ARAŞTIRMA MAKALESİ

Geriye Dönük Adım Akışında Karbon Tabanlı Nanoakışkanların Isı Transferi ve Akış Özellikleri Açısından Değerlendirilmesi

Koray KARABULUT

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu
Elektrik ve Enerji Bölümü
Sivas
kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr
orcid: 0000-0001-5680-0988

Doğan Engin ALNAK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği Bölümü
Sivas
dealnak@cumhuriyet.edu.tr
orcid: 0000-0003-0126-1483

ÖZ

Geriye dönük adım akışı, büyük hücum açısında kanat uçlarında, bir aracın arkasındaki ayrılma akışında, bir gaz türbinindeki akışta ve ayrıca bir tekne veya binanın etrafındaki akış gibi günlük yaşantımızdaki uygulamalarda görülmektedir. Isı ve kütle transferi miktarını artırmak açısından geriye dönük adım bölgesinin kontrolü oldukça önemlidir. Bu çalışmada, dikey olarak konumlandırılmış geriye dönük adım akışı geometrisinde h/4 ve h olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının pahsız geometriye göre türbülanslı ısı transferi ve akış özellikleri hacimce %0,01 konsantrasyonlara sahip GO (Grafen Oksit)-saf su ve MWCNT (Çok Katmanlı Karbon Nanotüp)-saf su nanoakışkanlarının kullanılmasıyla saf su ile karşılaştırılarak sayısal olarak incelenmiştir. Geriye dönük adımın arkasındaki duvarlardan biri sabit sıcaklıkta tutulurken diğerleri adyabatiktir. Çalışmanın sonuçları, üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak korunum denklemlerinin k-ε türbülans modelli, Boussinesq yaklaşımlı ANSYS-FLUENT bilgisayar programıyla çözülmesiyle elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan nanoakışkanlar tek fazlı kabul edilmiş olup, deneysel olarak elde edilen termofiziksel değerler kullanılmıştır. Geriye dönük adımın genişleme oranı 1,5'tir. Çalışma, 7500 ve 10000 olmak üzere farklı Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir. Sunulan çalışma, literatürde bulunan çalışmanın sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmış olup birbirleriyle uyumlu ve kabul edilebilir oldukları görülmüştür. Sonuçlar, Nu sayısı, akışkan sıcaklık, türbülans kinetik enerji ve basınç değişimleri olarak sunulmuştur. Ayrıca, geriye dönük adım akışı geometrisinde, sıcaklık, hız konturları ve akım çizgisi dağılımları görselleştirilmiştir. Re=10000 için %0,01 GO-saf su nanoakışkanı akışında h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinin ortalama Nu sayısının saf su kullanılan geometriden %11,51 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler
Ayrılmış Akış, Geriye Dönük Adım Akışı, Nanoakışkan, Türbülanslı Isı Transferi.

Evaluation of the Carbon-Based Nanofluids in Terms of Heat Transfer and Flow Properties at Backward-Facing Step Flow

ABSTRACT

The backward-facing step flow is seen in applications in our daily life, such as high attack angle at airfoil, the separation flow behind a vehicle, the flow in a gas turbine, and also the flow around a boat or building. In terms of increasing the amount of heat and mass transfer, the control of the backward step region is fairly important. In this study, the heat transfer and flow properties with turbulence of step corner structures with different chamfer lengths as h/4 and h according to geometry of without chamfer have been numerically searched by using GO (Graphene Oxide)-distilled water and MWCNT (Multi-Walled Carbon Nanotube)-distilled water nanofluids having 0,01% volumetric concentration comparing with distilled water at the vertically positioned backward-facing step flow geometry. One of the walls behind the backward-facing step has been kept at a constant temperature while the others are adiabatic. The results of the study have been achieved by solving conservation equations with three dimensional and steady k-ε turbulence model with Boussinesq approach using ANSYS-FLUENT computer program. The nanofluids used in the study have been considered as single-phase and experimentally obtained thermophysical values have been employed. The expansion rate of the backward-facing step is 1,5. The study has been carried out in different Reynolds numbers of 7500 and 10000. The present study has been compared with the numerical results of the work found in the literature and it has been found that they are compatible and acceptable to each other. The results have been presented as the variations of Nu number, fluid temperature, turbulence kinetic energy and pressure. In addition, the contours of the temperature and velocity and streamline distributions have been visualized at the backward-facing step flow geometry. For Re=10000, the average Nu number value of the step geometry with h/4 at the 0.01% GO-distilled water nanofluid flow has been determined to be 11,51% higher than the geometry of distilled water.

Keywords
Separated Flow, Backward-Facing Step Flow, Nanofluid, Turbulent Heat Transfer.

Geliş Tarihi : 11.03.2020
Kabul Tarihi : 24.04.2020

Karabulut, K., Alnak, D.E., Geriye Dönük Adım Akışında Karbon Tabanlı Nanoakışkanların Isı Transferi ve Akış Özellikleri Açısından Değerlendirilmesi, Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı: 176, sf. 38-52, Mart-Nisan 2020

1. GİRİŞ

Birçok mühendislik uygulamasında bir ayrılmış akış modeli olan geriye dönük adım (basamak) akışıyla karşılaşılmaktadır. Bir aracın arkasındaki ayrılma akışı, bir yoğuşturucu/yakıcının iç kısmı veya bir motorun giriş kısmındaki akış, büyük hücum açısında (kanat profilinin uçuş doğrultusu ile referans çizgisi arasında kalan açı) kanat uçlarında, hız kesici kanat (spoyler) akışlarında ve ayrıca bir tekne veya binanın etrafındaki akış geriye dönük adım akışı örnekleridir.

Enerji dönüşümü uygulamalarında kullanılan ısı değiştiriciler, güneş ısıtıcıları, nükleer reaktörler, soğutucular ve hidrojen depolama üniteleri gibi sistemlerin ısıl performansları temel olarak su, etilen glikol ve yağ gibi geleneksel ısı transferi akışkanlarının termofiziksel özelliklerine bağlıdır. Bununla birlikte, su, yağlar ve glikoller sahip oldukları düşük ısıl iletkenlikleri nedeniyle zayıf ısı transferi performansı sergilemektedirler. Günümüzde de bu doğrultuda akışkanların ısı transferi özelliklerini iyileştirmek amacıyla araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bunun yanı sıra, katı malzemeler, sıvılardan daha yüksek ısıl iletkenlik değerlerine sahip olduklarından sıvıya eklenen katı parçacıklar kullanılan (taban) akışkanının ısıl iletkenliğini ve ısı transferi performansını artırmaktadırlar [1]. İlk başlarda, mikrometre hatta milimetre boyutlu katı parçacıklar süspansiyon oluşturmak için taban akışkanlarına (nanoparçacıkların içerisinde karıştırıldığı akışkan) karıştırılmıştır. Buna ek olarak, nanoparçacıklara kıyasla büyük boyutlu olan bu katı parçacıklar, boru hatlarını aşındırıcı etkide bulunması, mikro kanallarda tıkanmalara yol açması ve basınç düşüşünü artırması gibi uygulamada kısıtlayıcı birtakım istenmeyen sonuçlara sebep olmaktadır. Bunun yanında, parçacıkların büyük boyuta sahip olması ve üretim aşamasında küçük boyutlu parçacıklarda yaşanan zorluklar uygulamayı kısıtlayıcı diğer faktörler olmuştur. Bununla birlikte, başlangıçta yalnızca teorik bir ilgi alanı olan sıvı çözelti şeklindeki karışımlar araştırmacıların yaptıkları deneysel çalışmalar neticesinde gelecek vaat edici etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Bu sebeple, 1881 yılında Maxwell'in öncülüğünde başlatılan ve ısıl iletkenlik değerini artırmak amacıyla geleneksel ısı transferi akışkanlarına katı parçacıkların eklenmesi düşüncesi yeni bir fikirdir [2-3]. Bu akışkanların özelliklerindeki iyileşmeler son derece kritik bir öneme sahip olduğu için nanoakışkan olarak adlandırılan yenilikçi çalışma akışkanları üzerindeki araştırmalar da son zamanlarda ilgi odağı haline gelmiştir [4-5]. Nanoakışkan, 100 nm ve daha küçük boyuttaki metal, metal oksit, tek ve çok katmanlı karbon nanotüp, grafit, grafen, grafen oksit, grafen nano ribbon gibi parçacıkların genelde deformasyon hızının kayma gerilmesi ile doğru orantılı olarak değiştiği Newton kuralına uyan akışkanlar içerisine düşük konsantrasyonlarda eklenmesiyle oluşturulan süspansiyon şeklindeki akışkanlara denilmektedir. Nanoakışkanlar, ısıl yayılım ve ısıl iletkenlik gibi termofiziksel özellikleri iyileştirirken, mükemmel bir kararlılık ve taşınım ısı transferi katsayısı değerleri sağlamaktadırlar ve ayrıca basınç düşüşü ve pompalama gücünde taban akışkanına göre çok az bir artış meydana getirmektedirler [6-7]. Geleneksel olarak kullanılan akışkanlara nanoparçacıkların eklenerek yeni akışkan elde edilmesi düşüncesinin ısıl iletkenlikte iyileşme sağlanarak akışkanın ısı transferi performansını artırmak amacıyla olduğu düşünüldüğünde nanoakışkanlar üzerinde yoğun olarak araştırma yapılması olağan kabul edilmektedir. Metal ve metal oksitlerle karşılaştırıldığında karbon kökenli malzemeler yüksek ısıl iletkenliğe ve düşük yoğunluğa sahip oldukları için daha çok ilgi görmektedirler [8].

Son yıllarda, ayrılma ve yeniden birleşmeli akışlar için prototip olarak geriye dönük basamak akışında çeşitli çalışma akışkanlarıyla çalışılmıştır. Armaly ve ark. [9] hava ile yaptıkları deneylerinde girişte Re sayısını artırarak akış tipini değiştirmişlerdir. Yeniden birleşme noktasının bu genel parametreye bağlı olduğunu ve esasen laminer, geçiş ve türbülanslı akış arasında değiştiğini bulmuşlardır. Ayrıca, yeteri kadar büyük Re sayısı ve tam gelişmiş türbülanslı akış için yeniden birleşme noktası Re sayısından bağımsız olmaktadır. Nadge ve Govardhan [10] yeniden dolaşım bölgesinin şekli üzerinde Re sayısı ve adım yüksekliği gibi genel parametrelerin etkilerini çalışmışlar ve bu bölgenin eğer yeniden birleşme uzunluğu ve adım yüksekliği boyutsuzsa incelenen değişken aralığı boyunca tamamen değişmeden kaldığını göstermişlerdir. Kasagi ve Matsunaga [11] üçlü korelasyonları ve tam gelişmiş türbülanslı geriye dönük basamak akışında türbülans kinetik enerji yığınlarını ölçmüşlerdir. Le ve ark. [12] yapmış oldukları sayısal araştırmalardan birinde detaylı olarak türbülans hareketlerinin etkileşimlerini incelenmişlerdir. Onların yüksek çözünürlükteki verileriyle deney-

lerde ölçümü oldukça zor olan duvar kayma oranı ve Reynolds gerilme yığınları hesaplanabilmiştir. Bununla birlikte, zamanla büyük ölçüde değişen bir yerleşimde tam gelişmiş türbülanslı akış ani yeniden birleşmesi meydana gelmektedir. Bu konu, ileri sıvı akışının belirli bir yüzdesine kadar yeniden bağlanma ile ilgili olarak bazı araştırmacıları teşvik etmiştir [13].

Geriye dönük adımlı (basamaklı) akışlardaki ısı transferi çalışmaları hala oldukça azdır. Vogel ve Eaton [14] tarafından yapılan deney çalışmasında sık kullanılan bir kıyaslama durumu olarak havada türbülanslı ısı transferi incelenmiştir. Araştırmacılar, klasik Re karşılaştırmasının ortalama akışı sürdürmediğini fakat özellikle yeniden birleşme bölgesinde dalgalanan değerlerin fazla olduğunu göstermişlerdir. Reynolds karşılaştırması, duvardaki ısı transferinin duvardaki kaymayla orantılı olduğunu varsaymaktadır. Keating ve ark. [15] sayısal olarak bu durumu başarılı bir şekilde çalışmışlar ve duvar yakınındaki ısı transferini etkileyen türbülanslı yapıları tanımlamışlardır. Bir adım arkasındaki türbülanslı ısı transferinin diğer bir durumu taşıma aracı olarak havanın kullanıldığı durumu düşünen Avancha ve Pletcher [16] tarafından sayısal olarak araştırılmıştır. Yapılan her iki sayısal çalışma da Reynolds benzeşiminin yeniden birleşme bölgesini sürdürmediğini göstermiştir.

Bu çalışmada, dikey olarak yerleştirilmiş geriye dönük adım akışı geometrisinde h/4 ve h olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının düz (pahsız) kanala göre türbülanslı ısı transferi ve akış özellikleri Reynolds sayısının 7500 ve 10000 değerleri için sayısal olarak incelenmiştir. Geriye dönük adımın arkasındaki duvarlardan biri sabit sıcaklıkta tutulurken diğerleri adyabatiktir. Çalışma akışkanları olarak %0.01 hacimsel konsantrasyonlu GO (Grafen oksit)-saf su ve MWCNT (Çok tabakalı karbon nanotüp)-saf su nanoakışkanları ve saf su kullanılmıştır. Akışkanların kanala giriş sıcaklıkları 303 K iken geriye dönük adımın arkasındaki duvarın sıcaklığı 316.5 K'dir. Geriye dönük adımın genişleme oranı 1.5'dir. Literatürde yapılan çalışmalarda da görüldüğü gibi uygulamada sıvı akışkanlarla çalışılması durumunda özellikle dikey konumlandırmalarda sıcaklık farkı büyük olursa kaldırma etkilerinin dikkate alınması önem arz etmektedir. Bu nedenle, yapılan çalışmada da bu amaçla kaldırma etkileri Boussinesq yaklaşımı kullanılarak dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonuçları, üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak korunum denklemlerinin k-ε türbülans modelli, Boussinesq yaklaşımıyla ANSYS-FLUENT bilgisayar programıyla çözülmesiyle elde edilmiştir. Sunulan çalışma, literatürde bulunan çalışmanın sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmış olup birbirleriyle uyumlu ve kabul edilebilir oldukları görülmüştür. Sonuçlar, Nu sayısı, akışkan sıcaklık, türbülans kinetik enerji ve basınç değişimleri olarak sunulmuştur. Ayrıca, geriye dönük adım akışı geometrisinde, sıcaklık, hız ve akım çizgisi dağılımları görselleştirilmiştir.

2. SAYISAL YÖNTEM

Sayısal çalışma, üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin ANSYS-FLUENT sonlu hacimler yöntemine dayalı bilgisayar programı kullanılarak çözülmesiyle yapılmıştır. Çalışmada türbülans modeli olarak k-ε modeli kullanılırken, Boussinesq yaklaşımıyla kaldırma etkileri de dikkate alınmıştır.

Sonlu hacimler yöntemi, hesaplaması yapılacak geometriyi çözüm yapmak için parçalara bölme ve sonra her bir parça için elde edilen bu çözümleri bir araya getirerek probleme ait genel bir çözüm elde etme temellidir. Bu yöntemde, kontrol hacmi esaslı bir teknik kullanılarak korunum denklemleri sayısal olarak çözümlenebilen cebirsel denklem sistemlerine dönüştürülür. Bu yöntem, her bir kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integre edilmesiyle ulaşılan ve değişkenler için kontrol hacmine ait ayrık eşitliklerin bulunması tekniğidir. Ayrık eşitliklerin doğrusal denklem sistemlerine dönüştürülmesinden sonra iterasyona bağlı çözümüyle istenen yakınsaklık ölçüsü sağlanıncaya kadar hız, basınç ve sıcaklık gibi değişkenler güncellenir. En kullanışlı ağ yapısı için hız, sıcaklık ve basınç değişkenliğinin önemli olduğu bölgelerde ağ yapısının sıklığı artırılmalıdır. Süreklilik ve momentum denklemleri için hesapların yakınsaması, yakınsaklık ölçeği 10^{-6}'dan daha az olduğunda durdurulurken, bu değer enerji denklemi için 10^{-7}'dir. Simülasyon için dörtyüzlü (tetrahedral) ağ yapısı kullanılmıştır.

Geometri boyunca akış ve ısı transferi aşağıda açıklandığı gibi gövde kuvvetinin olmadığı kararlı durum koşullarında kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinden elde edilen kısmi diferansiyel denklemler ile çözülmüştür [17].

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}+\frac{\partial \bar{w}}{\partial z}=0 \tag{1}$$

Momentum denklemi

x momentum denklemi

$$\left[\bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{(u')^2}}{\partial x}\right]+\left[\bar{v}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{(u'v')}}{\partial y}\right]+\left[\bar{w}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}+\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}\right]=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x}+\nu\left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}\right) \tag{2.1}$$

y momentum denklemi

$$\left[\bar{u}\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{(v')^2}}{\partial x}\right]+\left[\bar{v}\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{(v'v')}}{\partial y}\right]+\left[\bar{w}\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}+\frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z}\right]=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial y}+\nu\left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2}\right)+\beta g\Delta T \tag{2.2}$$

z momentum denklemi

$$\left[\bar{u}\frac{\partial \bar{w}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{(w')^2}}{\partial x}\right]+\left[\bar{v}\frac{\partial \bar{w}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{(w'v')}}{\partial y}\right]+\left[\bar{w}\frac{\partial \bar{w}}{\partial z}+\frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z}\right]=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial z}+\nu\left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2}\right) \tag{2.3}$$

burada ū', ῡ', w̄ sırasıyla x, y, z yönlerindeki ortalama dalgalı hız bileşenleridir.

Enerji denklemi

$$\left[\bar{u}\frac{\partial \bar{T}}{\partial x}+\bar{v}\frac{\partial \bar{T}}{\partial y}+\bar{w}\frac{\partial \bar{T}}{\partial z}\right]+\frac{\partial \overline{(u'T')}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{(v'T')}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{(w'T')}}{\partial z}=\left(\frac{k}{\rho c_p}\right)\left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2}\right) \tag{3}$$

Bu denklemlerde, ρ yoğunluk (kg/m^3), ν kinematik viskozite (m^2/s), p basınç (N/m^2), k ısıl iletkenlik (W/mK), ortalama sıcaklık (K), c_p özgül ısı (J/kgK), ve sırasıyla x, y ve z yönlerindeki ortalama hızlardır (ms^{-1}).

Bu çalışmada kullanılan türbülans modelinde (k-ε), ε türbülans dağılım terimini belirtirken (m^2/s^3), k' ve ϕ sırasıyla türbülans kinetik enerji (m^2/s^2) ve viskoz dağılım terimini (m^2/s^3) göstermektedir.

Daimi akış için türbülans kinetik enerjisi denklemi

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}k')}{\partial x}+\frac{\partial(\rho \bar{v}k')}{\partial y}+\frac{\partial(\rho \bar{w}k')}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k'}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k'}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k'}{\partial z}\right)+\mu_t\phi-\rho\varepsilon \tag{4}$$

Türbülans viskozitesi

$$\mu_t=C_{\mu'}\rho\frac{k'^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

Türbülans kinetik enerji

$$k'=\frac{1}{2}\left(\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{w'^2}\right) \tag{6}$$

Viskoz dağılım terimi

$$\phi=2\mu\left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z}\right)^2\right]+\mu\left[\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x}+\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y}+\frac{\partial \bar{v}}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}+\frac{\partial \bar{w}}{\partial x}\right)^2\right] \tag{7}$$

Burada, μ dinamik viskozitedir (kgs^{-1}m^{-1}).

Türbülans kinetik enerji dağılım denklemi

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}\varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho \bar{v}\varepsilon)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho \bar{w}\varepsilon)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)+C_{1\varepsilon}\mu_t\frac{\varepsilon}{k'}\phi-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k'} \tag{8}$$

Model sabitleri olan C_μ, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k ve σ_ε standart k-ε türbülans modelinde kullanılan genel saptanmış değerlerdir [17]. Bu sabitlerin değerleri, birçok türbülanslı akış için çok sayıda veri uyumuyla sağlanmıştır. Bu sabitlerin değerleri C_μ= 0,09, $C_{1\varepsilon}$= 1,44, $C_{2\varepsilon}$= 1,92, σ_k= 1 ve σ_ε= 1,3'tür.

Reynolds sayısı (Re) aşağıda verilen denklemle hesaplanmaktadır.

$$Re = \frac{U_b D_h}{\nu} \tag{9}$$

Burada D_h geriye dönük adım akışlı kanalda girişteki hidrolik çap (m) ve U_b kanala girişte akışkanın ortalama hızıdır (m/s).

$$D_h = \frac{4A_c}{P} = \frac{4(2h)(4h)}{2(2h+4h)} = \frac{4h}{3} \tag{10}$$

Burada A^c ve P sırasıyla geriye dönük adım akışı kanalının giriş kesit alanı (m^2) ve kanalın çevre uzunluğudur (m).

Nu sayısı (Nu) taşınımla ısı geçişinin iletimle ısı geçişine oranı olarak değerlendirilir.

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_s = h(T_\infty - T_s) \text{ ve } Nu = \frac{hL}{k} \tag{11}$$

Burada h yüzey üzerindeki yerel ısı taşınım katsayısı (W/m^2K), n yüzeye dik yön olup yerel Nu sayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_m = \frac{1}{L}\int_0^L h dx \tag{12}$$

Ortalama Nu sayısı

$$Nu_m = \frac{h_m L}{k} \tag{13}$$

Basınç düşüşü

$$\Delta p = f\,\frac{L}{D_h}\,\frac{\rho U_b^2}{2} \tag{14}$$

Burada Δp kanal boyunca akış yönündeki basınç düşüşü, f sürtünme faktörü ve L= 20h olmak üzere sabit yüzey sıcaklıklı kanal kısmının uzunluğudur.

3. GEOMETRİK MODEL

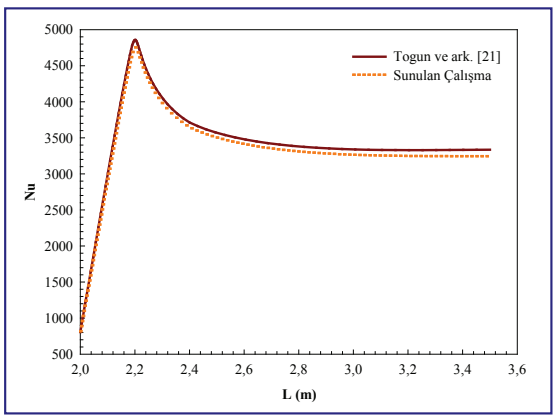
Şekil 1a'da geriye dönük adım modelinin pahsız düz model geometrik yapısı gösterilirken, Şekil 1b'de ise h/4 ve h olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapıları verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi ısıtılan bölümün uzunluğu 20h uzunluğunda olup, h'ın değeri 0,05 m'dir. Kanalın sonundaki yanal uzunluk (3h) ile akışkanların kanala giriş yaptıkları kısım (2h) arasındaki uzunlukların oranı olan geriye dönük adımın genişleme oranı 1,5'dir. Köşelere verilen pah uzunlukları, h/4 ve h uzunluklarındadır. Kullanılan akışkanlar saf su, %0,01 GO-saf su ve %0,01 MWCNT-saf su nanoakışkanları olup, Reynolds sayısının 10000 olduğu değer için sırasıyla akışkanların kanala giriş hızları (U_b) 0,1612 m/s, 0,2707 m/s ve 0,1859 m/s'dir. Akışkanın kanala giriş sıcaklığı 303 K iken geriye dönük adımın arkasındaki kısmın sıcaklığı ise 316,5 K'dir. Ayrıca, 13,5 K'lik sıcaklık farkı nedeniyle kaldırma etkilerinin dikkate alınması amacıyla çözümlemelerde g yerçekimi ivmesi (9,81 m/s^2) de hesaba katılmıştır. Saf su, %0,01 hacimsel konsantrasyonlara sahip GO-saf su ve MWCNT-saf su nanoakışkanlarının deneysel termofiziksel değerleri sırasıyla ρ= 995,8 kg/m^3, c_p= 4178,4 J/kgK, k= 0,6172 W/mK, μ= 0,0008034 Ns/m2, ρ=996.1 kg/m3, cp=4178.4 J/kgK, k=0.6696 W/mK, μ=0.001 Ns/m2 [18, 19] ve ρ=998 kg/m3, cp=4179.8 J/kgK, k=0.676 W/mK, μ=0.0009281 Ns/m^2'dir [20]. Ayrıca, Grafen, karbon atomlarının tek düzlemde altıgen yapıda dizilmesiyle oluşan iki boyutlu, bir atom kalınlığında, karbon allotropu bir yapıdır. Tek tabakalı grafen nanotabakasının oda sıcaklığındaki ısıl iletkenliği 5000 W/mK ve yüzey alanı 2630 m^2/g'dır. Bununla birlikte, grafen suyu sevmez bir özelliğe sahiptir. Grafit oksitlenerek grafen oksite (GO) dönüştüğünde ısıl iletkenliği grafitten daha düşük olmaktadır. Fakat GO suyu sever özellikte olduğundan kullanıldığı nanoakışkanda kararlılık artmakta ve çökelme olmamaktadır [18, 19]. Çok katmanlı karbon nanotüpler (MWCNT) ise karbonun silindirik allotropları olup, tekli grafen tabakalarının oluşturduğu çok tabakalı eş merkezli silindirlerden ve uzunluk olarak mikron boyutunda fakat çap olarak nanometre boyutunda borusal yapılardır. Karbon nanotüplerin sahip oldukları yüksek en-boy oranları ve ayrıca ısıl iletkenlik değerleri metalik ve metal oksit nanoparçacıklardan daha yüksek olduklarından ısı taşınımı için ideal yapılar olacağı açıktır. [20]

Bu çalışma şu kabuller altında gerçekleştirilmiştir. a) Geriye dönük adım akışı için akış alanı üç boyutlu, zamandan bağımsız ve türbülanslıdır, b) Hesaplamalar sıkıştırılamaz akış için yapılmıştır,

c) Çalışma akışkanları olarak saf su, hacimce %0,01 GO-saf su ve MWCNT-saf su nanoakışkanları kullanılmıştır, d) Geriye dönük adımın arkasındaki duvar yüzeyine sabit 316,5 K yüzey sıcaklığı uygulanırken diğer duvarlar adyabatiktir, e) Akışkanların ısıl özellikleri sabittir, f) Hem akışkanlar hem de duvarlar için ısı üretimi yoktur.

4. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Şekil 2'de giriş uzunluğu 1.25 cm, genişleme oranı 2, yukarı akım uzunluğu 200 cm ve 150 cm'lik ısıtılmış (4000 W/m^2) aşağı akım uzunluğuna sahip bir geriye dönük adım geometrisi modelinde Re= 10000'de su akışkanı için Togun ve ark. [21] tarafından yapılan sayısal çalışma ile sunulan çalışma karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle oldukça uyumlu oldukları görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmanın sonuçlarının makul ve kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2. Togun ve ark. [21]'nın sayısal çalışması ile sunulan çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması

Ağ sayısının ortalama Nu sayısı (Num) ve akış hızı (Vm) üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla düz model geriye dönük adım akışı kanalında akışkan olarak su kullanılarak Re= 5000 değeri için ağ bağımsızlık testleri yapılmıştır (Tablo 1). Yapılan testler sonucu, düz kanal için 988942 adet ağ elemanının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, düz, h/4 ve h pah uzunluklarına sahip geriye dönük adım akışına sahip kanalarda kullanılan ağ elemanı sayıları da Tablo 2'de gösterilmiştir.

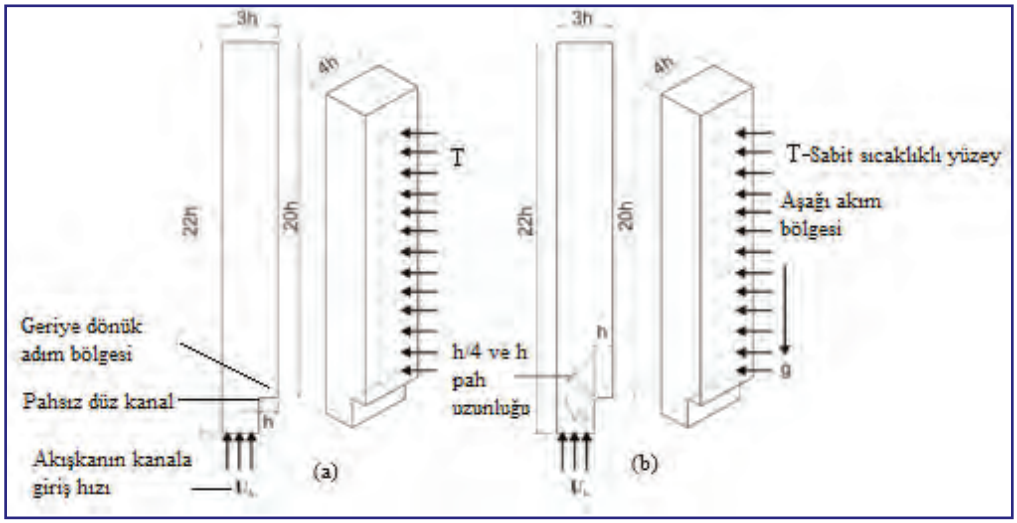
Tablo 1. Pahsız (Düz Model) Kanalda Nu_m ve V_m İçin Ağ Testi Sonuçları

Ağ Sayısı	Nu_m	V_m (m/s)
939495	1185.25	0.034254
988942	1196.56	0.034824
1080420	1196.48	0.034471

Tablo 2. Pahsız, h/4 ve h pah Uzunluklu Kanaldaki Ağ Sayıları

Kanal Tipi	Ağ Sayısı
Düz Model	988942
h/4 Model	988406
h Model	991830

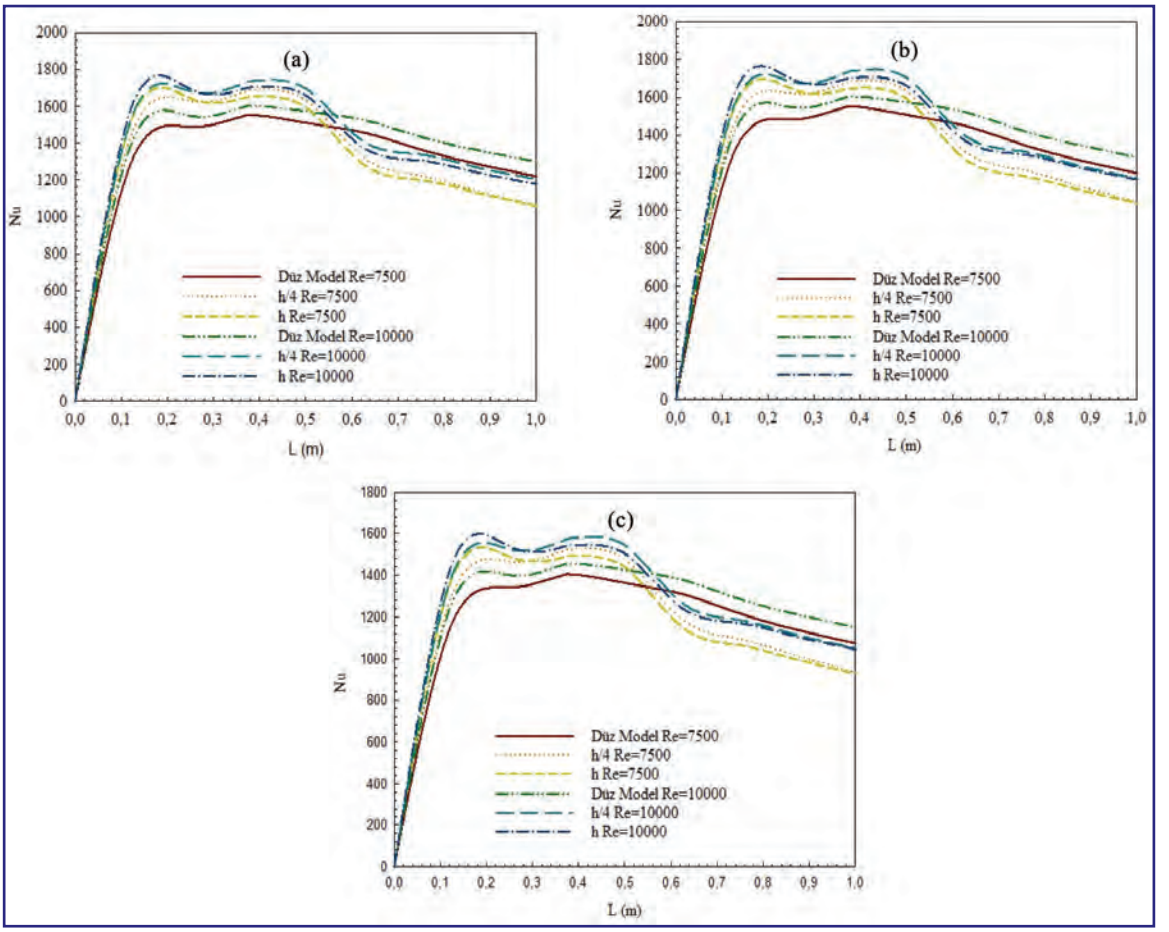
Çalışmada ulaşılan tüm sonuçlar, 20h (1 m) uzunluklu ve sabit yüzey sıcaklıklı geriye dönük adım akışı kısmı için elde edilmiş olup değişimleri grafiklerle gösterilmiştir. Düz model, h/4 ve h pah uzunluklu geriye dönük adım akışı geometrilerinde Re sayısının 7500 ve 10000 değerlerinde %0.01 hacimsel konsantrasyonlara sahip GO (Grafen Oksit)



Şekil 1. Geriye dönük adım modeli (a) Düz (b) h/4 ve h pah uzunluklu

ve MWCNT (Çok Tabakalı Karbon Nanotüp) nanoakışkanları ve saf su akışkanı için kanal boyunca Nu sayısının değişimi sırasıyla Şekil 3 (a), (b) ve (c)'de gösterilmektedir. Tüm akışkanlar için geriye dönük akışın ayrılmış akış bölgesinde kanalın 0,27 m'lik kısmında h pah uzunluklu kanal için diğer kanallara göre (h/4 pah uzunluklu ve düz model) daha yüksek Nu sayısı değerleri elde edilirken bu noktadan sonra akış karışmasının daha iyi olduğu h/4 pah uzunluklu kanalda Nu sayısı değerlerinin daha fazla olduğu Şekil 3'den görülebilmektedir. Bununla birlikte, kanalın 0,52 m'lik uzunluğundan itibaren ayrılmış akış bölgesindeki ısı transferi sonucu sıcaklığı artan akışkanların, yeniden birleşme bölgesinden sonra Nu sayısı değerleri hem saf su hem de nanoakışkanlar için düz modelden daha düşük olmaktadır (Şekil 3 (a), (b), (c)). Re sayısının artışıyla Nu sayısı değerleri artış göstermektedir. Ayrıca, Re= 10000 için h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinin ortalama Nu sayısının sırasıyla %0,01 GO-saf su ve %0,01 MWCNT-saf su nanoakışkanlarının akışında saf su kullanılan geometriden sırasıyla %11,51 ve %10,61 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, akış ayrılmasının olduğu özellikle geriye dönük adım akışı uygulamalarında geometride köşe kısmına verilen pah uzunluğu yanında nanoakışkan kullanımının ısı transferini artırıcı etki oluşturduğu görülmektedir.

Düz model, h/4 ve h pah uzunluklu kanallara ait sırasıyla %0,01 GO-saf su, %0,01 MWCNT-saf su nanoakışkanları ve yalnızca saf su akışkanının kullanıldığı geriye dönük adım akışı modellerinde h uzunluklu kanal adım yüksekliğinin yarı yüksekliği olan 0,5h uzunluğu boyunca akışkanların sıcaklık değişimleri Şekil 4 (a), (b) ve (c)'de verilmektedir. Grafikler incelendiğinde en düşük akışkan sıcaklığı %0,01 hacimsel konsantrasyonlu GO-saf su nanoakışkanı için elde edilirken, en yüksek sıcaklık değerine saf su akışkanının olduğu geriye dönük adım akışlı modelde ulaşılmaktadır. Bununla birlikte, Şekil 3'deki Nu sayısı grafiklerine paralel olarak 0,27 m kanal uzunluğuna kadar h pah uzunluklu modelde ısı transferinin daha iyi

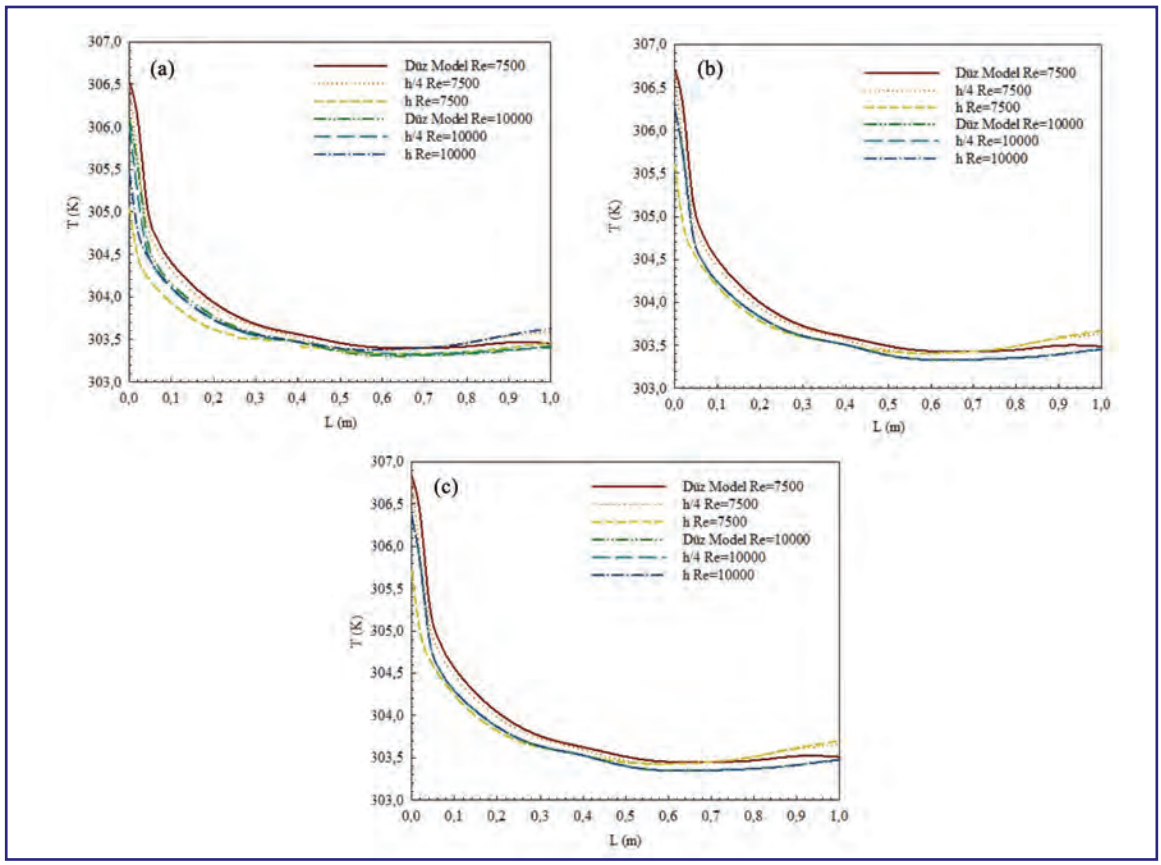


Şekil 3. Nu sayısı değişimi (a) GO-saf su (b) MWCNT-saf su (c) Saf su

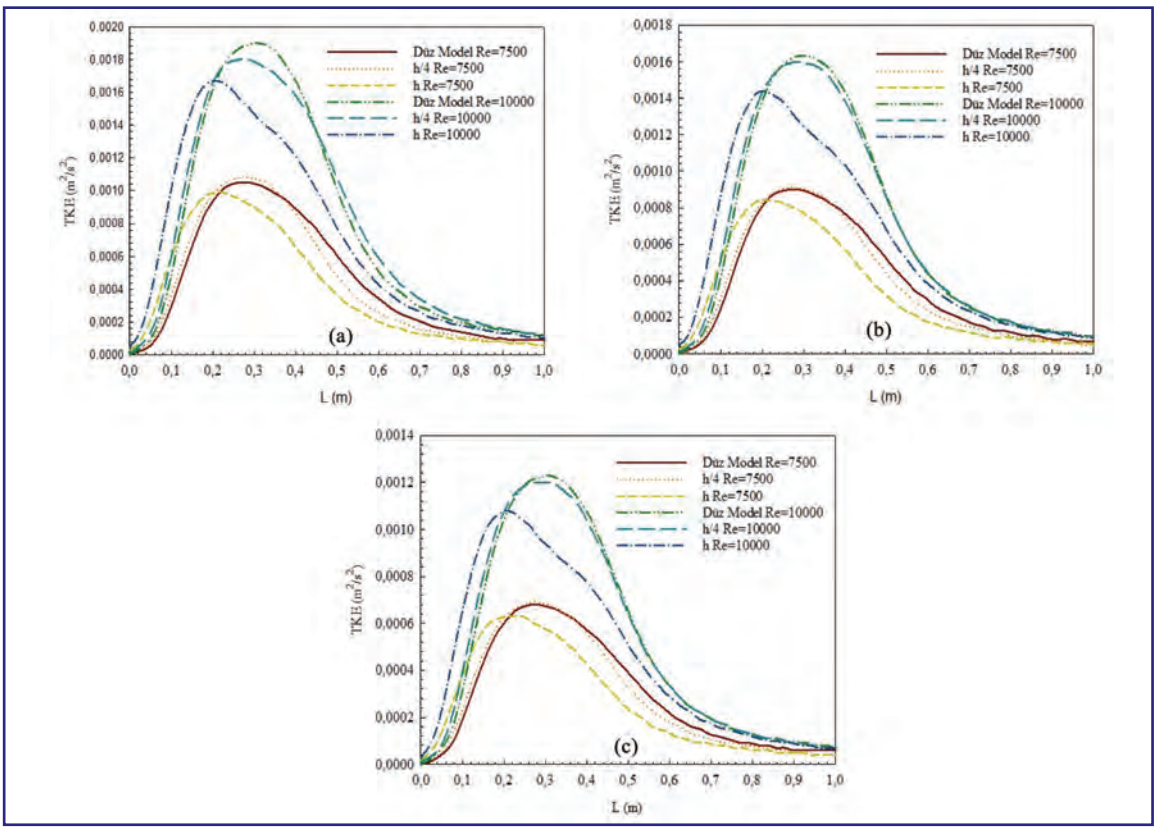
olması sonucu diğer modellere göre akışkan sıcaklığı düşük iken, kanal uzunluğunun bu kısmından sonra akışkan sıcaklıkları h/4 pah uzunluklu modeldekinden daha yükseğe çıkarak kanal sonuna doğru düz modeldeki sıcaklık değerlerinden daha yüksek olmaktadır.

Farklı Re sayılarında kanalın 0,5h adım yüksekliği boyunca sırasıyla %0,01 hacimsel konsantrasyonlu GO-saf su, MWCNT-saf su nanoakışkanları ve saf suya ait türbülans kinetik enerji (TKE) değişimleri Şekil 5 (a), (b) ve (c)'de sunulmaktadır. Türbülans kinetik enerjinin yüksek olması, akışkanın karışmasının bir ölçüsüdür. Bu nedenle, Re sayısının 10000 olduğu değerde tüm pahlı kanallar ve akışkan tipleri için daha yüksek TKE değerleri elde edilmektedir. Ayrıca, kanalların giriş kısmında ayrılmış akış bölgesinde h pah uzunluklu geriye dönük adım akışı modeli için daha yüksek TKE değeri elde edilirken, kanalların ilerleyen kısımlarında h/4 pah uzunluklu kanallar için ulaşılan TKE değerleri daha fazla artış göstermektedir. Yalnızca, ayrılmış akış bölgesinin sonuna doğru düz model için TKE değeri pahlı kanallara göre artış göstererek en yüksek seviyesine ulaşırken, yeniden birleşme bölgesinde kanal sonuna doğru özellikle Re=10000 değeri için pahlı kanalların TKE değerleri düz modele göre daha fazla olmaktadır. Ayrıca, en yüksek akışkan karışma değerine (TKE) GO-saf su nanoakışkanında ulaşılmaktadır.

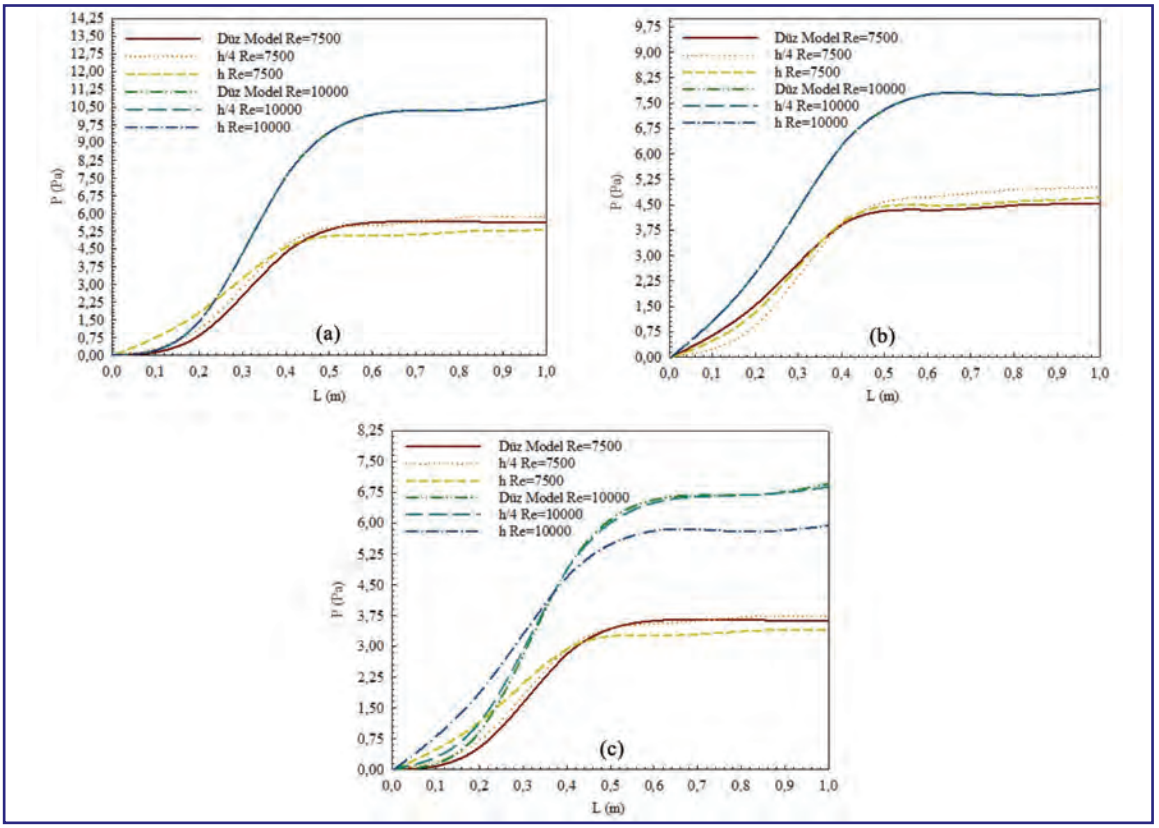
Şekil 6 (a), (b) ve (c)'de farklı Re sayılarında sırasıyla GO-saf su (%0,01) ve MWCNT-saf su (%0,01) nanoakışkanları ve saf suya ait farklı pah uzunluklu kanallar (düz model, h/4 ve h) için 0.5h adım yüksekliğinde kanal boyunca basınç değişimleri gösterilmektedir. Şekil 5'deki TKE değişimlerine paralel olarak akışkan karışmasının daha iyi olduğu nanoakışkanlar için daha yüksek basınç değişimi değerleri elde edilmekle birlikte saf su için ulaşılan basınç değerleri daha düşüktür (Şekil 6 (c)). Ayrıca, özellikle Re=10000'de nanoakışkanlar (GO-saf su ve MWCNT-saf su) için akışın geriye dönük adım kısmına yönlenerek daha iyi bir karışma sağlaması sonucunda pahlı kanallar için düz modelle karşılaştırıldığında birbirine çok yakın değerler elde edildiği Şekil 6 (a) ve (b)'den görülebilmektedir. Bununla birlikte, akışın yeniden birleşme bölgesin-



Şekil 4. Akışkan sıcaklık değişimi (a) GO-saf su (b) MWCNT-saf su (c) Saf su



Şekil 5. Türbülans kinetik enerji (TKE) değişimi (a) GO-saf su (b) MWCNT-saf su (c) Saf su

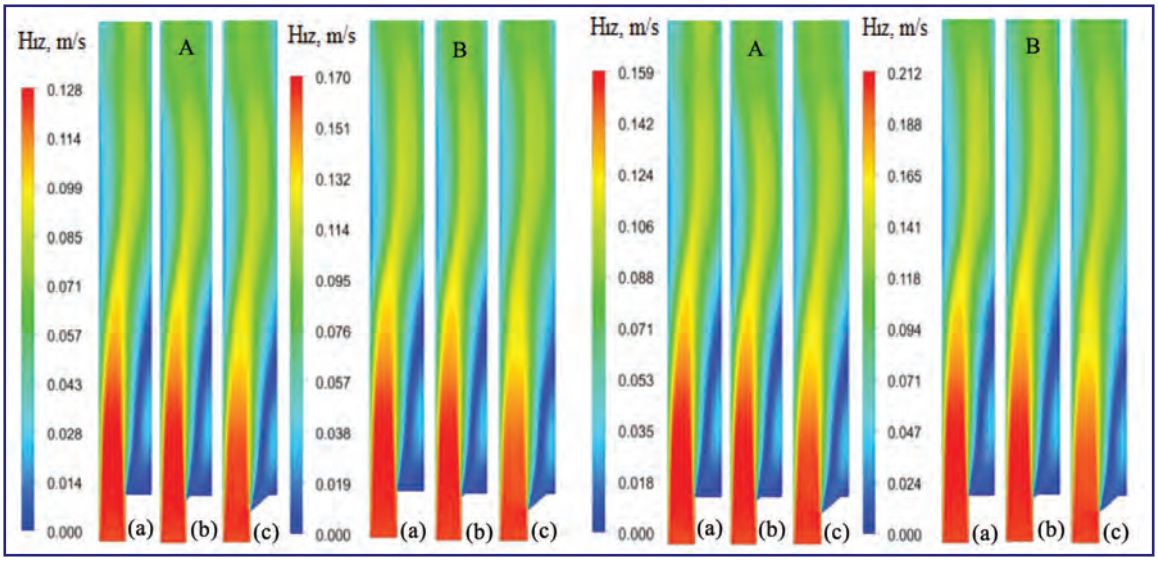


Şekil 6. Basınç değişimi (a) GO-saf su (b) MWCNT-saf su (c) Saf su

den sonra Re= 7500 değerinde saf su (Şekil 6 (c)) ve nanoakışkanlarda TKE değeri azalan akışkanlar için pahlı kanallarda düz modele göre basınç değerlerinde artışlar olduğu saptanmıştır.

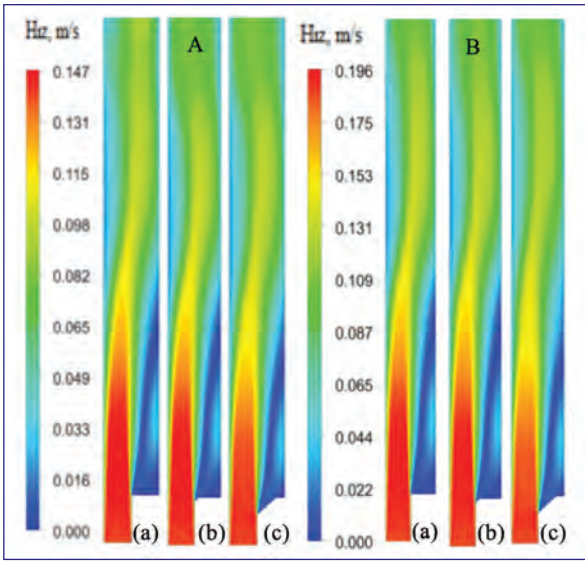
Düz (pahsız) ve farklı pah uzunluklu kanallara ait hız dağılımı konturları Şekil 7,8 ve 9 (a), (b) ve (c)'de sırasıyla saf su, GO ve MWCNT nanoakışkanları için Re sayısının 7500 (7A-8A-9A) ve 10000 (7B-8B-9B) olmak üzere farklı değerlerinde gösterilmektedir. Kanal girişlerinde kırmızı renk ile belirtilen yüksek hızlı akışkan, geriye dönük adım kısımlarında azalarak mavi renk ile belirtilmektedir. Bununla birlikte, kanala pah verildiğinde akışın geriye dönük adıma doğru yönlenmesi sağlanarak bu bölgedeki akış hızlanarak açık mavi renk almaktadır. Ayrıca, özellikle h pah uzunluklu kanalda geriye dönük adım kısmında ayrılmış akış bölgesinde akıştaki koyu mavi renkli kısmın açık maviye doğru dönmesi akışın bu kısımda daha iyi hareketlendiğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, akışın yeniden birleşmesiyle h/4 pah uzunluklu kanallarda kanal sonuna doğru akış hızının h pah uzunluklu kanallardan daha fazla olduğu açık renkli sarı kısmın kanal sonuna kadar şiddetini belirgin şekilde devam ettirmesinden anlaşılabilmektedir. Buna ilaveten, GO-saf su nanoakışkanı için akış hızının hem Re=7500 hem de Re=10000 için en yüksek değerlere ulaştığı şekillerdeki hız dağılımı konturu skalalarındaki maksimum değerlerden görülebilmektedir.

Şekil 10, 11 ve 12'de sırasıyla saf su, %0.01 GO-saf su ve %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanlarına ait sıcaklık dağılımı konturları Reynolds sayısının 7500 (Şekil 10A-11A-12A) ve 10000 (Şekil 10B-11B-12B) değerlerinde düz model ve geriye dönük adımın h/4 ve h pah uzunluklu modelleri için sunulmaktadır. Bütün akışkanlar için sıcaklık konturu dağılımlarından görüldüğü gibi kanala pah verilmemiş düz modelde geriye dönük adım kısmında akışkanın hareketliliği az olduğundan pah verilmiş modellere göre daha fazla ısınma meydana gelmektedir. Bu nedenle, bu kısımda sıcaklık daha açık mavi renktedir (Şekil 10A-B(a), Şekil 11A-B(a) ve Şekil 12A-B(a)). Bununla birlikte, kanala pah verildiğinde, geriye dönük adıma doğru olan ayrılmış akış bölgesinde h pah uzunluklu kanalda akış hareketliliği arttığından köşe kısmında bulunan açık mavi renkli kısım azalarak sıcaklık değişimi tüm kanaldaki akışa yayılmaktadır. Böylece, kanaldaki ısı transferi artırılmış olmaktadır. Ancak, h/4 pah uzunluklu kanallarda kanal uzunluğu boyunca ilerledikçe h pah uzunluklu kanallara göre akışın yeniden birleşme bölgesinde sıcaklıkta meydana gelen artış ısı transferindeki iyileşmenin açık bir göstergesidir. Ayrıca, nanoakışkanın kullanıldığı kanallarda kanala pah verilmesiyle birlikte geriye dönük adım kısmında akışkanda başlatılan hareketlenme ile ısı transferinde daha fazla artış olduğu açık mavi renkli kısımdaki azalmayla belirlenebilir. Çünkü pahla birlikte akış adım kısmına daha iyi nüfuz ederek ısının taşınmasını hızlandırmıştır.

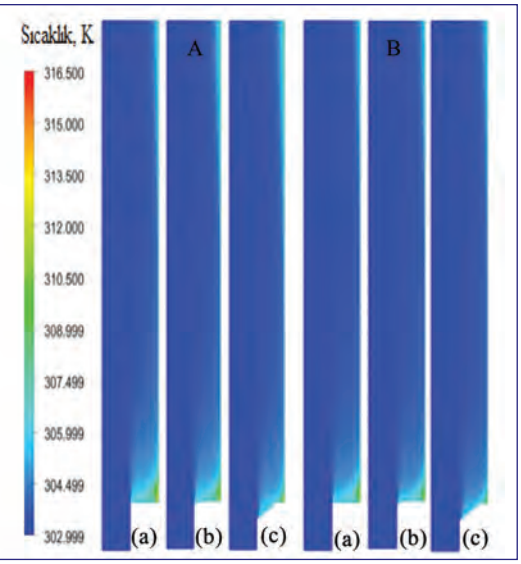


Şekil 7. Saf su akışkanı için hız dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/4 (c) h

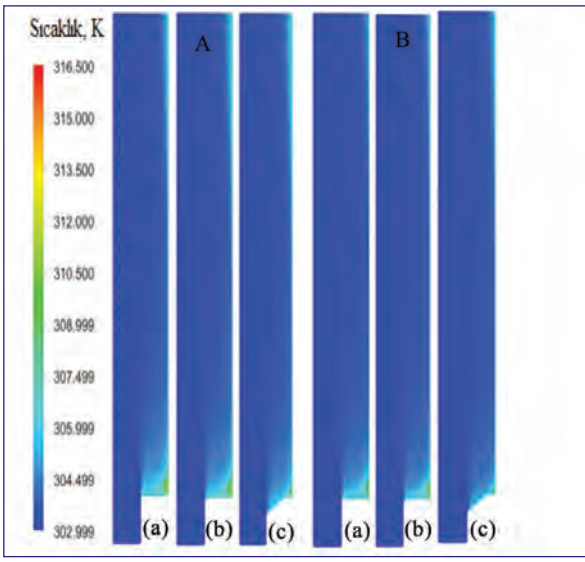
Şekil 8. GO-Saf su akışkanı için hız dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/4 (c) h



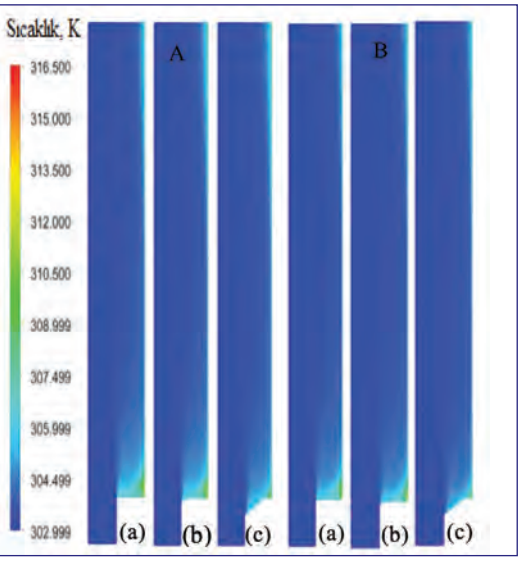
Şekil 9. MWCNT-Saf su akışkanı için hız dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/4 (c) h



Şekil 10. Saf su akışkanı için sıcaklık dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/4 (c) h

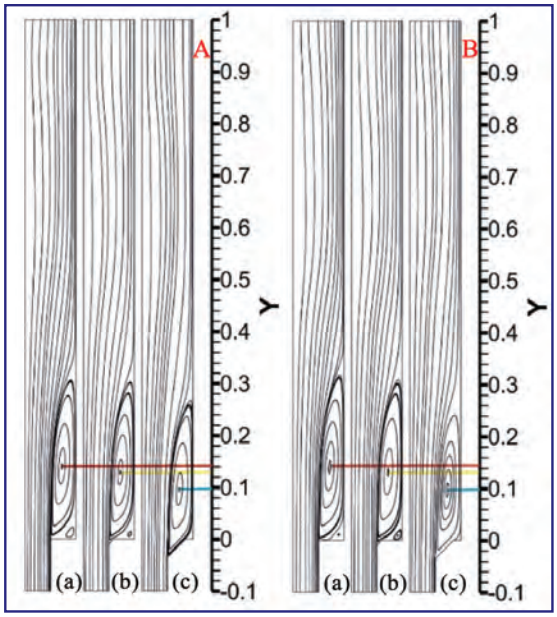


Şekil 11. GO-Saf su akışkanı için sıcaklık dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/4 (c) h

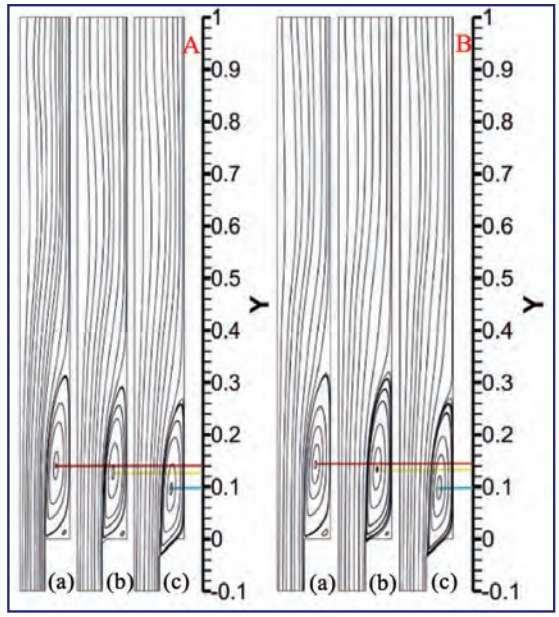


Şekil 12. MWCNT-Saf su akışkanı için sıcaklık dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/4 (c) h

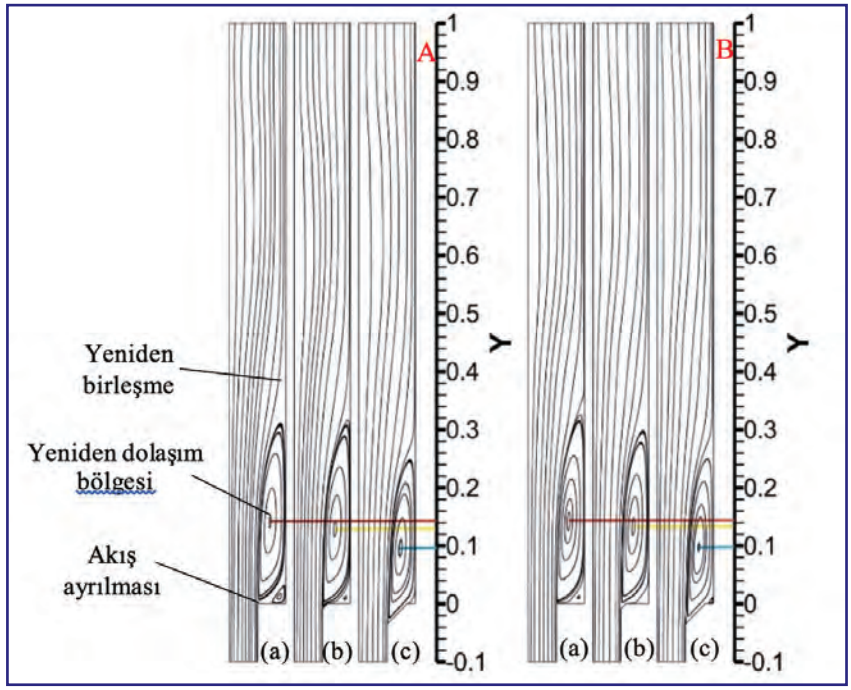
Sırasıyla Şekil 13, 14 ve 15'de A-Re=7500 ve B-Re=10000 için düz ve farklı pah uzunluklu (h/4 ve h) kanallardaki saf su ve %0.01 hacimsel konsantrasyonlara sahip GO-saf su ve MWCNT-saf su nanoakışkanları için akım çizgisi dağılımları görselleştirilmiştir. Yeniden birleşme noktasının uzunluğunun belirlenebilmesi, pahlı kanallarda geriye dönük adım kısmında akışın hareketlendirilebilme durumu hakkında fikir sahibi olunabilmesini sağlamaktadır. Bu amaçla, akım çizgisi dağılımları üzerinde merkez noktasının düşey koordinat uzunlukları belirlenmiştir. Şekillerden de görülebildiği gibi pahlı kanallarda merkez noktası koordinatları düz modele göre daha geridedir dolayısıyla merkez noktasının düşey uzunluğu daha kısadır. Bu durum da bize akışın geriye dönük adıma doğru hareketlendiğinin bir göstergesi olmaktadır. Bununla birlikte, h pah uzunluklu model en kısa merkez noktası çizgisine sahiptir. Bu nedenle, h pah uzunluklu kanalda ayrılmış akış bölgesinde h/4 pah uzunluklu ve düz modeldeki kanala göre geriye dönük adım kısmındaki hareketlenme daha fazla iyileştirilmiştir. Ayrıca, birbirine çok yakın olmakla birlikte hem nanoakışkanlar için hem de



Şekil 13. Saf su akışkanı için akım çizgisi dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/4 (c) h



Şekil 14. GO-Saf su akışkanı için akım çizgisi dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/4 (c) h



Şekil 15. MWCNT-Saf su akışkanı için akım çizgisi dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/4 (c) h

saf su için Re sayısının 10000 değerinde akış hareketlenmesi sonucu artan ısı transferinin yanı sıra akım çizgisinin merkez noktası uzaklığı da azalmıştır. Ayrıca, yeniden dolaşım bölgesi, akış ayrılması ve yeniden birleşmenin olduğu kısımlar Şekil 15 üzerinde gösterilmiştir.

5. GENEL SONUÇLAR

Geriye dönük adım akışına güç dönüştürme sistemlerinin toplayıcıları ve ısı depolama kaplarının iç ve dış akışları gibi birçok cihazda rastlanmakta olup akışın karmaşık yapısı nedeniyle önemli geometrik modellerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, dikey olarak yerleştirilmiş geriye dönük adım akışı geometrisinde h/4 ve h olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının düz modele göre ısı transferi ve türbülanslı akış özellikleri Reynolds sayısının 7500 ve 10000 değerleri için sayısal olarak incelenmiştir. Geriye dönük adım geometrisinde duvarlardan yalnızca bir tanesi sabit sıcaklıkta tutulurken, diğer duvarlar adyabatiktir. Çalışma akışkanı olarak saf su, hacimce %0.01 konsantrasyonlara sahip GO (Grafen oksit)-saf su ve MWCNT (Çok katmanlı karbon nanotüp) nanoakışkanları kullanılmıştır. Modellerde kullanılan adım genişleme oranı 1.5 (3h/2h)'dir. Çalışmanın sonuçları, üç boyutlu, zamandan bağımsız olarak korunum denklemlerinin k-ε türbülans modelli, Boussinesq yaklaşımıyla sonlu hacimler yöntemi olan ANSYS-FLUENT programının kullanılarak çözülmesiyle elde edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda da görüldüğü gibi uygulamada sıvı akışkanlarla çalışılması durumunda özellikle dikey konumlandırmalarda sıcaklık farkı büyük olursa kaldırma etkilerinin dikkate alınması önem arz etmektedir. Bu nedenle, yapılan çalışmada da bu amaçla kaldırma etkileri Boussinesq yaklaşımı kullanılarak dikkate alınmıştır. Sunulan çalışma, literatürde bulunan çalışmanın sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmış olup birbirleriyle uyumlu ve kabul edilebilir oldukları görülmüştür. Sonuçlar, Nu sayısı, akışkan sıcaklık, türbülans kinetik enerji ve basınç değişimleri olarak sunulmuştur. Ayrıca, geriye dönük adım akışı geometrisinde, hız ve sıcaklık konturu ve akım çizgisi dağılımları görselleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmanın sayısal sonuçlarından ulaşılan çıkarımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Re=10000 için h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinin ortalama Nu sayısının sırasıyla %0.01 GO-saf su ve %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanlarının akışında saf su kullanılan geometriden sırasıyla %11.51 ve %10.61 daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Sıcaklık değişimleri incelendiğinde, en düşük akışkan sıcaklığı %0.01 hacimsel konsantrasyonlu GO-saf su nanoakışkanı için elde edilirken, en yüksek sıcaklık değerine saf su akışkanının olduğu geriye dönük adım akışlı modelde ulaşılmaktadır. Bununla birlikte, ayrılmış akış bölgesinde h pah uzunluklu modelde ısı transferinin daha iyi olması sonucu diğer modellere göre akışkan sıcaklığı düşük iken, akışın yeniden birleşmesiyle birlikte akışkan sıcaklıkları h/4 pah uzunluklu modeldekinden daha yükseğe çıkarak kanal sonuna doğru düz modeldeki sıcaklık değerlerinden daha yüksek olmaktadır.
- Kanalların giriş kısmında ayrılmış akış bölgesinde h pah uzunluklu geriye dönük adım akışı modeli için daha yüksek TKE değeri elde edilirken, kanalların ilerleyen kısımlarında h/4 pah uzunluklu kanallar için ulaşılan TKE değerleri daha fazla artış göstermektedir. Yeniden birleşme bölgesinde kanal sonuna doğru özellikle Re=10000 değeri için pahlı kanalların TKE değerleri düz modele göre daha fazla olmaktadır. Ayrıca, en yüksek akışkan karışma değerine (TKE) GO-saf su nanoakışkanında ulaşılmaktadır.
- Karışmasının daha iyi olduğu nanoakışkanlar için daha yüksek basınç değişimi değerleri elde edilmekle birlikte saf su için ulaşılan basınç değerleri daha düşüktür. Ayrıca, özellikle Re=10000'de GO-saf su ve MWCNT-saf su nanoakışkanları için akışın geriye dönük adım kısmına yönlenerek daha iyi bir karışma sağlaması sonucunda pahlı kanallar için düz modelle karşılaştırıldığında birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Bununla birlikte, akışın yeniden birleşme bölgesinden sonra Re=7500 değerinde saf su ve nanoakışkanlarda TKE değeri azalan akışkanlar için pahlı kanallarda düz modele göre basınç değerlerinde artışlar olduğu saptanmıştır.
- Hız konturu dağılımlarından görüldüğü gibi özellikle h pah uzunluklu kanalda geriye dönük adım kısmında ayrılmış akış bölgesinde akıştaki koyu mavi renkli kısmın açık maviye doğru dönmesi akışın bu kısımda daha iyi hareketlendiğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, akışın yeniden bir-

leşmesiyle h/4 pah uzunluklu kanallarda kanal sonuna doğru akış hızının h pah uzunluklu kanallardan daha fazla olduğu açık renkli sarı kısmın kanal sonuna kadar şiddetini belirgin şekilde devam ettirmesinden anlaşılabilmektedir.

- Sıcaklık konturu dağılımlarına bakıldığında ise kanala pah verilmemiş düz modelde geriye dönük adım kısmında akışkanın hareketliliği az olduğundan pah verilmiş modellere göre daha fazla ısınma meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle, bu kısımda sıcaklık daha açık mavi renktedir. Bununla birlikte, kanala pah verildiğinde, geriye dönük adıma doğru olan ayrılmış akış bölgesinde h pah uzunluklu kanalda köşe kısmında bulunan açık mavi renkli kısım azalarak sıcaklık değişimi tüm kanaldaki akışa yayılmaktadır. Ayrıca, h/4 pah uzunluklu kanallarda kanal uzunluğu boyunca ilerledikçe h pah uzunluklu kanallara göre akışın yeniden birleşme bölgesinde sıcaklıkta meydana gelen artış ısı transferindeki iyileşmenin açık bir göstergesidir.
- Akışkanlar için pahlı kanallarda merkez noktası koordinatları düz modele göre daha geridedir dolayısıyla merkez noktasının düşey uzunluğu daha kısa olmaktadır. Bu durum da akışın geriye dönük adıma doğru hareketlendiğinin bir göstergesi olmaktadır.
- Sonuç itibariyle, ısı transferini artırmak için ayrılmış akış bölgesini azaltacak kanal tasarımları yapılması gerekmektedir. Ayrıca, nanoakışkanlar gibi yüksek ısı iletim katsayılı akışkanların seçimi ısı transferi miktarının fazla olması istenen uygulamalarda son derece önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) birimi tarafından SMYO-026 proje numarası ile desteklenmiştir.

SEMBOLLER

D_h : Kanalın hidrolik çapı, m
h : Taşınım ısı transfer katsayısı, $Wm^{-2}K^{-1}$
k : Isıl iletkenlik katsayısı, $Wm^{-1}K^{-1}$
L : Kanal uzunluğu, m
U_b : Kanal girişinde akışkanın ortalama hızı, ms^{-1}
c_p : Akışkanın özgül ısısı, $Jkg^{-1}K^{-1}$
P : Kanalın çevre uzunluğu, m
p : Basınç, Nm^{-2}
$\bar{T}$: Ortalama sıcaklık, K
$\bar{u}'$, $\bar{v}'$, $\bar{w}'$: x,y,z yönlerindeki ortalama dalgalı hız bileşenleridir, ms^{-1}
$\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$: x,y,z yönlerindeki ortalama hız bileşenleridir, ms^{-1}
Re : Reynolds sayısı ($=V_\infty D_h/\nu$), boyutsuz
Nu : Nusselt sayısı ($=h D_h/k$), boyutsuz
μ : Dinamik viskozite, $kgs^{-1}m^{-1}$
μt : Türbülans viskozitesi, $kgs^{-1}m^{-1}$
υ : Kinematik viskozite, m^2s^{-1}
ρ : Yoğunluk, kgm^{-3}
ϕ : Viskoz dağılım terimi, m^2s^{-3}
k' : Türbülans kinetik enerji, m^2s^{-1}
ε : Türbülans dağılım oranı, m^2s^{-3}

Alt İndisler

s : Yüzey
∞ : Akışkan
m : Ortalama

KAYNAKLAR

[1] Trisaksri, V., Wongwises, S., "Critical Review of Heat Transfer Characteristics of Nanofluids", Ren. Sust. Energy Reviews, vol. 11, pp. 512-523, 2007.

[2] Maxwell, J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism, 2nd ed., Oxford Clarendon Press, Cambridge, England, 1904.

[3] Gupte, S.K., Advani, S.G., Huq, P., "Role of Micro-Convection Due to Non-Affine Motion of Particles in A Ono-Disperse Suspension", Int. J Heat and Mass Transf., vol. 38, pp. 2945-2958, 1995.

[4] Kim, S.J., Bang, I.J., Buongiorno, J., Hu, L.W., "Surface Wettability Change During Pool Boiling of Nanofluids and Its Effect on Critical Heat Flux", Int. J Heat and Mass Transf., vol. 50, pp. 4105-4116, 2007.

[5] Kwark, S.M., Kumar, R., Moreno, G., Yoo, J., You, S.M., "Pool Boiling Characteristics of Low Concentration Nanofluids", Int. J Heat and Mass Transf., vol. 53, pp. 972-981, 2010.

[6] Hong, K.S., Hong, T.K., Yang, H.S., "Thermal Conductivity of Fe Nanofluids Depending on the Cluster Size of Nanoparticles", Applied Physics Lett., vol. 88, pp. 1-3, 2006.

[7] Hwan, L., Hwang, K., Janga, S., Lee, B., Kim, J., Choi, S.U.S., Choi, C., "Effective Viscosities and Thermal Conductivities of Aqueous Nanofluids Containing Low Volume Concentrations of Al2O3 Nanoparticles", Int. J Heat and Mass Trans., vol. 51, pp. 2651-2656, 2008.

[8] Xie, H., Lee, H., Youn, W., Choi, M., "Nanofluids Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and Their Enhanced Thermal Conductivities", J Applid Physics, vol. 94, pp. 4967-4971, 2003.

[9] Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F., Schönung, B., "Experimental and theoretical İnvestigation of Backward-Facing Step Flow", J. Fluid Mech., vol. 127, pp. 473-496, 1983.

[10] Nadge, P., Govardhan, R., "High Reynolds Number Flow Over A Backward-Facing Step: Structure of the Mean Separation Bubble", Exp. Fluids, vol. 55, pp. 1-22, 2014.

[11] Kasagi, N., Matsunaga, A., "Three-Dimensional Particle-Tracking Velocimetry Measurement of Turbulence Statistics and Energy Budget in A Backward-Facing Step Flow", Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 16, pp. 477-485, 1995.

[12] Le, H., Moin, P., Kim, J., "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow Over A Backward-Facing Step", J. Fluid Mech., vol. 330, pp. 349-374, 1997.

[13] Simpson, R.L., "Turbulent Boundary-Layer Separation", Annu. Rev. Fluid Mech., vol. 21, pp. 205-232, 1989.

[14] Vogel, J.C., Eaton, J.K., "Combined Heat Transfer and Fluid Dynamic Measurements Downstream of A Backward-Facing Step", J. Heat Transfer, vol. 107, pp. 922-929, 1985.

[15] Keating, A., Piomelli, U., Bremhorst, K., Nei, S., "Large-Eddy Simulation of Heat Transfer Downstream of A Backward-Facing Step", J. Turbul., vol. 5, pp. 1-27, 2004.

[16] Avancha, R.V., Pletcher, R.H., Large Eddy Simulation of the Turbulent Flow Past A Backward-Facing Step with Heat Transfer and Property Variations", Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 23, pp. 601-614, 2002.

[17] ANSYS Inc., ANSYS FLUENT User's Guide, Fluent, Netherland, Lebanon, ANSYS Press, 2003.

[18] Karabulut, K., Buyruk, E., Kılınc, F., "Grafen Oksit Nanoparçacıkları İçeren Nanoakışkanın Taşınım Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Artışı Üzerindeki Etkisinin Düz Bir Boruda Deneysel Olarak Araştırılması", Mühendis ve Makina, cilt. 59, sayı. 690, s. 45-67, 2018.

[19] Karabulut, K., Buyruk, E., Kılınc, F., "Experimental and Numerical İnvestigation of Convection Heat Transfer in a Circular Copper Tube Using Graphene Oxide Nanofluid", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 42, pp. 1-16, 2020.

[20] Karabulut, K., Buyruk, E., Yapıcı, K., Kılınc, F., "Karbon Nanotüp İçeren Nanoakışkanın Isı Transferi Artışı ve Basınç Düşüşü Performansının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi", in Proc. ULIBTK'15, 2015, p. 96.

[21] Togun, H., Safaei, M.R., Sadri, R., Kazi, S.N., Badarudin, A., Hooman, K., Sadeghinezhad, E., "Numerical Simulation of Laminar to Turbulent Nanofluid Flow and Heat Transfer Over A Backward-Facing Step", App. Mathematics and Comp., vol. 239, pp. 153-170, 2014.