

**NANOAKIŞKAN KULLANILAN GERİYE DÖNÜK ADIM AKIŞINDA
FARKLI ADIM KÖŞE YAPILARININ ISI TRANSFERİ VE
AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

HEAT TRANSFER AND FLOW PROPERTIES RESEARCH OF DIFFERENT STEP-CORNER STRUCTURES AT BACKWARD-FACING STEP FLOW USED NANOFLUID

Dr. Öğr. Üyesi Koray KARABULUT

Dr. Öğr. Üyesi Doğan EnginALNAK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

ÖZET

Ayrılmış akış bölgesinin kontrolü, ısı ve kütle transferi miktarını artırmak için oldukça önemlidir. Bu amaçla, günümüzde ısı yayılım ve ısı iletkenlik gibi termodinamik özellikleri son derece iyi olup, mükemmel bir kararlılık ve ısı taşınım katsayısı değerlerine sahip olan nanoakışkanların kullanılması yönünde çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, dikey olarak konumlandırılmış geriye dönük adım akışı geometrisinde $h/2$ ve $3h/4$ olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının pahsız (normal) geometriye göre ısı transferi ve akış özellikleri hacimce %0.01 konsantrasyona sahip GO-saf su nanoakışkanının kullanılmasıyla saf su ile karşılaştırılarak sayısal olarak incelenmiştir. Akışkanların kanala giriş sıcaklıkları 303 K iken, geriye dönük adımın sabit duvar yüzey sıcaklığı 316.5 K' dir. Geriye dönük adımın arkasındaki duvarlardan biri sabit sıcaklıkta tutulurken diğeri adyabatiktir. Çalışmanın sonuçları, üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak korunum denklemlerinin $k-\epsilon$ türbülans modeli, Boussinesq yaklaşımıyla ANSYS-FLUENT bilgisayar programıyla çözülmesiyle elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan nanoakışkan tek fazlı kabul edilmiş olup, deneysel olarak elde edilen termodinamik özellikler kullanılmıştır. Geriye dönük adımın genişleme oranı 1.5' dir. 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 ve hız konturları ve akım çizgisi dağılımları görselleştirilmiştir. $Re=7500$ için %0.01 GO-saf su nanoakışkanının akışında $3h/4$ pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinin ortalama Nu sayısının saf su kullanılan geometriden %11.85 daha fazla olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Geriye dönük adım akışı, Ayrılmış akış, Nanoakışkan, Isı transferi

ABSTRACT

Control of the separated flow zone is crucial to increase the amount of heat and mass transfer. For this purpose, today, thermophysical properties such as thermal dispersion and thermal conductivity are extremely good, and various researches are being made to use nanofluids that have excellent stability and heat transfer coefficient values. In this work, the heat transfer and flow properties of step corner structures with different chamfer lengths as $h/2$ and $3h/4$ according to without chamfer (normal) geometry have been numerically searched by using GO-distilled water nanofluid having 0.01% volumetric concentration comparing with distilled water at the vertically positioned backward-facing step flow geometry. While the inlet temperatures of fluids to the duct are 303K, the constant wall surface temperature of the backward-facing step is 316.5K. 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 $k-\epsilon$ turbulence model with Boussinesq approach using ANSYS-FLUENT computer program. The nanofluid used in the study have been considered as single-phase and experimentally obtained thermophysical properties 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 in backward-facing step flow geometry. For $Re=7500$, the average Nu number value of the step geometry with $3h/4$ at the 0.01% GO-distilled water nanofluid flow has been found to be 11.85% higher than the geometry of distilled water.

Keywords: Backward-facing step flow, Separated flow, Nanofluid, Heat transfer

1. GİRİŞ

Birçok mühendislik uygulamasında bir ayrılmış akış modeli olan geriye dönük adım akışıyla karşılaşmaktadır. Bir aracın arkasındaki ayrılma akışı, bir yoğurturucu/yakıcının içi veya bir motorun giriş tüneli akışı, büyük hücum açısında kanat uçlarında, hız kesici kanat 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 ısı 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 ısı 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 ısı iletkenlik değerlerine sahip olduklarından sıvıya eklenen katı parçacıklar kullanılan (taban) akışkanının ısı 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 ısı 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, ısı yayılım ve ısı 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 ısı 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 ısı 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. Armaiy ve ark. [9] hava ile yaptıkları deneylerinde girişte Re sayısını artırarak akış tipini değiştirmişlerdir. Yeniden birleşme noktasının bu genel parametreye bağlı olduğunu ve esasen laminar, 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]'nin 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 düz modele (pahsız) göre ısı transferi ve türbülanslı 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 nanoakışkanı 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 konumlandırılmalarda 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 modeli, 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 çözümle 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 denklemleri 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

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

Momentum denklemi

x momentum denklemi

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

y momentum denklemi

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

z momentum denklemi

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

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

Enerji denklemi

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \bar{u} k')}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \bar{v} k')}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \bar{w} k')}{\partial z} & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k'}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k'}{\partial z} \right) + \mu_t \phi - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

Türbülans viskozitesi

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

Türbülans kinetik enerji

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

Viskoz dağılım terimi

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

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

Türbülans kinetik enerji dağılım denklemi

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

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;

$$C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \sigma_k = 1 \text{ ve } \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

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 akışlı kanalının giriş kesit alanı (m^2) ve kanalın çevre uzunluğudur (m).

Nu sayısı taşınım ile ısı geçişinin iletimle ısı geçişine oranı olarak değerlendirilir.

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

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

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

Basınç düşüşü

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

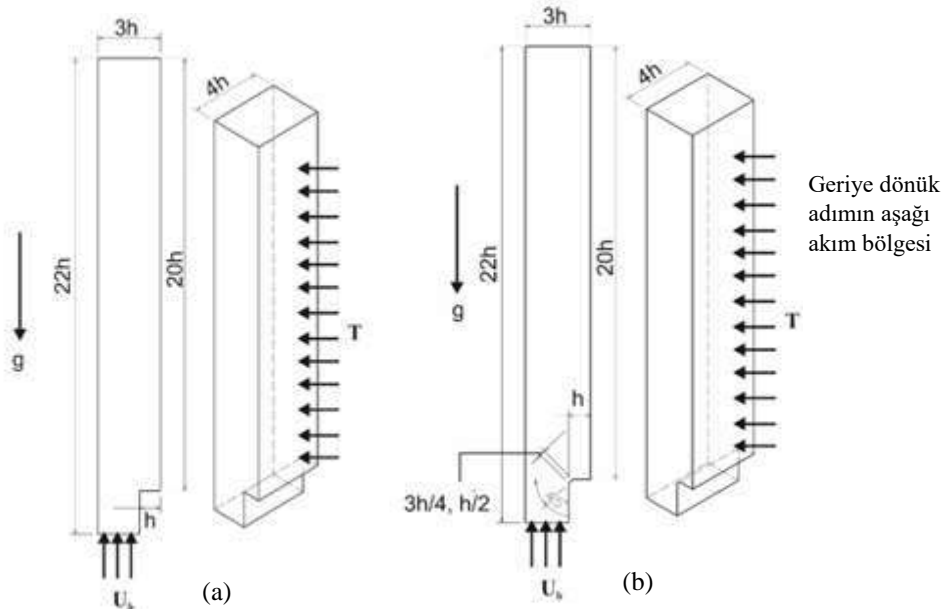
Burada ΔP kanal boyunca akış yönündeki basınç düşüşü, f sürtünme faktörü ve $L=20h$ olmak üzere sabit yüzey sıcaklıklı kısmın uzunluğudur.

3. GEOMETRİK MODEL

Şekil 1a' da geriye dönük adım modelinin normal (pahsız) 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. 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 $h/2$ ve $3h/4$ uzunluklarındadır. Kullanılan akışkanlar saf su ve %0.01 GO-saf su nanoakışkanı olup, Reynolds sayısının 10000 olduğu değer için sırasıyla akışkanların kanala giriş hızları (U_b) 0.1612 m/s ve 0.2707 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 çözümlenelerde g yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²) de hesaba katılmıştır. %0.01 GO-saf su nanoakışkanının termofiziksel değerleri [18] $\rho=996.1$ kg/m³, $c_p=4178.4$ J/kgK, $k=0.6696$ W/mK, $\mu=0.001$ Ns/m² iken saf suyun termofiziksel değerleri $\rho=995.8$ kg/m³, $c_p=4178.4$ J/kgK, $k=0.6172$ W/mK, $\mu=0.0008034$ Ns/m²' dir.

Bu çalışma şu kabuller altında gerçekleştirilmiştir.

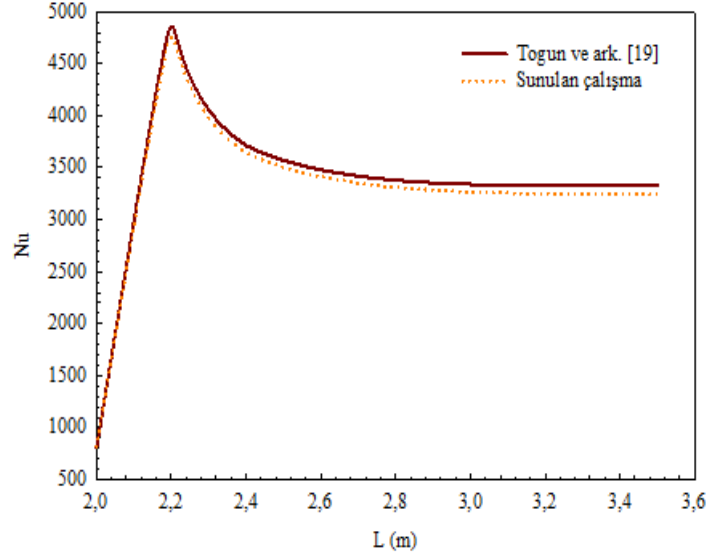
- Geriye dönük adım akışı için akış alanı üç boyutlu, zamandan bağımsız ve türbülanslıdır.
- Hesaplamalar sıkıştırılamaz akış için yapılmıştır.
- Çalışma akışkanları olarak saf su ve hacimce %0.01 GO-saf su nanoakışkanı kullanılmıştır.
- Geriye dönük adımın arkasındaki duvar yüzeyine sabit 316.5 K yüzey sıcaklığı uygulanırken diğer duvarlar adyabatiktir.
- Akışkanların ısıl özellikleri sabittir.
- Hem akışkanlar hem de duvarlar için ısı üretimi yoktur.



Şekil 1. Geriye dönük adım modeli (a) Düz (b) $h/2$ ve $3h/4$ pah uzunluklu

4. 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 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. [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 kanallarda kullanılan ağ elemanı sayıları da Tablo 2’ de gösterilmiştir.

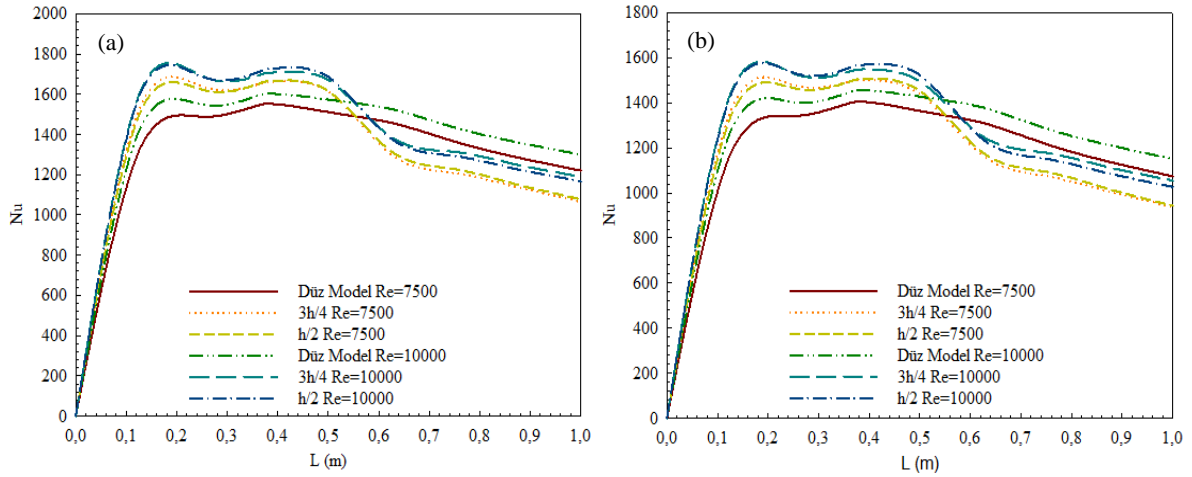
Tablo 1. Pahsız (normal) kanalda Nu_m ve V_m için ağ testi sonuçları

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

Tablo 2. Pahsız, $3h/4$ ve $h/2$ pah uzunluklu kanaldaki ağ sayıları

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

Şekil 3a ve b' de sırasıyla hacimce %0.01 GO (Grafen Oksit) konsantrasyonuna sahip nanoakışkan ve saf su için sabit yüzey sıcaklıklı aşağı akım bölgesindeki yüzey için kanal boyunca Nusselt sayısının, 7500 ve 10000 olmak üzere farklı Reynolds sayısı ile değişimi düz model (pahsız), h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım akışı geometrileri için gösterilmektedir. Geriye dönük adım akışının ayrılmış akış bölgesinde kanalın 0.5 m uzunluklu bölgesine kadar h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu kanalların Nu sayıları düz modele göre daha fazla iken akışkana olan ısı transferi sonucu akışkan sıcaklığının arttığı yeniden birleşme bölgesinden sonra düz kanaldaki Nu sayısı değerleri hem saf su hem de nanoakışkan için azalmaktadır. Re sayısının artışına bağlı olarak Nu sayısı değerleri artış göstermektedir. Bununla birlikte, Re=7500 için %0.01 GO-saf su nanoakışkanının akışında 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinin ortalama Nu sayısının saf su kullanılan geometriden %11.85 daha fazla olduğu bulunmuştur. Bu nedenle, pahlı kanallarda ayrılmış akış bölgesinde elde edilen noktasal artışların kanalın tümü için elde edilen ortalama değerleri artıramadığı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 3b' den de görülebildiği gibi saf su için elde edilen Nu sayısı değerlerinin ısı transferinin daha iyi olduğu nanoakışkana göre daha az olduğu görülebilmektedir.

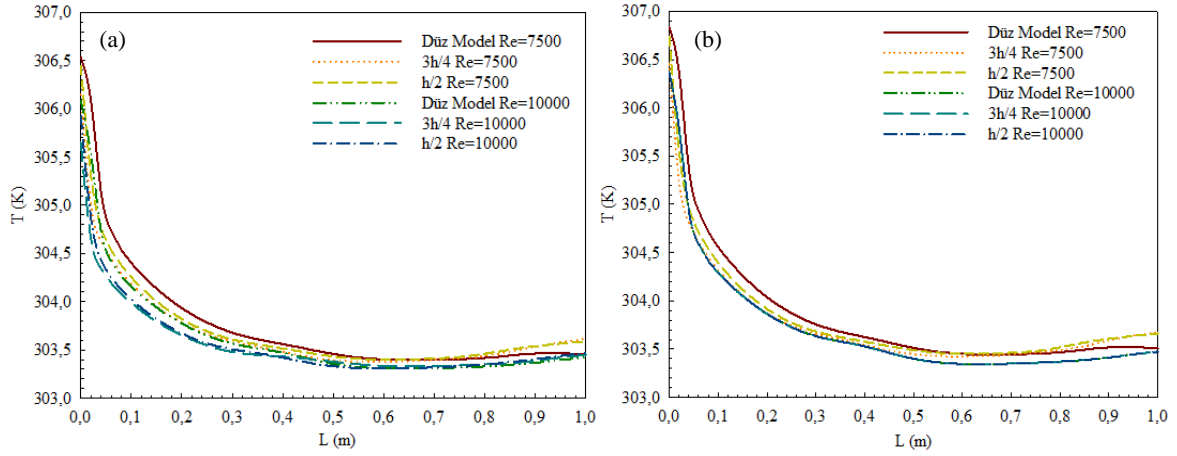


Şekil 3. Nu sayısı değişimi (a) GO-saf su nanoakışkanı (b) Saf su

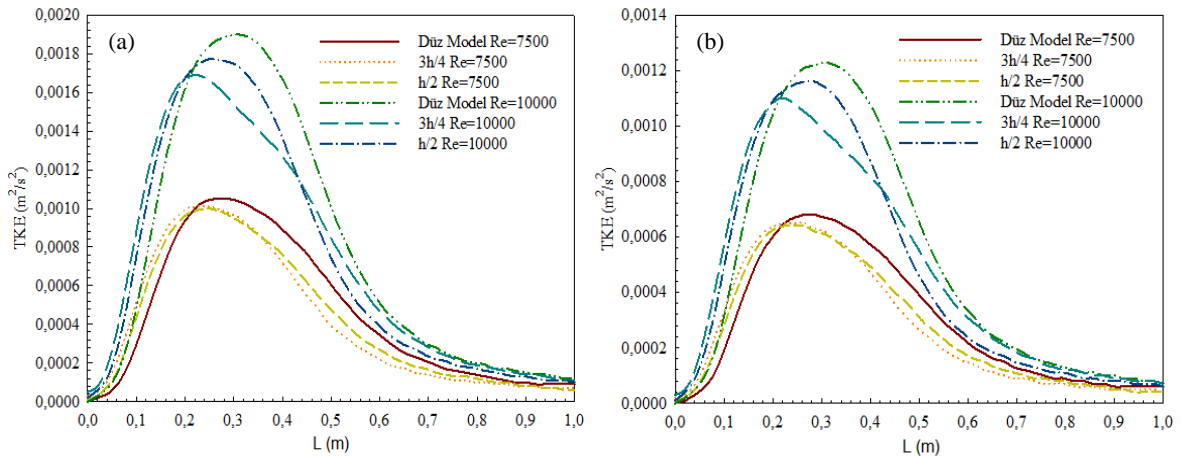
Düz model, h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu kanallara ait sırasıyla %0.01 GO-saf su nanoakışkanı ve yalnızca saf su akışkanının kullanıldığı geriye dönük adım akışı modellerinde h uzunluklu kanal adım yüksekliğinin yarı yüksekliği olan 0.5h uzunluğu boyunca akışkanların sıcaklık değişimleri Şekil 4a ve b' de sunulmaktadır. Grafikler incelendiğinde özellikle kanalın giriş kısmında ayrılmış akış bölgesinde 3h/4 pah uzunluklu kanalda h/2 pah uzunluklu kanala göre akışın geriye dönük adıma daha iyi yönlendirilebilmesi sebebiyle ısı transferinin artması sonucu daha düşük akışkan sıcaklıkları elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, ayrılmış akış bölgesinin sona erip akışın yeniden birleşmesinin başlamasından sonra düz modele göre akışkan sıcaklık değerleri artışa geçmektedir. Ayrıca, nanoakışkan için artan ısı transferi etkisiyle saf suya göre elde edilen düşük sıcaklık değerleri Şekil 4a ve b' deki grafiklerin kıyaslanmasıyla kolaylıkla görülebilmektedir.

Kanalın 0.5h adım yüksekliği boyunca Re=7500 ve Re=10000 için sırasıyla %0.01 GO-saf su nanoakışkanı ve saf suya ait türbülans kinetik enerji (TKE) değişimleri Şekil 5a ve b' de verilmektedir. Akışkanın türbülans kinetik enerjisinin yüksek olması, akış karışmasının yüksek olduğunu belirtmektedir. Her iki akışkan için şekillerden de görülebildiği gibi en yüksek TKE değerleri 3h/4 pah uzunluklu modeller için elde edilirken, en düşük değerler düz modeller için elde edilmektedir. Bununla birlikte, yeniden birleşme bölgesine doğru pahlı kanallardaki akışın türbülans kinetik enerji değerleri azalmakta ve bu nedenle yeniden birleşme noktasından

itibaren düz modeller için daha yüksek değerler elde edilmektedir. Aynı zamanda, Şekil 5a ve b' de de görülebildiği gibi Reynolds sayısının artışı akış karışmasını artırarak TKE'nin artışı sağlamaktadır. Yine bu duruma paralel olarak karışmanın daha iyi olduğu nanoakışkan için saf suya göre daha yüksek TKE değerlerinin elde edildiği saptanmıştır.



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

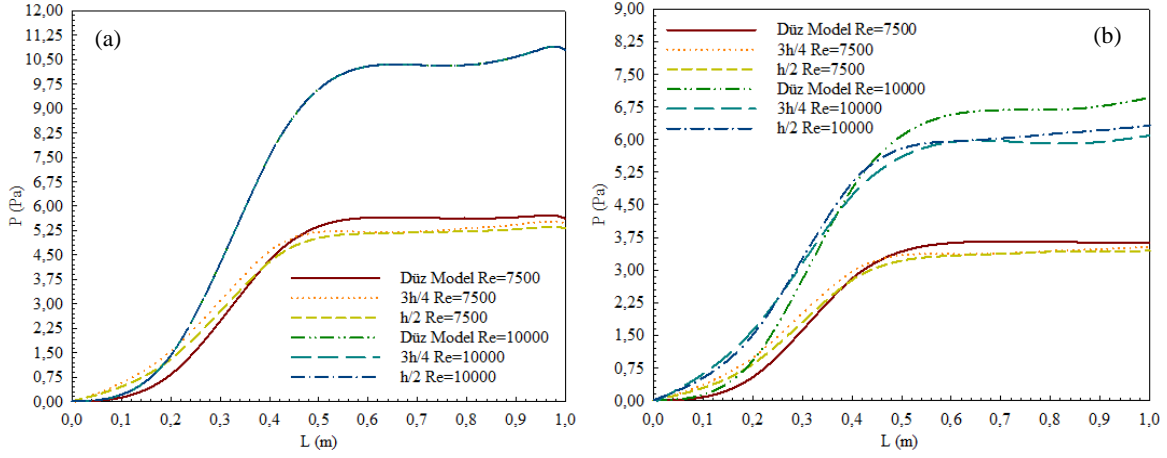


Şekil 5. Türbülans kinetik enerji (TKE) değişimi (a) GO-saf su nanoakışkanı (b) Saf su

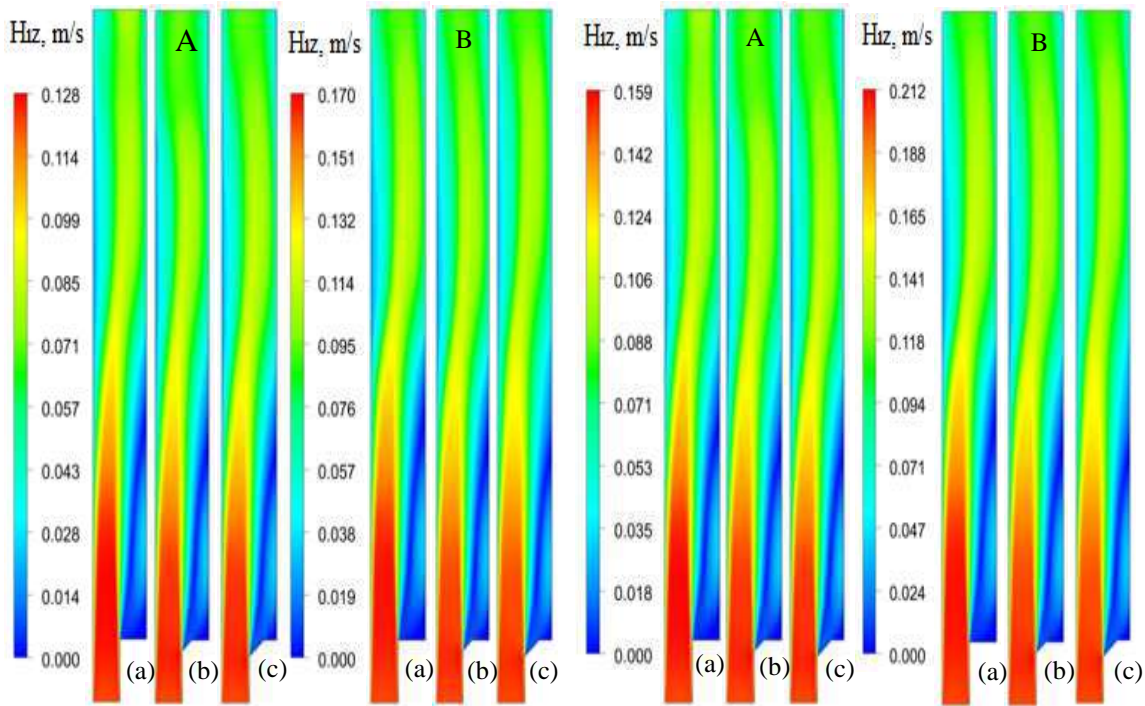
Şekil 6a ve b' de farklı Re sayılarında sırasıyla GO-saf su (%0.01) nanoakışkanı ve saf suya ait farklı pah uzunluklu kanallar için 0.5h adım yüksekliğinde kanal boyunca basınç değişimleri gösterilmektedir. Şekil 5' deki TKE değişimlerine paralel olarak akış karışmasının daha iyi olduğu nanoakışkan için daha yüksek basınç değişimi değerleri görülmekle birlikte saf su için daha düşük değerler elde edilmektedir. Bununla birlikte, akışın yeniden birleşme bölgesinden sonra TKE değeri azalan akışkanlar için düz modeldeki basınç değerleri pahlı kanallara göre artış göstermektedir (Şekil 6a, b).

Şekil 7 ve 8' de sırasıyla saf su ve % 0.01 GO-saf su nanoakışkanlarına ait hız dağılımı konturları Reynolds sayısının 7500 (Şekil 7A-8A) ve 10000 (Şekil 7B-8B) değerleri için düz model ve geriye dönük adımın h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu modelleri için gösterilmektedir. Kanal girişinde kırmızı renk ile belirtilen yüksek hızlı akışkan, geriye dönük adım kısmında azalarak mavi renk ile belirtilmektedir. Bununla birlikte, kanala pah verildiğinde akışın geriye dönük adıma doğru yönlendirilmesi sağlanarak bu bölgedeki akış hareketlendirilmektedir. Ayrıca, özellikle 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım kısmında akıştaki koyu mavi renkli kısmın açık mavie doğru dönmesi akışın daha iyi hareketlendiğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir.

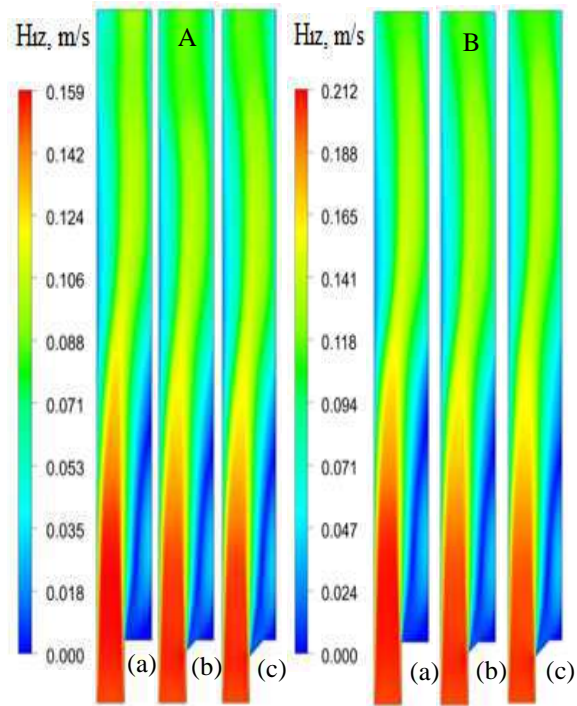
Görülen bu akış hareketlenmesi Reynolds sayısının artışıyla daha belirgin hale gelmektedir (Şekil 7B-8B).



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



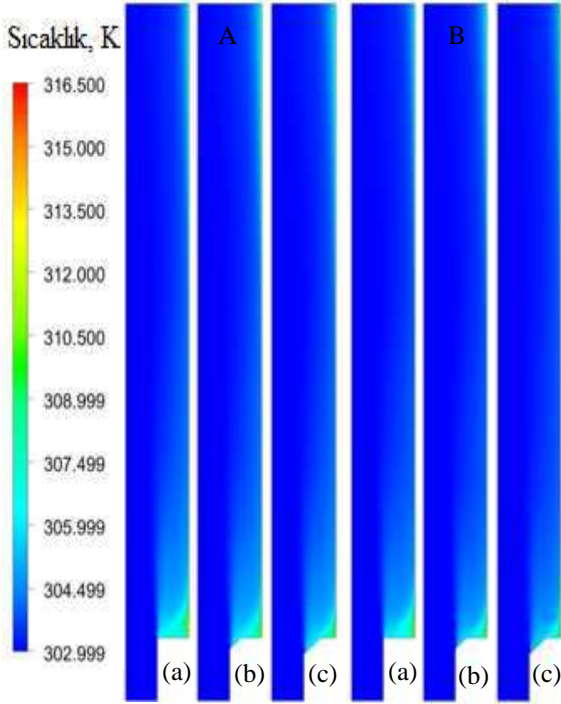
Şekil 7. Saf su akışkanı için hız dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/2 (c) 3h/4



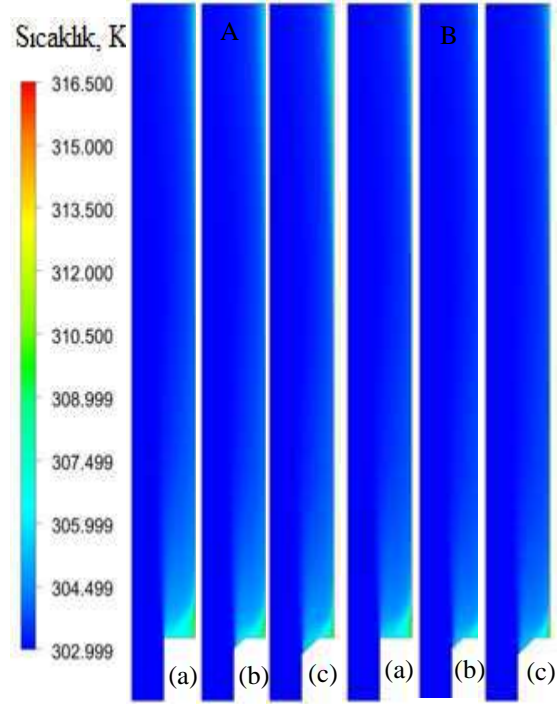
Şekil 8. GO-saf su nanoakışkanı için hız dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/2 (c) 3h/4

Düz model, h/2 ve 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım akışı geometrilerinde kanal boyunca meydana gelen sıcaklık konturu dağılımları farklı Re sayılarında saf su ve GO-saf su (%0.01 hacimsel konsantrasyon) nanoakışkanları için sırasıyla Şekil 9 ve 10' da verilmektedir. Her iki akışkan 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 9A-B(a) ve Şekil 10A-B(a)). Bununla birlikte, kanala pah verildiğinde, özellikle 3h/4 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.

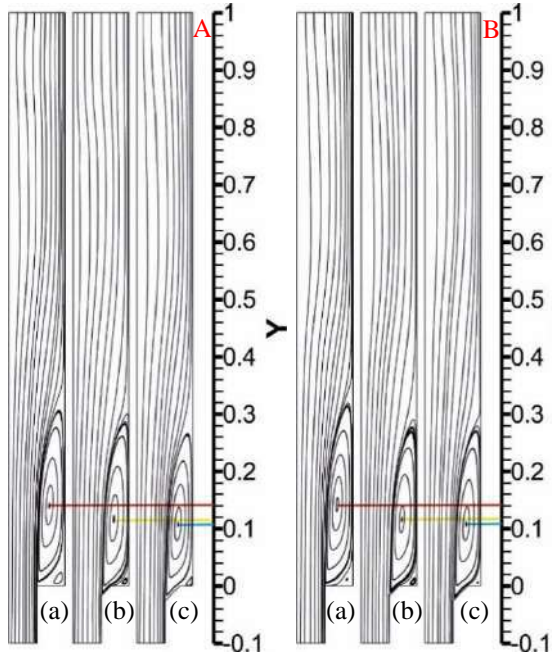


Şekil 9. Saf su akışkanı için sıcaklık dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/2 (c) 3h/4

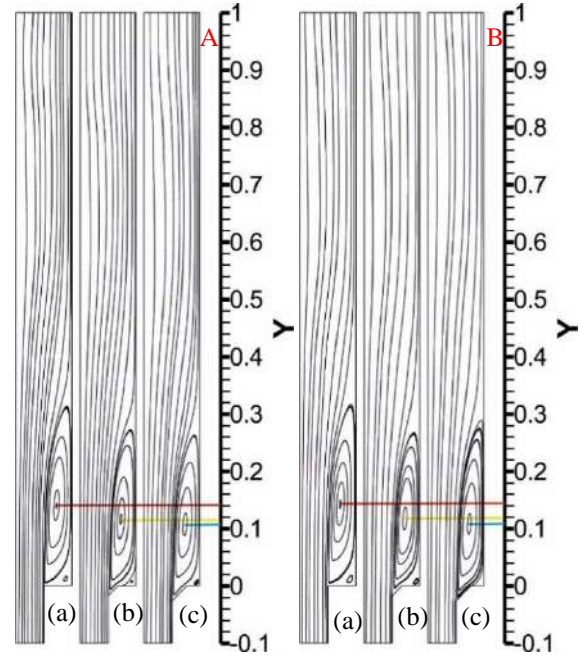


Şekil 10. GO-saf su nanoakışkanı için sıcaklık dağılımları A-Re=7500 B-Re=10000 (a) Düz (b) h/2 (c) 3h/4

Sırasıyla Şekil 11 ve 12' de A-Re=7500 ve B-Re=10000 için düz ve farklı pah uzunluklu (h/2 ve 3h/4) kanallardaki saf su ve %0.01 hacimsel konsantrasyona sahip GO-saf su nanoakışkanı için akım çizgisi dağılımları görselleştirilmiştir. Yeniden birleşme noktasının uzunluğu hakkında fikir sahibi olabilmek pahlı kanallarda geriye dönük adım kısmında akışın hareketlendirilebilme durumunu gösterebilmektedir. Bu amaçla, akım çizgisi dağılımları üzerinde merkez noktasının düşey koordinat uzunlukları belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 11 ve 12' den de görülebildiği gibi pahlı kanallarda merkez noktası koordinatı düz modele göre daha geridedir yani uzunluğu daha kısadır. Bu da bize akışın geriye dönük adıma doğru hareketlendiğinin bir göstergesi olmaktadır. Bununla birlikte, 3h/4 pah uzunluklu modelde merkez noktası çizgisinin uzunluğu en kısa olup adımdaki hareketlenme iyileştirilmiştir. Ayrıca, birbirine çok yakın olmakla birlikte hem nanoakışkan için hem de saf su için Reynolds sayısının 10000 değerinde hareketlenme sonucu akım çizgisinin merkez noktası uzaklığı azalmıştır.



Şekil 11. Saf su akışkanı için akım çizgisi dağılımları
A-Re=7500 B-Re=10000
(a) Düz (b) h/2 (c) 3h/4



Şekil 12. GO-saf su nanoakışkanı için akım çizgisi dağılımları A-Re=7500
B-Re=10000 (a) Düz (b) h/2 (c) 3h/4

5. GENEL SONUÇLAR

Isı depolama kaplarının iç ve dış akışında veya güç dönüştürme sistemlerinin toplayıcıları gibi birçok cihazda karşılaşılan geriye dönük adım akışı, akışın karmaşık yapısı nedeniyle önemli geometrik modellerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, dikey olarak yerleştirilmiş geriye dönük adım akışı geometrisinde h/2 ve 3h/4 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 araştırılmıştır. Geriye dönük adım geometrisinde duvarlardan yalnızca bir tanesi sabit sıcaklıkta tutulurken, diğer duvarlar adyabatiktir. Çalışma akışkanı olarak saf su ve hacimce %0.01 konsantrasyona sahip GO (Grafen oksit)-saf su nanoakışkanı kullanılmıştır. Modellerde kullanılan adım genişleme oranı 1.5' dir. Çalışmanın sonuçları, üç boyutlu, zamandan bağımsız olarak korunum denklemlerinin k-ε türbülans modeli, 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, sıcaklık ve akım çizgisi dağılımları görselleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmanın sayısal sonuçlarından elde edilen değerler aşağıdaki gibi sunulabilir;

- Re=7500 için %0.01 GO-saf su nanoakışkanının akışında 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinin ortalama Nu sayısının saf su kullanılan geometriden %11.85 daha fazla olduğu bulunmuştur.

- Saf su için elde edilen Nu sayısı değerlerinin ısı transferinin daha iyi olduğu nanoakışkana göre daha azdır.

- Sıcaklık değişimi analiz edildiğinde, özellikle kanalın giriş kısmında ayrılmış akış bölgesinde 3h/4 pah uzunluklu kanalda h/2 pah uzunluklu kanala göre akışın geriye dönük adıma daha iyi yönlendirilebilmesi sebebiyle ısı transferinin artması sonucu daha düşük akışkan sıcaklıkları elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, ayrılmış akış bölgesinin sona erip akışın yeniden birleşmesinin başlamasından sonra düz modele göre akışkan sıcaklık değerleri artışa geçmektedir.

- Her iki akışkan için en yüksek türbülans kinetik enerji (TKE) değerleri 3h/4 pah uzunluklu modeller için elde edilirken, en düşük değerler düz modeller için elde edilmektedir. Bununla birlikte, yeniden birleşme bölgesine doğru pahlı kanallardaki akışın türbülans kinetik enerji değerleri azalmakta ve bu nedenle yeniden birleşme noktasından itibaren düz modeller için daha yüksek değerler elde edilmektedir.

- Akış karışmasının daha iyi olduğu nanoakışkan için saf suya göre daha yüksek TKE değerlerinin elde edildiği saptanmıştır.

- TKE değişimlerine paralel olarak akış karışmasının daha iyi olduğu nanoakışkan için daha yüksek basınç değişimi değerleri görülmekle birlikte, saf su için daha düşük değerler elde edilmektedir. Bununla birlikte, akışın birleşme bölgesinden sonra TKE değeri azalan akışkanlar için düz modeldeki basınç değerleri pahlı kanallara göre artış göstermektedir.

- Kanala pah verildiğinde akışın geriye dönük adıma doğru yönlenebilmesi sağlanarak bu bölgedeki akış hareketlendirilmektedir. Ayrıca, özellikle 3h/4 pah uzunluklu geriye dönük adım kısmında akıştaki koyu mavi renkli kısmın açık maviye doğru dönmesi akışın daha iyi hareketlendiğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir.

- 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. Bununla birlikte, kanala pah verildiğinde, özellikle 3h/4 pah uzunluklu kanalda akış hareketliliği arttığından köşe kısmında bulunan açık mavi renkli kısım azalarak sıcaklık değişimi tüm kanaldaki akışa yayılmaktadır.

- 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 itibarıyla, ısı transferini artırmak için ayrılmış akış bölgesini azaltacak kanal tasarımları yapılmalıdır. Ayrıca, nanoakışkanlar gibi yüksek ısı iletim katsayılı akışkanların seçimi ısı transferi miktarının fazla olması istenen uygulamalarda son derece önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

- [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. Kwarq, 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. F. Kılınc, “Grafen oksit nanoparçacıkları içeren nanoakışkanın taşınım ısı 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] 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.