Akış türbülanslı olup %1.0 hacimsel konsantrasyonlu nanoakışkan ile %32.7 Nu sayısı ve %30 ısı verim artışı sağlanmıştır [19].

Literatür araştırması dikkate alındığında, bu tip bir ısı değiştiricisinde dört farklı nanoakışkan ile karşılaştırmalı çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu çalışma genel bir ısı

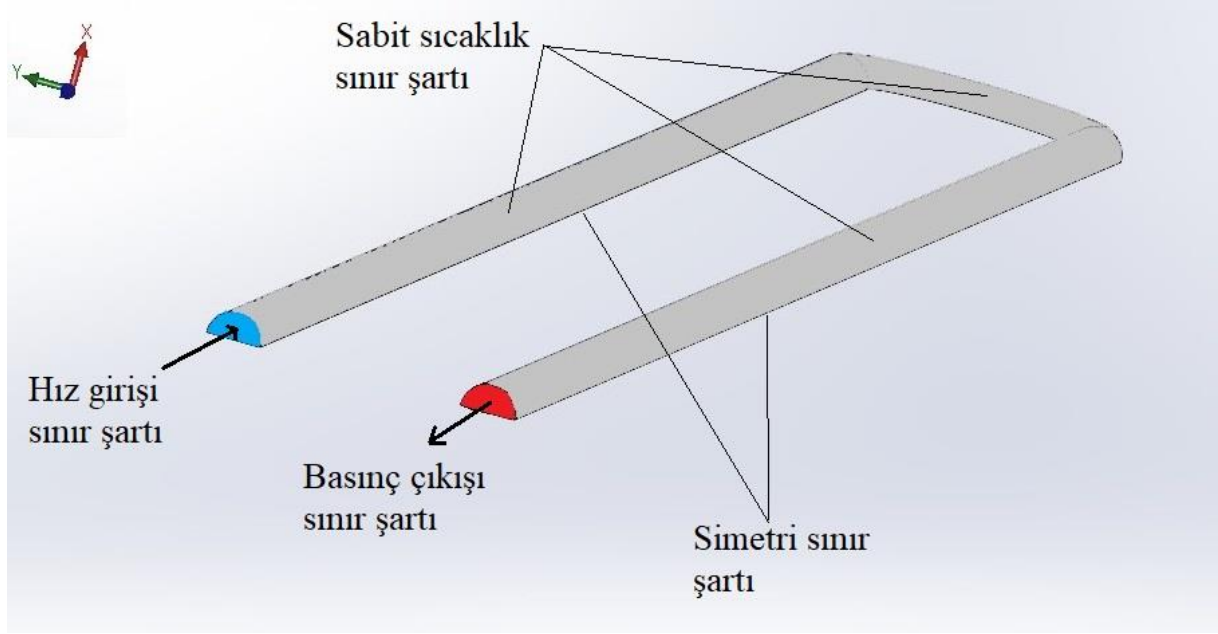
değiştirici tipi olan çift borulu ısı değiştiriciden çalışma akışkanı olarak farklı nanoakışkanların (Al_2O_3/su , CuO/su , SiO_2/su , ZnO/su) kullanılması ile ısı transferi performansının davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül çapları eşit alınmış olup 30 nm'dir. Literatürde genel kabul görmüş optimum hacimsel konsantrasyon olan %4.0 en yüksek olmak üzere ilaveten %1.0, %2.0, %3.0 hacimsel konsantrasyonlar belirlenmiş ve HAD analizleri yapılmıştır. %4.0 değerinin üzerindeki ısı transferindeki artışların viskozite ve kayma gerilmesi nedeniyle daha düşük değerlerde kaldığı belirtilmiştir [20].

2. Materyal ve Metot

Bir U-dönüslü karşıt akışlı ısı değiştirici için HAD modeli oluşturulmuş ve Şekil 1'de şematik gösterimi ve sınır şartları belirtilmiştir. Kullanılan ısı değiştiricisinin hesaplama için ele alınan kısmının iç boru çapı 0.019 m, halka boru çapı 0.05 m ve akış bölgesinin toplam uzunluğu 5.0 m olup eşanjör çift boru tipindedir. Termofiziksel özellikler yığın sıcaklık (T_b) için hesaplanmıştır.

HAD çalışmalarında eşanjör girişinde düzgün sıcaklık (20 °C) ve hız profilleri uygulanmıştır. Reynolds sayısı (Re) 15000 – 3000 arasındaki değerlere karşılık gelen hız değerleri hız girişi sınır şartı olarak uygulanmıştır. Isı değiştirici çıkış kısmında ise basınç çıkışı sınır şartı tanımlanmıştır. Isı değiştirici duvarlarında kaymama sınır koşulu uygulanmıştır. Isı değiştiricinin diğer yüzeyi ısıtma suyunun sabit sıcaklığından etkilenmekte olup, bu nedenle, ısı eşanjörünün dış yüzeyine homojen bir sıcaklık uygulanırken, geri kalanı çevresel etkilerden termal olarak izole edilmiştir. Buna istinaden ısı değiştirici borusu dış kısmına 100 °C sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır. Akış yönü olan z-ekseninde simetri sınır şartı uygulanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan kabuller şu şekildedir: (i) Kanaldaki hem ısı transferi hem de akış üç boyutlu, tek fazlı ve kararlı durumdadır; (ii) akış sıkıştırılmaz ve türbülanslıdır; (iii) nanoakışkanın yoğunluk, özgül ısı, termal iletkenlik ve viskozite gibi fiziksel özellikleri sıcaklıktan bağımsız olarak alınmıştır; (iv) kaldırma etkisi, viskoz yayılma ve radyasyonla ısı transferi ihmal edilebilir; (v) baz akışkan ve nanopartiküller termal denge içindedir.



Şekil 1. Sınır şartları ve modelin şematik gösterimi

HAD analizleri, türbülanslı akış modellerinden k-epsilon (k-ε) modeli ile gerçekleştirilmiştir. k-ε modeli, en yaygın türbülans modellerinden biridir, ancak büyük ters basınç gradyanları durumunda iyi performans göstermez. İki denklemlidir, yani akışın türbülanslı özelliklerini temsil etmek için iki ekstra transport denklemi içerir. Bu, iki denklemlidir bir modelin türbülanslı enerjinin konveksiyonu ve difüzyonu gibi geçmiş etkilerini hesaba katmasına izin verir.

Üç boyutlu türbülanslı akış için süreklilik momentum ve enerji denklemleri aşağıda verilmiştir [21].

Süreklilik:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

x, y ve z momentum:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Enerji:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

Denklemlerde belirtilen değişkenlerden ρ , ν ve α sırasıyla çalışma akışkanının yoğunluk, kinematik viskozite ve termal difüzyon katsayısıdır. İki denklemlilikli türbülans modeli için kullanılan türbülans kinetik enerji ve türbülans dağılım oranı denklemleri (6) ve (7) ile verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (7)$$

G_k ve G_b sırasıyla ortalama hız gradyanlarına ve kaldırma kuvvetine dayalı türbülans kinetik enerjisi üretimidir. Y_M , sıkıştırılabilir türbülans için dalgali dilatasyon terimidir. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ sabitler olup, σ_k ve σ_ε , k ve ε için Prandtl sayılarıdır.

Nanoakışkanın ısı transfer performansını değerlendirmek için anahtar parametreler, termofiziksel özelliklerdir. Termofiziksel özelliklerin önemi nedeniyle, nanoakışkanların taşınım ısı transferinin incelenmesinden önce, nanoakışkanın özellikleri doğru bir şekilde belirlenmelidir. Nanoakışkanların termofiziksel ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi, nanoakışkanların ısı transferi performansının değerlendirilmesinde ilk adımdır. Nanopartiküllerin baz akışkanda stabil olduğu ve sonuç olarak nanopartiküllerin hacim konsantrasyonlarının alan boyunca tekdüze olduğu varsayılmaktadır. Bu durum, nanoakışkan CFD analizi için fiziksel özelliklerinin ölçümü için uygun bir varsayımdır. Her bir nanoakışkan için termofiziksel özellikler (8)-(11) denklemler kullanılarak hesaplanmıştır [22]. Her bir partikülün ve saf suyun termofiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

$$\rho_{nf} = \left(\frac{\phi}{100}\right)\rho_p + \left(1 - \frac{\phi}{100}\right)\rho_f \quad (8)$$

$$C_{nf} = \frac{\frac{\phi}{100}(\rho C)_p + \left(1 - \frac{\phi}{100}\right)(\rho C)_f}{\rho_{nf}} \quad (9)$$

$$k_{nf} = k_f (0.8938) \left(1 + \frac{\phi}{100}\right)^{1.37} \left(1 + \frac{T_{nf}}{70}\right)^{0.2777} \left(1 + \frac{d_p}{150}\right)^{-0.0336} \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_f}\right)^{0.01737} \quad (10)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f \left(1 + \frac{\phi}{100}\right)^{11.3} \left(1 + \frac{T_{nf}}{70}\right)^{-0.038} \left(1 + \frac{d_p}{170}\right)^{-0.061} \quad (11)$$

Tablo 1. Saf su ve nanopartiküllerin 20 °C için termofiziksel özellikleri [23]

	Saf su	Al ₂ O ₃	CuO	SiO ₂	ZnO
k [W/m.K]	0.613	38.5	17.9	1.4	27.2
c_p [J/kg.K]	4179	778	536	710	494
ρ [kg/m³]	997	3980	6500	2200	5600
μ*10⁶ [kg/m.s]	855	-	-	-	-

Isı transferi performansını incelemek için farklı Reynolds sayılarında HAD analizleri yapılmış ve çalışma akışkanı olarak nanoakışkan kullanılan ısı eşanjörü için Nusselt sayısı ve sürtünme katsayısı değişimi incelenmiştir. Taşınım ısı transferi katsayısı, Re sayısı, Nu sayısı ve Darcy sürtünme katsayısı (12) – (15) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_s (T_w - T_b)} \quad (12)$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D_h \mu} \quad (13)$$

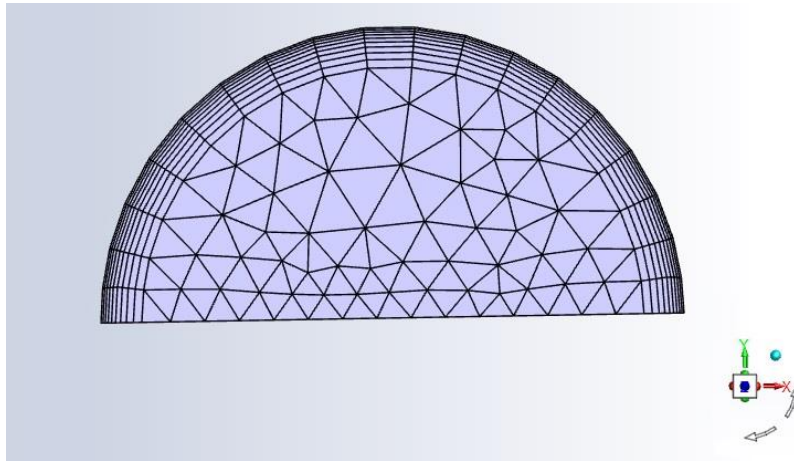
$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (14)$$

$$f = \frac{2\Delta p \left(\frac{D_h}{L} \right)}{\rho V^2} \quad (15)$$

Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri bulk sıcaklığında (T_b) hesaplanmış olup, bu değer denklem (16) kullanılarak bulunmuştur.

$$T_b = (T_i + T_o) / 2 \quad (16)$$

HAD analizi için sonlu hacimler metodu ile çözüm yapmaya olanak sağlayan ANSYS FLUENT 19.1 yazılımı kullanılmış olup analizlere başlamadan önce çözümün ağ sayısından bağımsızlığını sağlamak için ağ adaptasyonu çalışması yapılmıştır. Çözümün güvenilir olması ve yakınsama problemi ile karşılaşmamak için ağ adaptasyonunun yanında uygun ağ yapısının oluşturulması da son derece önemlidir. Bu çalışmada dört yüzlü ağ yapısı (tetrahedral) kullanılmış olup duvar yakın bölgelerde sıklaştırılmış yapı (sınır tabaka ağ yapısı) uygulanmıştır. Isı değiştiricisi ağ yapısında Şekil 2’de görüldüğü üzere, ana akış yönüne dik düzleme düzgün olmayan ağ dağılımı yapılmıştır. Tüm analizler, iteratif işlemle kalıntı hata oranı 10^{-6} ’dan düşük olana kadar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Isı değiştiricisi akış yönündeki ağ yapısı

HAD analizleri için ağ adaptasyonu çalışması Tablo 2’de verilmiş olup bu süreç, ağ eleman sayısının akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerini vermektedir. Tabloda görüldüğü üzere Nu sayısı ve Darcy sürtünme katsayısının birlikte en düşük değişim oranına sahip olduğu ağ sayısı 5 numaralı ağ yapısı ile elde edilmiştir. Optimum ağ sayısı

olarak 613546 seçilmiş ve nanoakışkanların tüm hacimsel konsantrasyonları için bu değer kullanılmıştır. Ayrıca, çalışmada y^+ yaklaşık olarak 1'dir.

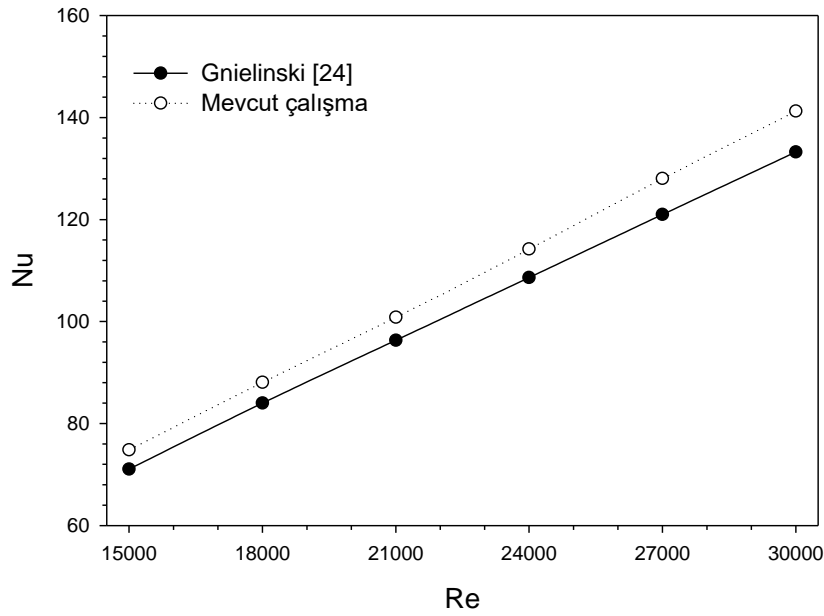
Tablo 2. Çözümün ağ yapısından bağımsız olması saf suyun için $Re=30000$ için sonuçları

Ağ No	Eleman sayısı	h (W/m ² K)	Nu	ΔP (Pa)	f	Nu%	f%
1	500053	4859.188	141.1691	903.9140	0.0261	-	-
2	529329	4876.706	141.6781	916.0240	0.0265	0.360512	1.532567
3	534746	4862.993	141.2796	919.7311	0.0266	-0.28121	0.377358
4	574000	4878.578	141.7324	915.1146	0.0264	0.320438	-0.75188
5	613564	4868.107	141.4282	920.1104	0.0266	-0.21458	0.757576
6	662309	4862.354	141.2611	904.5676	0.0261	-0.11817	-1.8797

3. Bulgular ve Tartışma

Çift borulu ve dönüş bükümlü bir ısı eşanjöründen çalışma akışkanı olarak su bazlı dört farklı nanoakışkan kullanılması durumunda ısı transferi ve sürtünme katsayısı davranışları HAD yöntemiyle incelenen bu çalışmada Re sayısı 15000 – 30000 arasında tam gelişmiş türbülanslı akış ele alınmıştır. %1.0 - %4.0 olmak üzere dört farklı hacimsel konsantrasyon için hesaplamalar yapılmış ve Nu sayısı ve Darcy sürtünme katsayısı dağılımları elde edilmiş ve her biri baz akışkan ile karşılaştırmalı incelenmiştir. Sayısal analiz çalışmalarında en önemli kısımlardan biri çalışmanın doğruluk oranının ortaya konulmasıdır. Bu kapsamda türbülanslı akış için ortalama Nu sayısı hesaplamasında genel kabul görmüş olan Gnielinski korelasyonu (17) kullanılarak çalışmanın doğruluğu test edilmiştir [24]. Elde edilen sonuçlara göre Şekil 3'te görüldüğü üzere Nu sayısı dağılımı aynı Re sayılarında Gnielinski denkleminde elde edilen sonuçlar ile uyum içeresindedir. Sonuçlarının birbirinden sapma oranının en yüksek değeri %5.7 olup ortalama değer ise %5.1 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kabul edilebilir hata oranları içerisinde olduğundan nanoakışkan ile HAD analizlerine geçilmiştir.

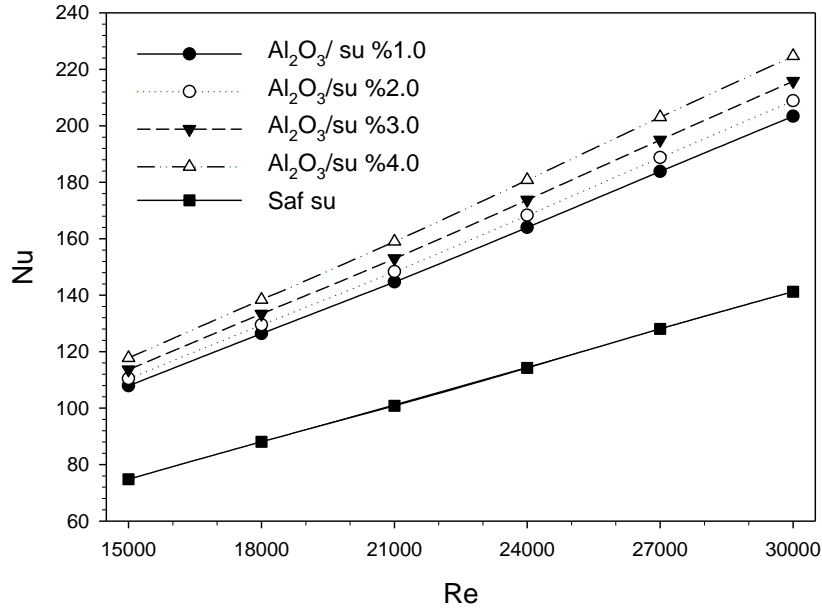
$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000) Pr}{1.07 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3}-1)} \quad (17)$$



Şekil 3. Saf su için HAD sonuçları ile Gnielinski korelasyonu [24] karşılaştırması

Nusselt sayısı bir akışın taşınım ısı transferi karakteristiklerini ortaya koyan önemli bir parametredir. Bunun en önemli nedeni boyutsuz olmasıdır ve bu yüzden bu tip çalışmalarda kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlara genel olarak bakıldığında, nanopartikül konsantrasyonundaki artış, basınç düşüşünde de bir artışa neden olmuştur. Türbülanslı akış koşullarında Re sayısının ve hacimsel konsantrasyonun artması ile Nusselt sayısının arttığı gözlenmiştir. Ancak Re sayısı ile Nu sayısı arttıkça sürtünme katsayısında azalma olduğu tespit edilmiştir. Al_2O_3 nanoakışkanının en yüksek ısı transfer katsayısına ve Nusselt sayısına sahip olduğu görülmektedir. Ek olarak, nanoakışkanlardaki partikül konsantrasyonundaki artış, U-boru içindeki basınç düşüşünde bir artışa neden olmuştur.

Al_2O_3 /su nanoakışkanın farklı Re sayıları için Nu sayısı değişimi Şekil 4'te verilmiş olup genel davranış trendi Re sayısı ve hacimsel konsantrasyonun artması ile Nu sayısının artması şeklindedir. %4.0 hacimsel konsantrasyonlu nanoakışkanın, ortalama Nu sayısında yaklaşık %51.9 artış sağladığı hesaplanmıştır ki bu da oldukça dikkate değer bir durumdur. CuO /su, SiO_2 /su ve ZnO /su nanoakışkanları için ise en yüksek Nu sayısı artış yüzdeleri sırasıyla %47.6, %16.52 ve %6.3 olarak elde edilmiştir. Nanoakışkanların baz akışkanın ısı transferi kapasitesini artırmasının en önemli sebeplerinden biri homojen dağılan partiküllerin baz akışkan içindeki hareketlerinin daha yüksek enerji değişim oranları sağlamasıdır.

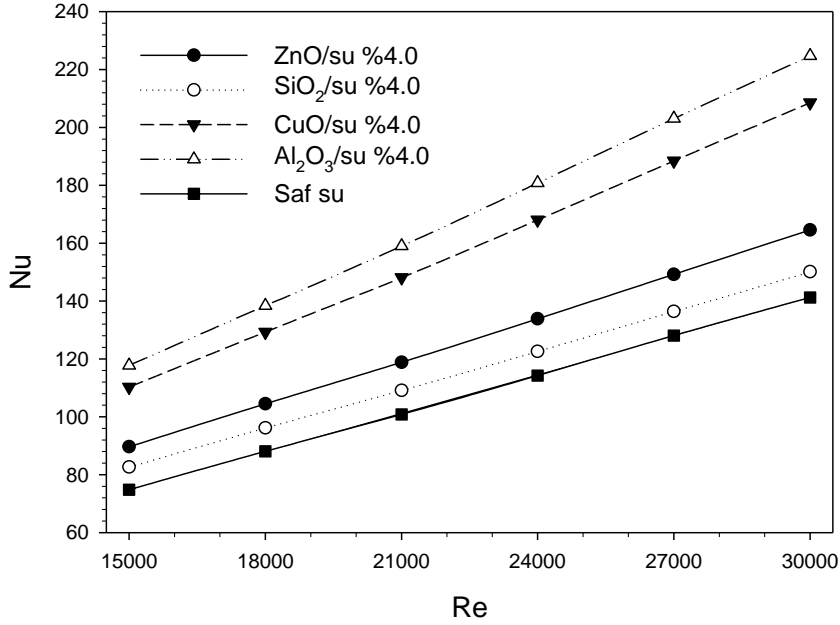


Şekil 4. Ortalama Nu sayısının Al₂O₃/su nanoakışkanı için değişimi

Nusselt sayısının farklı tip nanoakışkanların %4.0 hacimsel konsantrasyonları için Re sayısına göre değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Tüm nanoakışkanlarda Nu sayısı değerleri aynı Re sayısı değeri için saf sudan yüksek olarak elde edilmiştir ki bu durum daha önceki çalışmalar ile paralellik göstermektedir. Isıl iletkenliği en düşük SiO₂ olmasına rağmen burada ZnO nanopartikülünün oluşturduğu nanoakışkan diğerlerine göre en düşük artış değerine sahip olmuştur. Bu durum ısı transferi performansının sadece ısı iletkenliğe dayalı olmadığını, bunun yanında özgül ısı ve yoğunluk değerlerinin de etkili olduğunu göstermektedir.

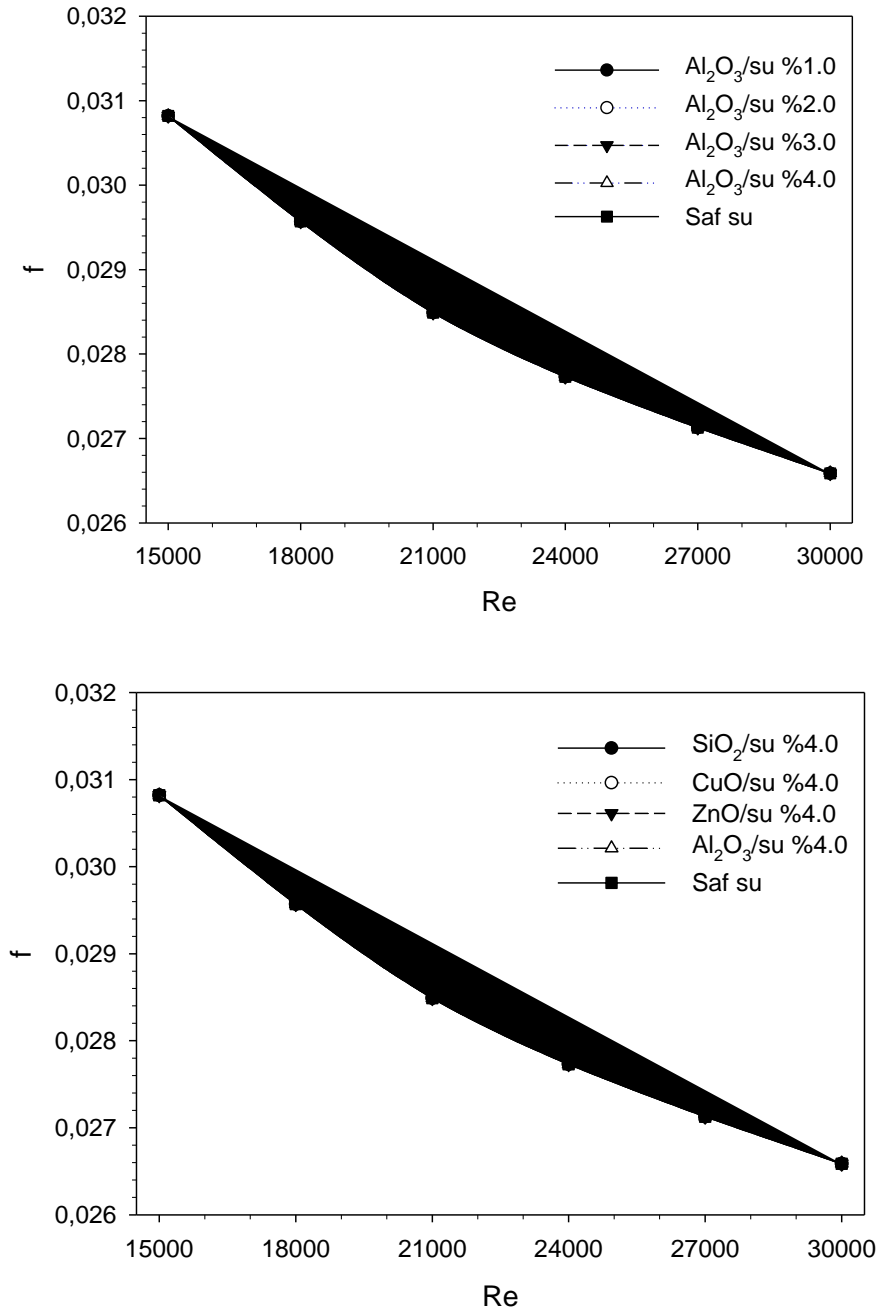
Akış karakteristiği yalnızca ısı transferi ile açıklanmayıp bununla birlikte sürtünme ve basınç düşüşü de önem ar etmektedir. Nanoakışkanlarda hacimsel konsantrasyon arttıkça viskozite değerlerinde artış gerçekleşir ve bu durum sürtünme ve basınç kaybına neden olur. Şekil 6'da farklı hacimsel konsantrasyondaki Al₂O₃/su nanoakışkanı ve farklı nanoakışkanların %4.0 konsantrasyonları için, Darcy sürtünme katsayısının Re sayısına göre değişimi verilmiştir. Re sayısının artması ile tüm durumlarda sürtünme katsayısı azalan bir eğilim göstermiştir. Bununla birlikte, Kaya vd. [25] tarafından belirtildiği gibi Darcy sürtünme faktörü üzerinde nanopartiküllerin değişen hacimsel konsantrasyonlarının önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Çünkü akışkanın daha düşük hız değerlerinde ısı eşanjörü duvarlarına yakın bölgelerde kayma gerilmesi daha yüksek değerlerdir. Aynı akış koşullarında nanopartikül tipinin de sürtünme katsayısında bir etkisi olmadığı da açıkça görülmektedir. Viskozite artışı ile gerçekleşen basınç düşüşü

dikkate alındığında, sürtünme katsayısının farklı nanoakışkanlar ve hacimsel konsantrasyonlar için değişmemesinin en önemli nedeni yoğunluğun da değişimi olarak gösterilebilir [26].

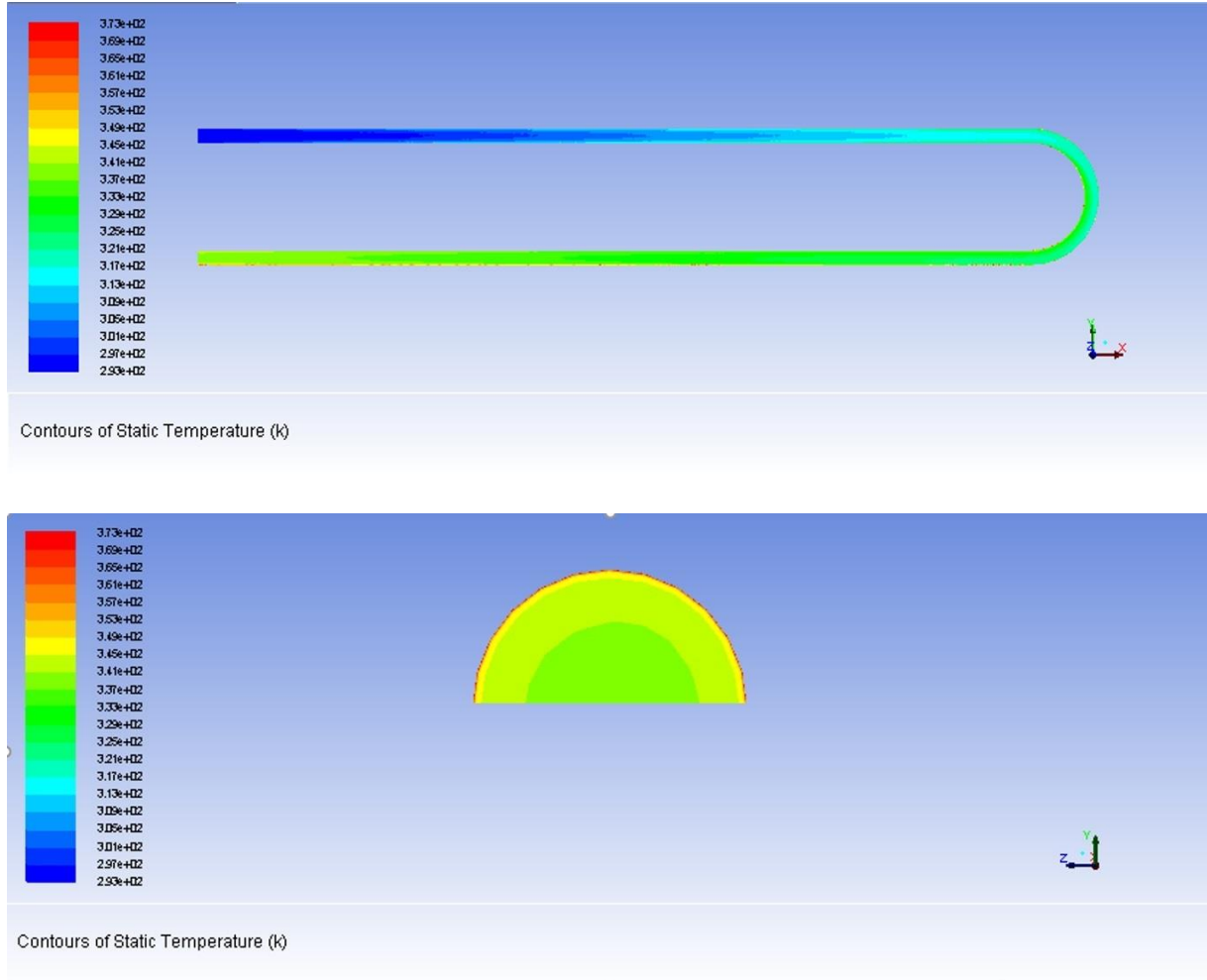


Şekil 5. Nu sayısının %4.0 nanoakışkanlar için Re sayısına göre değişimi

Sıcaklık değişiminin genel dağılımı için Al₂O₃/su nanoakışkanının eşanjör boyunca ve çıkışındaki sıcaklık dağılımları Şekil 7’de verilmiştir. Dış duvara uygulanan sabit sıcaklık sınır şartı ile girişten çıkışa doğru çalışma akışkanın sıcaklığının arttığı hem renk dağılımından hem de ölçekten görülmektedir ki bu da beklenen bir durumdur.



Şekil 6. Farklı çalışma akışkanları ve hacimsel konsantrasyonlar için Darcy sürtünme katsayısının Re sayısına göre değişimi



Şekil 7. $Re=30000$ için %3.0 Al_2O_3/su nanoakışkanının eşanjör boyunca ve çıkışındaki sıcaklık dağılımı

4. Sonuçlar

Üç-boyutlu HAD analizlerini içeren bu çalışmada, çift borulu bir eşanjörün iç kısmındaki boruda çalışma akışkanı olarak farklı hacimsel konsantrasyonlara (%1.0, %2.0, %3.0 ve %4.0) sahip su bazlı Al_2O_3 , CuO, SiO_2 , ZnO nanoakışkanların türbülanslı akış koşullarında ısı transferi ve sürtünme katsayısı değişimleri incelenmiştir. Tam gelişmiş türbülanslı akış koşullarında $15000 \leq Re \leq 30000$ aralığında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında Re sayısının artması ile Nu sayısı artışı tüm durumlar için gözlemlenmiş olup, en yüksek Nu sayısı artışı %51.9 olarak %4.0 hacimsel konsantrasyonlu Al_2O_3/su nanoakışkanı için gerçekleşmiştir. Bununla birlikte nanoakışkan hacimsel konsantrasyonu artışı da bütün nanoakışkanlar için Nu sayısında artış sağlamıştır. Diğer taraftan Darcy sürtünme katsayısı değerleri, nanoakışkan tipinin

ve hacimsel konsantrasyonun artışı ile bir değişim göstermezken Re sayısı artmasıyla azalarak azalan bir eğilim göstermiştir.

Kaynaklar

- [1] Chun BH, Kang HU, Kim SH. Effect of alumina nanoparticles in the fluid on heat transfer in double-pipe heat exchanger system. *Korean J Chem Eng.* 2008; 25(5):966–71.
- [2] Berger SA, Talbot L, Yao LS. Flow in Curved Pipes. *Annu Rev Fluid Mech.* 1983; 15(1):461–512.
- [3] Zamzamian A, Oskouie SN, Doosthoseini A, Joneidi A, Pazouki M. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. *Exp Therm Fluid Sci.* 2011; 35(3):495–502.
- [4] Xuan Y, Li Q. Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. *J Heat Transfer.* 2003; 125(1):151.
- [5] Yang Y, Zhang ZG, Grulke EA, Anderson WB, Wu G. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *Int J Heat Mass Transf.* 2005; 48(6):1107–16.
- [6] Devendiran DK, Amirtham VA. A review on preparation, characterization, properties, and applications of nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev.* 2016; 60:21–40.
- [7] Choi SUS, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME Int Mech Eng Congr Expo.* 1995; 66:99–105.
- [8] Corcione M, Cianfrini M, Quintino A. Heat transfer of nanofluids in turbulent pipe flow. *Int J Therm Sci.* 2012; 56:58–69.
- [9] Suresh S, Venkitaraj KP, Selvakumar P. Comparative study on thermal performance of helical screw tape inserts in laminar flow using Al₂O₃/water and CuO/water nanofluids. *Superlattices Microstruct.* 2011;49(6):608–22.
- [10] Mahian O, Kolsi L, Amani M, Estellé P, Ahmadi G, Kleinstreuer C, et al. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory. *Phys Rep.* 2019; 790:1–48.
- [11] Xu J, Bandyopadhyay K, Jung D. Experimental investigation on the correlation between nano-fluid characteristics and thermal properties of Al₂O₃ nano-particles dispersed in ethylene glycol-water mixture. *Int J Heat Mass Transf.* 2016; 94:262–8.

- [12] Witharana S, Palabiyik I, Musina Z, Ding Y. Stability of glycol nanofluids - The theory and experiment. *Powder Technol.* 2013; 239:72–7.
- [13] Chakraborty S, Panigrahi PK. Stability of nanofluid: A review. *Appl Therm Eng.* 2020;174; 115259
- [14] Elias MM, Shahrul IM, Mahbulul IM, Saidur R, Rahim NA. Effect of different nanoparticle shapes on shell and tube heat exchanger using different baffle angles and operated with nanofluid. *Int J Heat Mass Transf.* 2014; 70:289–97.
- [15] Humnic G, Humnic A. Heat transfer and entropy generation analyses of nano fluids in helically coiled tube-in-tube heat exchangers. *Int Commun Heat Mass Transf.* 2016; 71:118–25.
- [16] Zamzamian A, Oskouie SN, Doosthoseini A, Joneidi A, Pazouki M. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. *Exp Therm Fluid Sci.* 2011; 35(3):495–502.
- [17] Mohammed HA, Golieskardi M, Munisamy KM, Wahid MA. Combined convection heat transfer of nanofluids flow over forward-facing step in a channel having a blockage. *Appl Mech Mater.* 2013; 388:185–91.
- [18] Sheikholeslami M, Jafaryar M, Shafee A, Li Z. Nanofluid heat transfer and entropy generation through a heat exchanger considering a new turbulator and CuO nanoparticles. *J Therm Anal Calorim.* 2018; 134(3):2295–303.
- [19] Bahmani MH, Sheikhzadeh G, Zarringhalam M, Akbari OA, Alrashed AAAA, Shabani GAS, et al. Investigation of turbulent heat transfer and nanofluid flow in a double pipe heat exchanger. *Adv Powder Technol.* 2018; 29(2):273–82.
- [20] Li CH, Peterson GP. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). *J Appl Phys.* 2006;99(8).
- [21] Bejan A. *Convection Heat Transfer*. 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2013. 168 to 169.
- [22] Hussein AM, Sharma K V., Bakar RA, Kadirgama K. The effect of cross-sectional area of tube on friction factor and heat transfer nanofluid turbulent flow. *Int Commun Heat Mass Transf.* 2013; 47:49–55.

- [23] Incropera FP, Bergman TL, Lavine AS, DeWitt DP. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2011. 537–558 p.
- [24] Gnielinski V. New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow. *Int Chem Eng.* 1976; 16(2):359–68.
- [25] Kaya H, Ekiciler R, Arslan K. CFD analysis of laminar forced convective heat transfer for TiO₂/water nanofluid in a semi-circular cross-sectioned micro-channel. *J Therm Eng.* 2019;5(3):123–37.
- [26] Kaya H, Ekiciler R, Arslan K. Entropy Generation Analysis of Forced Convection Flow in a Semicircular Microchannel with TiO₂/water Nanofluid. *Heat Transf Res.* 2019; 50(4):335–48.