SETSCI conference proceedings
SETSCI Conference Proceedings
9, 363-372, 2019

4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences
November 22-24, 2019, Samsun, Turkey

https://doi.org/10.36287/setsci.4.6.091
2687-5527/ © 2019 The Authors. Published by SETSCI

ISAS WINTER - 2019

Karbon Nanotüp Nanoakışkanının Geriye Dönük Adım Akışında Isı Transferi ve Akış Karakteristiğinin Araştırılması

Doğan Engin Alnak[1], Koray Karabulut[2*+]

[1]*Otomotiv Mühendisliği/Teknoloji Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Universitesi, Sivas, Türkiye*
[2]*Elektrik ve Enerji Bölümü/Sivas Meslek Yüksek Okulu, Sivas Cumhuriyet Universitesi, Sivas, Türkiye*
[*]*Sorumlu Yazar: kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr*
[+]*Sunucu: kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr*
Sunum/Bildiri Türü: Sözlü / Tam metin

Özet – Geriye dönük adım akışı, ısı depolama kaplarının iç ve dış akışında veya güç dönüştürme sistemlerinin toplayıcıları gibi birçok cihazda önemli olup akışın karmaşık yapısı nedeniyle önemli geometrik modellerden biri olarak göze çarpmaktadır. Bu çalışmada, dikey olarak yerleştirilmiş geriye dönük adım akışı geometrisinde h/2 ve 3h/4 olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının düz (pahsız) geometriye göre ısı transferi ve türbülanslı akış özellikleri sayısal olarak incelenmiştir.Geriye dönük adım geometrisinde duvarlardan yalnızca bir tanesi sabit sıcaklıkta tutulurken, diğer duvarlar adyabatiktir. Çalışma akışkanı olarak saf su ve hacimce %0.01 konsantrasyonlu MWCNT-saf su nanoakışkanı kullanılmıştır. Adım genişleme oranı 1.5' 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. Sunulan çalışma, literatürde bulunan çalışmanın sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmış olup birbirleriyle uyumlu ve kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Sonuçlar, Nu sayısı, akışkanın sıcaklık, türbülans kinetik enerji ve basınç değişimleri olarak sunulmuştur. Ayrıca, geriye dönük adım akışı geometrisinde, sıcaklık, hız ve akım çizgileri dağılımları görselleştirilmiştir. Re=10000 için adım geometrisinin aşağı akım bölgesinde MWCNT-saf su nanoakışkanının kullanıldığı normal geometrinin 3h/4 adım geometrisine göre yaklaşık %8.9 daha fazla ortalama Nu sayısı artışı sağladığı belirlenmiştir.
Anahtar Kelimeler *– Ayrılmış akış, geriye dönük adım akışı, ısı transferi, karbon nanotüp, soğutma*

Research of Heat Transfer and Flow Characteristics of Carbon Nanotube Nanofluid at Backward-Facing Step Flow

Abstract – The backward-facing step flow is important in many devices, such as the internal and external flow of heat storage containers or the collectors of power conversion systems, and stands out as one of the important geometric models due to the complex structure of the flow. In this study, heat transfer and turbulent flow properties of step corner structures with different chamfer lengths as h/2 and 3h/4 according to smooth (without chamfer) geometry have been numerically investigated at vertically placed backward-facing step flow geometry. In the backward-facing step geometry, only one of the walls has been kept at a constant temperature, while the other walls are adiabatic. Distilled water and MWCNT-distilled water nanofluid with a concentration of 0.01% by volume have been used as working fluid. Step expansion rate is 1.5. The results of the study have been obtained by solving three-dimensional, steady conservation equations using k-ε turbulence model, ANSYS-FLUENT program which is finite volume method with Boussinesq approach. 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 with each other. The results have been presented as the variations of Nu number, fluid temperature, turbulence kinetic energy and pressure. In addition, temperature, velocity and streamline distributions have been visualized in backward-facing step flow geometry. For Re=10000, normal geometry the where MWCNT-distilled water nanofluid has been used in the downstream region of the step geometry has provided an average Nu number increase of approximately 8.9% according to 3h/4 step geometry.
Keywords *– Separated flow, backward-facing step flow, heat transfer, carbon nanotube, cooling*

I. GİRİŞ

Akışkanlar mekaniğinde en önemli teknik uygulamalardan birisi ısı transferidir. Özellikle son yıllarda sıvı metallerdeki gibi yüksek ısı iletkenlik değerlerine ulaşılabildiği nanoakışkanlar da özel araştırma konusu haline gelmiştir. Bilindiği üzere, 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 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 süspansiyon 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]' nın yapmış oldukları sayısal araştırmalardan birinde detaylı olarak türbülans hareketlerinin etkileşimleri incelenmiştir. Onların yüksek çözünürlükteki verileriyle deneylerde 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 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/2 ve 3h/4 olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının pahsız (düz-normal) geometriye göre ısı transferi ve türbülanslı akış özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Geriye dönük adımın arkasındaki duvarlardan biri sabit sıcaklıkta tutulurken diğerleri adyabatiktir. Çalışma akışkanları olarak %0.01 hacimsel konsantrasyonlu MWCNT-saf su nanoakışkanı ve saf su kullanılmıştır. Akışkanların kanala giriş sıcaklıkları 423 K iken geriye dönük adımın arkasındaki duvarın sıcaklığı 436.5 K' dir. Geriye dönük adımın genişleme oranı 1.5' dir. Çalışma, Reynolds sayısının 5000 ve 10000 olduğu değerlerde gerçekleştirilmiştir. 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.

II. 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

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

Momentum denklemi

x momentum denklemi

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

y momentum denklemi

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

z momentum denklemi

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

burada $\bar{u}'$, $\bar{v}'$, $\bar{w}'$ sırasıyla x,y,z yönlerindeki ortalama dalgalı hız bileşenleridir.

Enerji denklemi

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

Bu denklemlerde, ρ yoğunluk (kg/m^3), ν kinematik viskozite (m^2/s), p basınç (N/m^2), k ısıl iletkenlik (W/mK), $\bar{T}$ ortalama sıcaklık (K), c_p özgül ısı (J/kgK), ve $\overline{u}, \overline{v}, \overline{w}$ 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'ye 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

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

Türbülans viskozitesi

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

Türbülans kinetik enerji

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

Viskoz dağılım terimi

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

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

Türbülans kinetik enerji dağılım denklemi

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

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 aşağıdaki gibidir;

C_μ =0.09, $C_{1\varepsilon}$ = 1.44, $C_{2\varepsilon}$ = 1.92, σ_k = 1 ve σ_ε = 1.3.

Re sayısı aşağıda verilen denklemle hesaplanmaktadır

$$Re = \frac{V_\infty D_h}{\nu} \quad (9)$$

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

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

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

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

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

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

Ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_m = \frac{1}{L}\int_0^L h dx \quad (12)$$

Ortalama Nu sayısı

$$Nu_m = \frac{h_m D_h}{k} \quad (13)$$

Basınç düşüşü

$$\Delta P = f\,\frac{L}{D_h}\frac{\rho V^2}{2} \quad (14)$$

Burada ΔP kanal boyunca akış yönündeki basınç düşüşü ve f sürtünme faktörüdür.

III. GEOMETRİK MODEL

Şekil 1a' da geriye dönük adım geometrisinin pahsız (normal) geometrik yapısı gösterilirken, Şekil 1b' de ise h/2 ve 3h/4 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. Kanalaın 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/2 ve 3h/4 uzunluklarındadır. Kullanılan akışkanlar saf su ve %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanı olup, Reynolds sayısının 10000 olduğu değer için sırasıyla akışkanların kanala giriş hızları (U_b) 0.1612 m/s ve 0.1859 m/s' dir. Akışkanın kanala giriş sıcaklığı 423 K iken geriye dönük adımın arkasındaki kısmın sıcaklığı ise 436.5 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. %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanının termofiziksel değerleri [18] ρ=998 kg/m^3, c_p=4179.8 J/kgK, k=0.676 W/mK, μ=0.000928 Ns/m^2 iken saf suyun termofiziksel değerleri ρ=995.8 kg/m^3, c_p=4178.4 J/kgK, k=0.6172 W/mK, μ=0.0008034 Ns/m^2' dir.

Bu çalışma şu kabuller altında gerçekleştirilmiştir.

a) Geriye dönük adım akışı için akış alanı üç boyutlu, zamandan bağımsız ve türbülanslıdır.

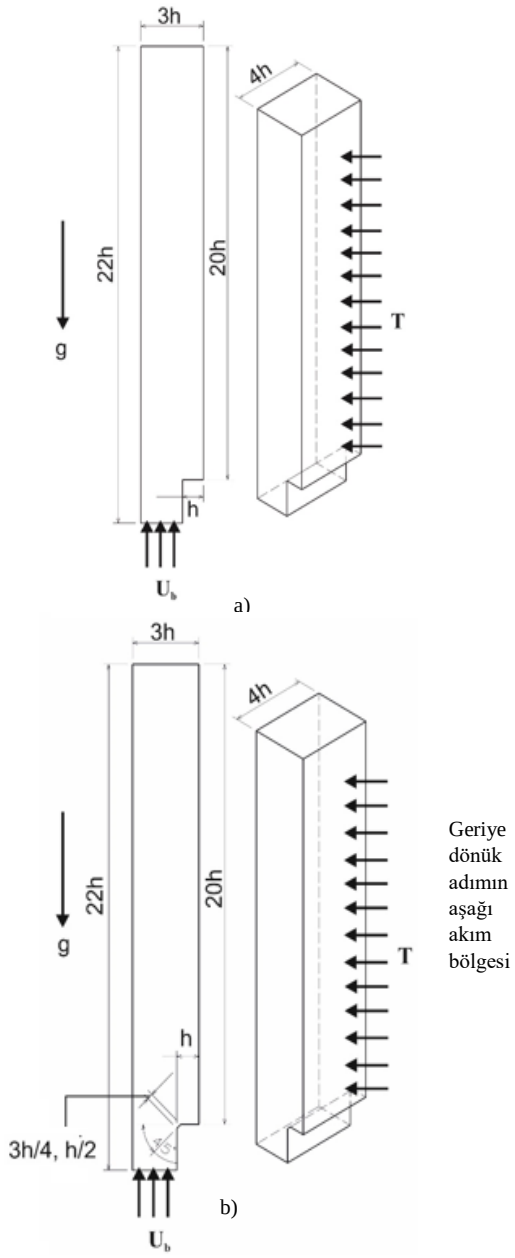
b) Hesaplamalar sıkıştırılamaz akış için yapılmıştır.

c) Çalışma akışkanları olarak saf su ve hacimce %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanı kullanılmıştır.

d) Geriye dönük adımın arkasındaki duvar yüzeyine sabit 436.5 K yüzey sıcaklığı uygulanırken diğer duvarlar adyabatiktir.

e) Akışkanların ısıl özellikleri sabittir.

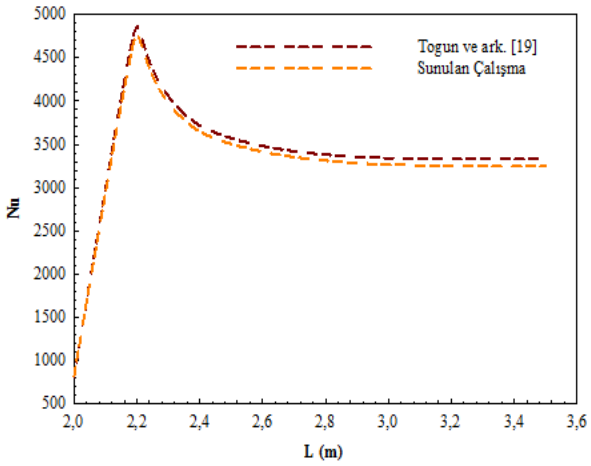
f) Hem akışkanlar hem de duvarlar için ısı üretimi yoktur.



Şekil 1. Geriye dönük adım geometrisi a) Pahsız (normal) b) h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu

IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

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. [19] tarafından yapılan sayısal çalışma ile sunulan çalışma karşılatırılmış ve sonuçların birbirleriyle oldukça uyumlu oldukları görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmanın sonuçlarının makul ve kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2. Togun ve ark. [19]' un sayısal çalışması ile sunulan çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması

Ağ sayısının ortalama Nu sayısı (Nu_m) ve akış hızı (V_m) 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/2 ve 3h/4 pah uzunluklarına sahip geriye dönük adım akışına sahip kanalarda kullanılan ağ elemanı sayıları da Tablo 2' de gösterilmiştir.

Tablo 1. Pahsız (normal) kanalda Nu_m ve V_m için ağ testi sonuçları

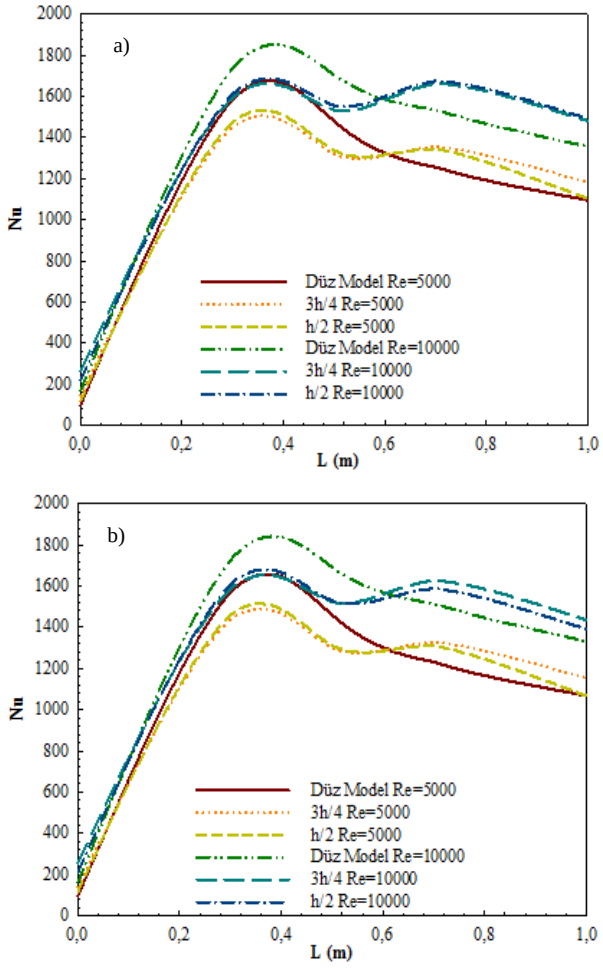
Ağ Sayısı	Nu_m	V_m (m/s)
939495	1185.25	0.034254
988942	1196.56	0.034824
1080420	1196.48	0.344715

Tablo 2. Pahsız, h/4 ve h/2 pah uzunluklu kanaldaki ağ sayıları

Kanal Tipi	Ağ Sayısı
Düz Model	988942
3h/4 Model	990582
h/2 Model	988594

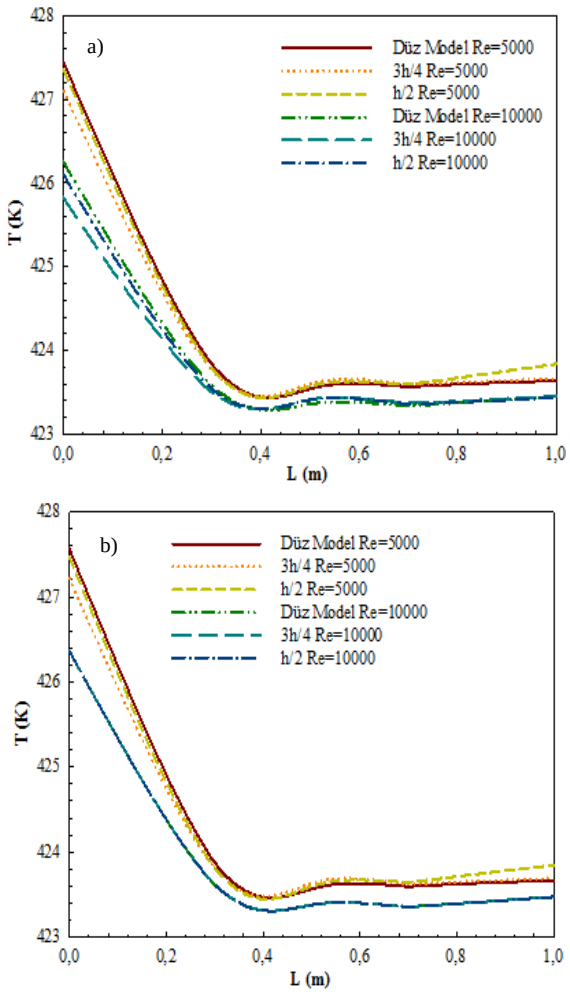
Şekil 3 a ve b' de sırasıyla %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanı ve saf su için Reynolds sayısının 5000 ve 10000 değerlerinde düz model ve h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adımın aşağıakım bölgesindeki (sabit yüzey sıcaklığında tutulan kısım) Nu sayısı değişimleri gösterilmektedir. Geriye dönük adım akışında ayrılmış bölgenin olduğu kanalın aşağıakım bölgesindeki yaklaşık 0.3 m' lik kısma kadar Nu sayısı değerleri birbirine çok yakın olmakla birlikte, ayrılmış akış bölgesinin sonuna doğru kanal yüzeyi ile akışkan arasındaki sıcaklık farkının en fazla olduğu düz model için Nu sayısı değerleri pahlı modeller olan h/2 ve 3h/4 modellerine göre artmaktadır. Ancak, akışın yeniden birleşmeye başladığı yaklaşık 0.5 m' lik kanal uzunluğundan sonra akışkan ve yüzey arasındaki sıcaklık farklarının daha fazla olduğu h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu modeller için düz modele göre daha yüksek Nu sayısı değerleri elde edilmektedir. Re=10000 için adım geometrisinin aşağı akım bölgesinde MWCNT-saf su

nanoakışkanının kullanıldığı normal geometrinin 3h/4 adım geometrisine göre yaklaşık %8.9 daha fazla ortalama Nu sayısı artışı sağladığı saptanmıştır. Su akışkanı için de benzer davranış elde edilmekle birlikte ısı iletim katsayısı, sudan daha yüksek olan hacimce %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanı için daha yüksek Nu sayısı değerleri elde edilmiştir. Buna ilaveten, her iki akışkan için de Re=10000 için elde edilen Nu sayısı değerlerinin Re=5000' den daha fazla olduğu Şekil 3 a ve b' den görülebilmektedir.



Şekil 3. Nu sayısı değişimi a) MWCNT-Saf su b) Saf su

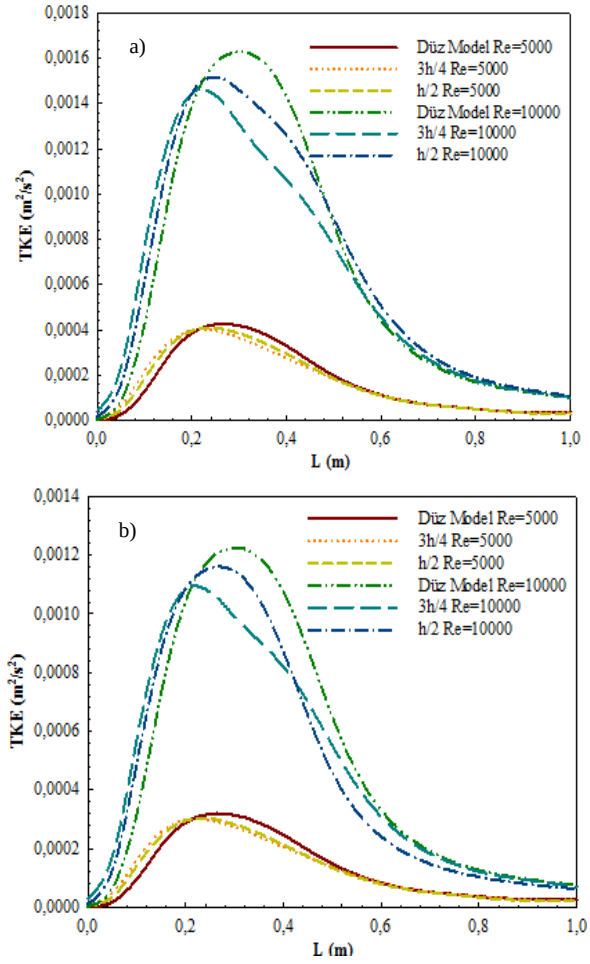
Şekil 4a ve b' de sırasıyla %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanı ve saf su akışkanlarına ait düz model ve h/2 ve 3h/4 pah uzunluğuna sahip geriye dönük adım akışı geometrilerindeki aşağıakım bölgesinde h yükseklikli adımın yarı yüksekliği olan 0.5h yüksekliği için kanal boyunca akışkanların sıcaklık değişimleri gösterilmektedir. Sıcaklık değerleri incelendiğinde, MWCNT-saf su nanoakışkanı için özellikle ayrılmış akış bölgesinde oluşan sıcaklık farklılıkları daha net bir şekilde görülebilmektedir. Düz kanal için bu bölgede pahlı modellere göre durgun olan akışkan nedeniyle fazla olan ısınma sonucu akışkanda sıcaklık artışı daha belirgindir. Bununla birlikte, akışkanın birleşme bölgesinden sonra düz modele göre pahlı modellerde daha belirgin artışlar görülmektedir. Geriye dönük adımın giriş bölgesinde yüksek olan sıcaklık farkı nedeniyle ısı transferi daha fazla olmakta ancak akışkan ve yüzey arasında azalan sıcaklık farkı sonucu ısı transferinin azalmasıyla akışkan sıcaklıkları birbirine yaklaşarak yaklaşık sabit devam etmektedir. Ayrıca, özellikle Re=10000 değeri için nanoakışkana göre viskozitesi ve yoğunluğu daha düşük olan su akışkanı için ayrılmış akış bölgesinde karışmanın daha iyi olması nedeniyle akışkan sıcaklıkları birbirine çok yakın seyretmektedir. Bununla birlikte, Nu sayısı değerlerine bakıldığında 3h/4 pah uzunluğunun Nu sayısı değerinin az da h/2 pah uzunluğundan yüksek olduğu görülse de h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu modellerin sıcaklık değerleri birbirlerine çok yakındır.



Şekil 4. Akışkan sıcaklık değişimi a) MWCNT-Saf su b) Saf su

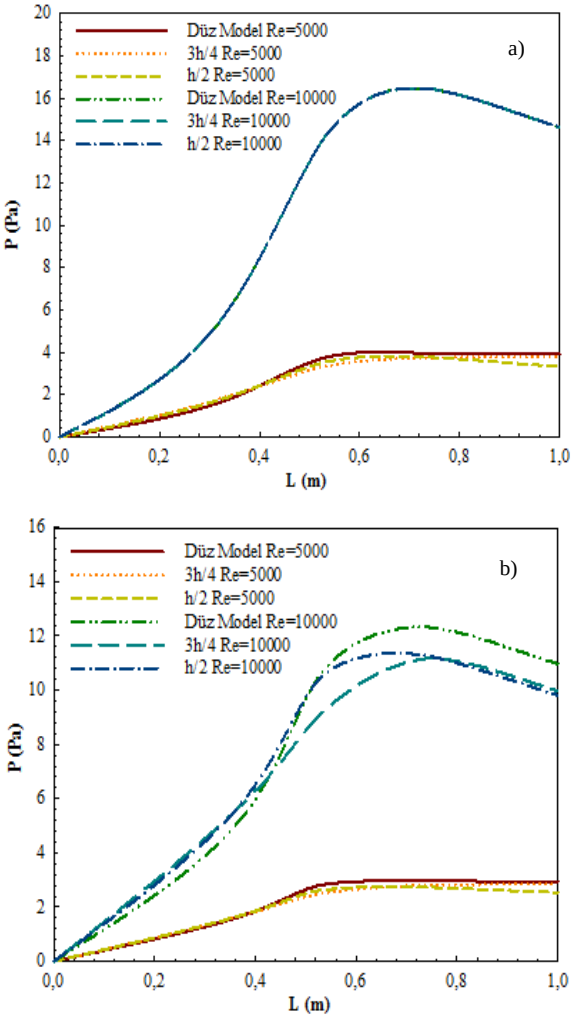
Şekil 5a ve b' de Re=5000 ve 10000 değerleri için sırasıyla %0.01 MWCNT-saf su ve saf su akışkanlarına ait 0.5h adım yüksekliğindeki kanal hattı boyunca türbülans kinetik enerji değişimleri gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji, akışın türbülans değerinin bir ölçüsüdür. Şekillerden de kolaylıkla görülebildiği gibi akış ayrılmasının olduğu bölgede en yüksek TKE değeri 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım akışı bölgesi için elde edilirken, en düşük TKE değerleri düz kanal için elde edilmektedir. Bununla birlikte, akışın birleşme bölgesinden sonra her iki akışkan için de TKE değerleri pahlı kanallar için azalarak, düz kanalın TKE değerine yaklaşmaktadır.

Re=10000 değeri için MWCNT-saf su nanoakışkanında yeniden birleşme bölgesinde h/2 pah uzunluklu model için TKE değeri daha fazla iken aynı bölgede saf su için 3h/4 değeri daha baskın hale gelmektedir. Pahlı kanalların türbülans kinetik enerjileri ayrılmış akış bölgesinde azaldığından yeniden birleşme bölgesinde düz kanalın TKE değerlerine yaklaşmaktadır. Bununla birlikte, nanoakışkanın viskozite değerinin su akışkanına göre daha fazla olmasına rağmen araştırılan pah uzunluklarında sağlanan yüksek karışma nedeniyle nanoakışkan için daha fazla TKE değerleri elde edilmektedir.



Şekil 5. Türbülans kinetik enerji değişimi
a) MWCNT-saf su b) Saf su

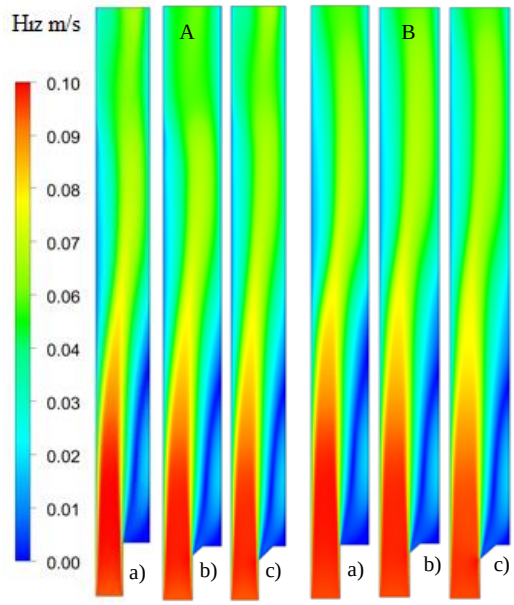
Farklı Re sayılarında sırasıyla %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanı ve saf su akışlarına ait 0.5h adım yüksekliğinde kanal boyunca akışkanların basınç değişimleri Şekil 6a ve b' de sunulmaktadır. Her iki akışkan için de ayrılmış akış bölgesinden yeniden birleşme bölgesine doğru basinç değerlerinde artış meydana gelirken, özellikle MWCNT-saf su nanoakışkanı için düz model ve farklı pah uzunlukları için basınç değerleri birbirine çok yakındır. Saf su nanoakışkanı için ise özellikle yeniden birleşme bölgesinde kanal sonuna doğru düz kanal için akışkanın basınç değerinin h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu kanallardan daha fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, nanoakışkan için akışkan içinde artan hareketlilik nedeniyle saf suya göre daha yüksek basınç değerleri elde edilmektedir. Ayrıca, hız artışıyla basınç değerinin artışına bağlı olarak Re=10000 için basınç değerleri Re=5000' e göre daha yüksek değerlerdedir.



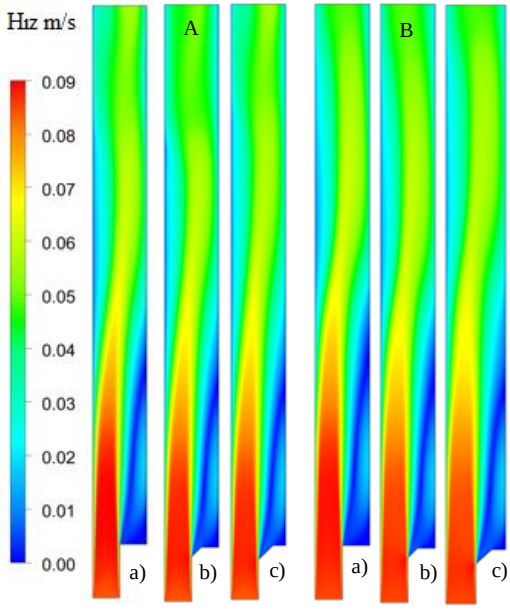
Şekil 6. Basınç değişimi a) MWCNT-saf su b) Saf su

Şekil 7 ve 8' de sırasıyla hacimce %0.01 MWCNT-saf su nanoakışkanı ve saf su akışkanları için geriye dönük adım akışı modellerinin olduğu kanallarda A-Re=5000 B-Re=10000 ve a) Düz b) h/2 c) 3h/4 pah uzunluklu kanallar için hız dağılımı konturları verilmektedir. Hız dağılımı konturlarında geriye dönük adım kısmında koyu mavi renk olan kısım hızın en az olduğu bölgeyi yani yeniden dolaşım bölgesinin olduğu kısmı gösterirken hızın en fazla olduğu kısım ise koyu kırmızı renkle belirtilen jet akışın da oluştuğu giriş kısmıdır. Bu kısımdan sonra hız kanal sonuna doğru azalarak ilerlemektedir. Adım kısmına pah uzunluğu verildiğinde akış geriye dönük adım bölgesine daha fazla yönlenmektedir. Böylece, bu kısımda akış hareketliliği artırılmakta ve koyu mavi renkli kısım açık maviye doğru renk değiştirmektedir. 3h/4 pah uzunluğunda h/2' ye göre özellikle akış ayrılmasının olduğu geriye dönük adım geometrisinin olduğu kısımda hız değerleri daha yüksek, bu

nedenle bu bölgede kontur rengi daha açıktır. Bunula birlikte, Şekil 8' de görülebildiği gibi su için Şekil 7' deki MWCNT-saf su nanoakışkanına göre koyu kırmızı renkli kısmın şiddetinde azalma vardır. Yani, MWCNT-saf su nanoakışkanı için kanal içerisinde akışkan hızlanmasının daha fazla olduğu söylenebilir. Buna ek olarak, her iki akışkan için Re=10000 değerinde Re=5000' e göre hız değişimi daha fazladır.

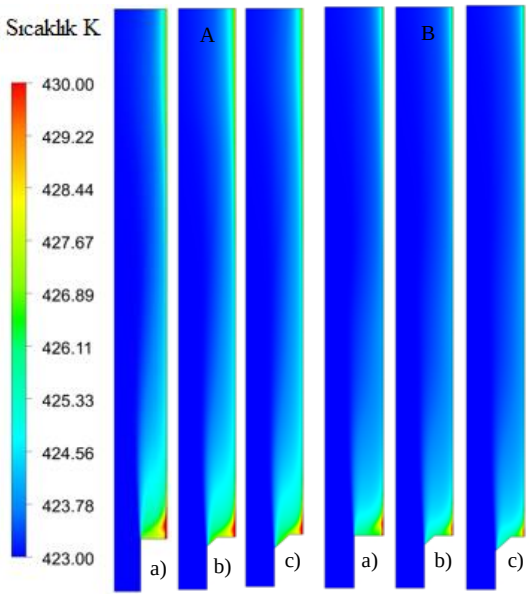


Şekil 7. MWCNT-saf su nanoakışkanı için hız dağılımları A-Re=5000 B-Re=10000 a) Düz b) h/2 c) 3h/4

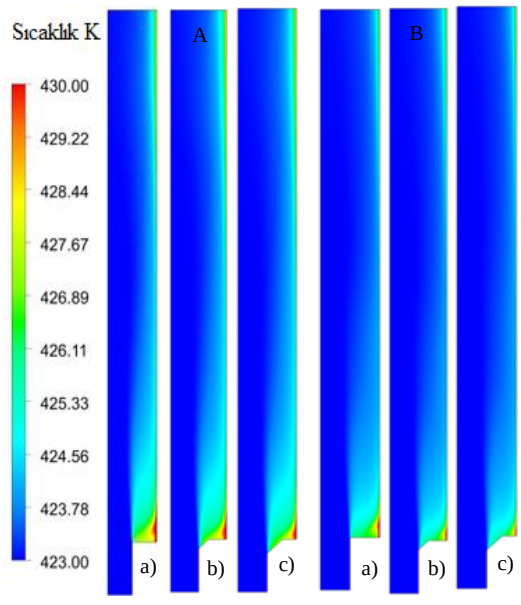


Şekil 8. Saf su için hız dağılımları A-Re=5000 B-Re=10000 a) Düz b) h/2 c) 3h/4

MWCNT-saf su nanoakışkanı ve saf su akışkanına ait sıcaklık dağılımı konturları sırasıyla Şekil 9 ve 10' da A-Re=5000 B-Re=10000 için a) Düz b) h/2 c) 3h/4 pah uzunlukları için gösterilmektedir. Şekil 9 ve 10' dan da görülebildiği gibi ısı iletim katsayısı sudan yüksek olan MWCNT-saf su nanoakışkanı için özellikle Re=5000 değerinde sıcaklık değerleri belirgin bir şekilde sudan daha yüksektir. Bu nedenle, sıcaklık konturu dağılımı daha açık renktedir. Bu durum, sabit yüzey sıcaklığındaki geriye dönük adımın aşağıakım kısmında özellikle ayrılmış akışın olduğu bölgede MWCNT-saf su nanoakışkanına olan ısı transferinin de kanıtıdır. Bununla birlikte, özellikle düz ve h/2 pah uzunluklu modelde akış ayrılma bölgesinin köşe kısmında hareketsiz akış bölgesi nedeniyle sıcaklığı artmış akış bölgesi meydana gelmektedir. Ancak, bu kısım 3h/4 pah uzunluğunda azalma göstermektedir. Ayrıca, MWCNT-saf su nanoakışkanında ayrılmış akış bölgesinden yeniden birleşme bölgesine doğru olan ısı transferi artışı nedeniyle sabit sıcaklıktaki yüzeyden üst taraftaki diğer yüzeye doğru sıcaklıkta daha fazla değişim meydana gelmesiyle birlikte, sıcaklık konturu rengi 3h/4 pah uzunluklu modelde h/2 pah uzunluğu ve düz modele göre daha açık renk almaktadır.

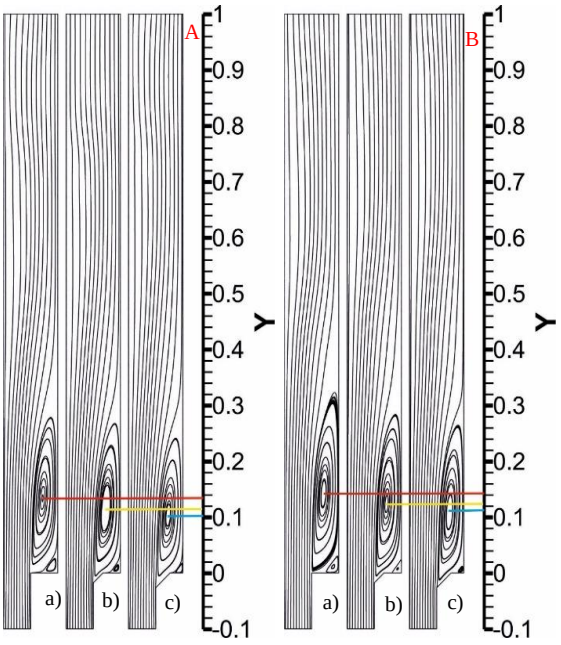


Şekil 9. MWCNT-saf su nanoakışkanı için sıcaklık dağılımları A-Re=5000 B-Re=10000 a) Düz b) h/2 c) 3h/4

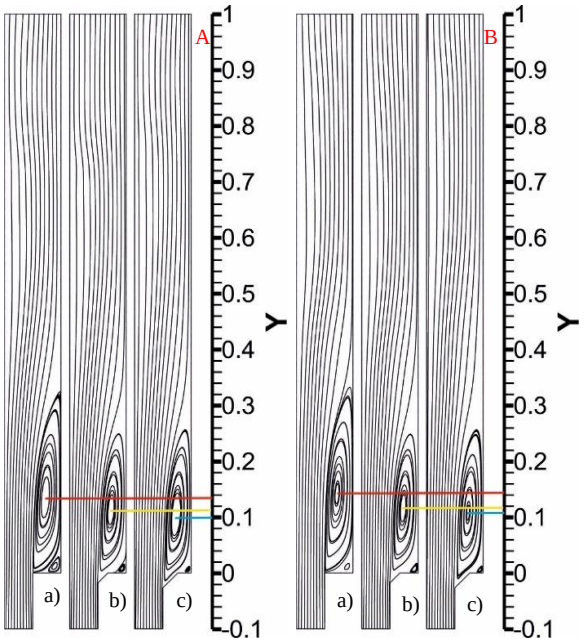


Şekil 10. Saf su için sıcaklık dağılımları A-Re=5000 B-Re=10000 a) Düz b) h/2 c) 3h/4

Şekil 11 ve 12' de sırasıyla MWCNT-saf su nanoakışkanı ve saf su akışkanları için A-Re=5000 B-Re=10000 a) Düz b) h/2 c) 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım akışı modelli kanallar için akım çizgileri dağılımları gösterilmektedir. Yeniden birleşme uzunluğu hakkında fikir sahibi olabilmek için şekiller üzerinde yeniden dolaşım bölgesinin merkez noktasının uzunlukları y koordinatı üzerinde çizilerek belirtilmiştir. Ayrılmış akıştaki yeniden dolaşım bölgesinin merkez noktası uzunluğunun azaltılması, geriye dönük adım akışında hareketliliğin artırılması anlamına gelmekte olup, akışkanın karışmasının sağlanarak ısı transferinin artırılmaktadır. Şekil 11 ve 12' den de görüldüğü gibi her iki akışkan için 3h/4 pah uzunluğunda ayrılmış akış bölgesindeki yeniden dolaşımın merkezi ve yeniden birleşme noktaları geriye dönük adıma doğru daha fazla çekilmekte ve böylece kanal boyunca ısı transferinin arttığı bölge artırılmaktadır. Bununla birlikte, Re sayısının artışıyla akışkanın yeniden birleşme uzunluğu artarken, adım yüksekliği boyunca yeniden dolaşım bölgesinin genişliğinin azalması sağlanmaktadır. Böylece, ısı transferi miktarı ve adımdaki akışkan hareketliliği artırılmaktadır.



Şekil 11. MWCNT-saf su nanoakışkanı için akım çizgisi dağılımları A-Re=5000 B-Re=10000 a) Düz b) h/2 c)



Şekil 12. Saf su için akım çizgisi dağılımları A-Re=5000 B-Re=10000 a) Düz b) h/2 c) 3h/4

V. GENEL SONUÇLAR

Geriye dönük adım akışı, ısı depolama kaplarının iç ve dış akışında veya güç dönüştürme sistemlerinin toplayıcıları gibi birçok cihazda önemli olup akışın karmaşık yapısı nedeniyle önemli geometrik modellerden biri olarak göze çarpmaktadır. Bu çalışmada, dikey olarak yerleştirilmiş geriye dönük adım akışı geometrisinde h/2 ve 3h/4 olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının düz geometriye göre ısı transferi ve türbülanslı akış özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Geriye dönük adım geometrisinde duvarlardan yalnızca bir tanesi sabit sıcaklıkta tutulurken, diğer duvarlar adyabatiktir. Çalışma akışkanı olarak saf su ve hacimce %0.01 konsantrasyonlu MWCNT-saf su nanoakışkanı kullanılmıştır. Adım genişleme oranı 1.5' 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, sıcaklık, hız ve akım çizgisi dağılımları görselleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmanın sayısal sonuçlarından elde edilen değerler aşağıdaki gibi sunulabilir;

- Re=10000 için adım geometrisinin aşağı akım bölgesinde MWCNT-saf su nanoakışkanının kullanıldığı düz (pahsız) geometrinin 3h/4 adım geometrisine göre yaklaşık %8.9 daha fazla ortalama Nu sayısı artışı sağladığı saptanmıştır.
- Buna ek olarak, her iki akışkan için Re=10000 için elde edilen Nu sayısı değerleri Re=5000' den daha fazladır.
- Sıcaklık değerleri incelendiğinde, MWCNT-saf su nanoakışkanı için ısıl iletkenlik değeri suya göre fazla olduğundan nispeten suya göre daha yüksek akışkan sıcaklık değerleri elde edilmektedir.
- Yeniden birleşme bölgesine kadar akışkan sıcaklık değerinde azalma meydana gelirken, bu bölgeden sonra kanal boyunca akışkan hızı nispeten kararlı duruma geldiğinden akışkan sıcaklık değerleri de kanal boyunca sabit olarak devam etmektedir.
- Akış ayrılmasının olduğu bölgede en yüksek TKE değeri 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım akışı bölgesi için elde edilirken, en düşük TKE değerleri düz kanal için elde edilmektedir.
- Bunun yanısıra, nanoakışkan için akışkan viskozite değeri saf suya göre daha fazla olmasına rağmen özellikle pah uzunluklu modellerde suya göre daha yüksek TKE değerlerine ulaşılmaktadır.
- Ayrılmış akış bölgesinde TKE değişiminin ve de dolayısıyla akışkan hareketliliğinin fazla olduğu nanoakışkan için daha yüksek basınç değerlerine ulaşılırken, tüm modeler için basınç değerleri birbirine çok yakın seyretmektedir.
- Hız dağılımı konturlarından da görülebildiği gibi geriye dönük adım kısmında koyu mavi renk olan kısım hızın en az olduğu yeniden dolaşım bölgesinin olduğu kısımdır. Adım kısmına pah uzunluğu verildiğinde akış geriye dönük adıma doğru yönlendirilebilmektedir. Böylece, bu kısımda akış hareketliliği artırılmakta ve koyu mavi renkli kısım açık maviye doğru renk değiştirmektedir.
- 3h/4 pah uzunluğunda h/2' ye göre özellikle akış ayrılmasının olduğu geriye dönük adım geometrisinin olduğu kısımda hız değerleri daha yüksek, bu bölgede kontur rengi daha açıktır.
- Isı iletim katsayısı sudan yüksek olan nanoakışkanın sıcaklık değerleri sudan bir miktar daha yüksektir. Bu nedenle, sıcaklık konturu dağılımı biraz daha açık renktedir. Bununla birlikte, özellikle 3h/4 pah uzunluklu modelde akış ayrılma bölgesinde sabit sıcaklıktaki yüzeyden üst taraftaki diğer yüzeye doğru sıcaklıkta daha fazla değişim meydana gelmekle birlikte, sıcaklık konturu rengi h/2 pah uzunluklu modele göre daha açık renktedir.
- Her iki akışkan için 3h/4 pah uzunluğunda yeniden dolaşım merkezi ve yeniden birleşme noktaları geriye dönük adıma doğru daha fazla çekilerek kanal boyunca ısı transferinin arttığı bölge artırılmaktadır.
- Sonuç itibariyle, ısı transferini artırmak için ayrılmış akış bölgesini azaltacak kanal tasarımları yapılmalıdır. Ayrıca, yüksek ısı iletim katsayılı akışkanların seçimi ısı transferi miktarının fazla olması istenen uygulamalarda son derece önem arz etmektedir.

REFERANSLAR

[1] V. Trisaksri, S. Wongwises, "Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids". Ren. Sust. Energy Reviews, vol. 11, pp. 512-523, 2007.

[2] J.C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, 2nd ed., Oxford Clarendon Press, Cambridge, England, 1904.

[3] S.K. Gupte, S.G. Advani, P. Huq, "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] S.J. Kim, I.J. Bang, J. Buongiorno, L.W. Hu, "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] S.M. Kwark, R. Kumar, G. Moreno, J. Yoo, S.M. You, "Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids". Int. J Heat and Mass Transf., vol. 53, pp. 972-981, 2010.

[6] K.S. Hong, T.K. Hong, H.S. Yang, "Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles". Applied Physics Lett., vol. 88, pp. 1-3, 2006.

[7] L. Hwan, K. Hwang, S. Janga, B. Lee, J. Kim, S.U.S. Choi, C. Choi, "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] H. Xie, H. Lee, W. Youn, M. Choi, "Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities". J Applid Physics, vol. 94, pp. 4967-4971, 2003.

[9] B.F. Armaly, F. Durst, J.C.F. Pereira, B. Schönung, "Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow". J. Fluid Mech., vol. 127, pp. 473-496, 1983.

[10] P. Nadge, R. Govardhan, "High Reynolds number flow over a backward-facing step: structure of the mean separation bubble". Exp. Fluids, vol. 55, pp. 1-22, 2014.

[11] N. Kasagi, A. Matsunaga, "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] H. Le, P. Moin, J. Kim, "Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step". J. Fluid Mech., vol. 330, pp. 349-374, 1997.

[13] R.L. Simpson, "Turbulent boundary-layer separation". Annu. Rev. Fluid Mech., vol. 21, pp. 205-232, 1989.

[14] J.C. Vogel, J.K. Eaton, "Combined heat transfer and fluid dynamic measurements downstream of a backward-facing step". J. Heat Transfer, vol. 107, pp. 922-929, 1985.

[15] A. Keating, U. Piomelli, K. Bremhorst, S. Nei, "Large-eddy simulation of heat transfer downstream of a backward-facing step". J. Turbul., vol. 5, pp. 1-27, 2004.

[16] R.V. Avancha, R.H. Pletcher, 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] K. Karabulut, E. Buyruk, K. Yapıcı, F. Kılınc, "Karbon nanotüp içeren nanoakışkanın ısı transferi artışı ve basınç düşüşü performansının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi". in *Proc.* ULIBTK' 15, 2015, p. 96.

[19] H. Togun, M.R. Safaei, R. Sadri, S.N. Kazi, A. Badarudin, K. Hooman, E. Sadeghinezhad, "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.

TEŞEKKÜR

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