SETSCI conference proceedings
SETSCI Conference Proceedings
9, 373-383, 2019

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

https://doi.org/10.36287/setsci.4.6.092
2687-5527/ © 2019 The Authors. Published by SETSCI

ISAS WINTER - 2019

Geriye Dönük Adım Akışında Adım Geometrisinin Isı Transferi ve Akış Yapısı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

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

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

Özet – Gaz türbini motorları, yakıcılar, ısıtma ve soğutma sistemleri gibi birçok mühendislik uygulamasında geriye dönük adım akışı nedeniyle ayrılma ve yeniden birleşme bölgeleri meydana gelmektedir. Bu bölgelerin kontrolü, ısı ve kütle transferi miktarını artırmak için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, akış ayrılması ve yeniden birleşmesinin etkisini incelemek amacıyla dikey olarak konumlandırılmış geriye dönük adım akışı geometrisinde h/4 ve h/2 olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının pahsız (normal) geometriye göre ısı transferi ve akış karakteristikleri 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 yaklaşımıyla ANSYS-FLUENT bilgisayar programıyla çözülmesiyle elde edilmiştir. Çalışma akışkanı olarak su ve sıvı sodyum kullanılmıştır. Geriye dönük adımın genişleme oranı 1.5' dir. Çalışma, 5000 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 ve akım çizgisi dağılımları görselleştirilmiştir. Re=5000 için sıvı sodyum akışında pahsız (normal) geometrinin ortalama Nu sayısı değerinin, h/2 pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinden %9 daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler *– Ayrılmış akış, geriye dönük adım akışı, ısı transferi, sıvı sodyum, soğutma*

Investigation of the Effect of Step Geometry on Heat Transfer and Flow Structure at Backward-Facing Step Flow

Abstract – In many engineering applications such as gas turbine engines, burners, heating and cooling systems, separation and reattachment areas occur due to the backward-facing step flow. Control of these areas is very important to increase the amount of heat and mass transfer. In this study, in order to examine the effect of flow separation and reattachment, the heat transfer and flow characteristics of step corner structures with different chamfer lengths as h/4 and h/2 according to without chamfer (normal) geometry have been numerically researched in 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 obtained by solving conservation equations with three dimensional and steady k-ε turbulence model with Boussinesq approach using ANSYS-FLUENT computer program. Water and liquid sodium have been used as working fluids. Expansion rate of the backward-facing step is 1.5. The work has been performed at different Reynolds numbers as 5000 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 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=5000, the average Nu number value of the step geometry without chamfer (normal) in the liquid sodium flow has been determined to be 9% higher than the backward-facing step geometry with h/2 chamfer length.

Keywords *– Separated flow, backward-facing step flow, heat transfer, liquid sodium, cooling*

I. GİRİŞ

Hareketli akışkanların en önemli teknik uygulamalarından biri, ısıl enerjinin taşınmasıdır. Düşük Prandtl sayılı sıvı metaller, yüksek ısıl yayılımları nedeniyle hava veya su ile karşılaştırıldığında daha büyük ısı akıları sağladıkları için son yıllarda artan bir ilgi kazanmışlardır. Dahası, bu akışkanlar yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedirler. Bu sebeplerle, sıvı metaller ısı transferi ve depolanması için

nükleer teknolojide [1,2] ve yoğunlaştırılmış güneş uygulamalarında göz önüne alınmaktadır [3-5]. Bununla birlikte, sıvı metaller yüksek sıcaklıklara karşı aşırı zor koşullarda bile direnebilirler. Eğer bir uygulamadaki sıcaklık farkı büyük olursa kaldırma etkileri dikkate alınmalıdır. Düşük Prandtl sayısı nedeniyle, sıvı metallerle çalışırken bu durum özel koşullara yol açmaktadır. Bu tür akışlarda kaldırmanın türbülans üzerindeki etkisi hakkında çok daha az şey bilinmektedir ve türbülans modellemesi bu durumda daha fazla hassasiyete sahiptir [6]. Kaldırmanın önemli etkiye sahip olduğu sıvı metallerin bir diğer uygulaması günümüzde araştırması yapılan sıvı metal bataryalardır [7,8].

Son yıllarda, ayrılma ve yeniden birleşmeli akışlar için prototip olarak geriye dönük basamak akışı 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.

Literatür incelendiğinde, geriye dönük adım akışı geometrilerinde çoğunlukla akış özellikleri araştırılırken, akış özellikleri yanında ısı transferi miktarını inceleyen çalışma sayısı oldukça azdır. Bu çalışmada, akış ayrılması ve yeniden birleşmesinin etkisini araştırmak amacıyla dikey olarak yerleştirilmiş geriye dönük adım akışı geometrisinde h/4 ve h/2 olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının pahsız (düz-normal) geometriye göre ısı transferi ve akış özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Geriye dönük adımın arkasındaki duvarlardan biri sabit sıcaklıkta tutulurken diğerleri adyabatiktir. Çalışma akışkanları olarak sıvı sodyum ve 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

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

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

Enerji denklemi

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

Bu denklemlerde, ρ yoğunluk (kg/m^3), ν kinematik viskozite (m^2/s), p basınç (N/m^2), k ısıl iletkenlik (W/mK), $\bar{T}$ 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'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

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

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 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

$$Re = \frac{V_\infty D_\mathrm{h}}{\nu} \tag{9}$$

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

$$D_\mathrm{h} = \frac{4A_\mathrm{c}}{P} = \frac{4(2h)(4h)}{2(2h+4h)} = \frac{4h}{3} \tag{10}$$

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

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

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

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

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

Ortalama Nu sayısı

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

Basınç düşüşü

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

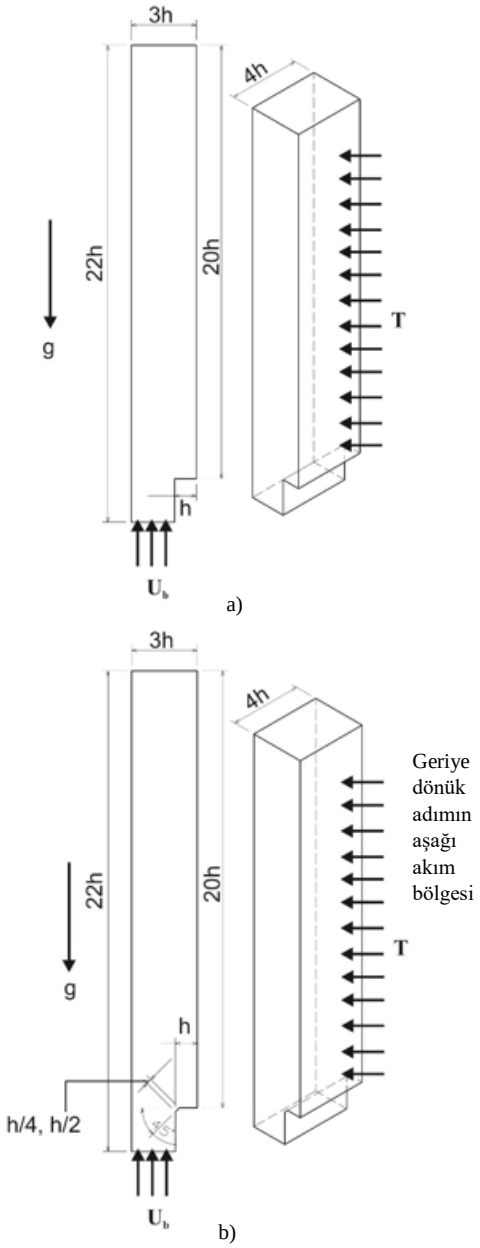
Burada ΔP kanal boyunca akış yönündeki basınç düşüşü ve f sürtünme faktörüdür.

III. GEOMETRİK MODEL

Şekil 1a' da geriye dönük adım geometrisinin pahsız (normal) geometrik yapısı gösterilirken, Şekil 1b' de ise h/4 ve h/2 olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapıları verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sabit sıcaklıkta tutulan 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/4 ve h/2 uzunluklarındadır. Kullanılan akışkanlar su ve sıvı sodyum olup, Reynolds sayısının 10000 olduğu değer için sırasıyla akışkanların kanala giriş hızları (U_b) 0.1612 m/s ve 0.1192 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. Sıvı sodyumun termofiziksel değerleri [18] ρ=915.52 kg/m^3, c_p=1361.85 J/kgK, k=84.4 W/mK, μ=0.4575 Ns/m^2, ısıl genleşme katsayısı β=0.00025644 K^{-1} iken suyun termofiziksel değerleri ρ=916.6 kg/m^3, c_p=4311 J/kgK, k=0.682 W/mK, μ=0.000183 Ns/m^2, ısıl genleşme katsayısı β=0.001025 K^{-1}' dir.

Bu çalışma şu kabuller altında gerçekleştirilmiştir.

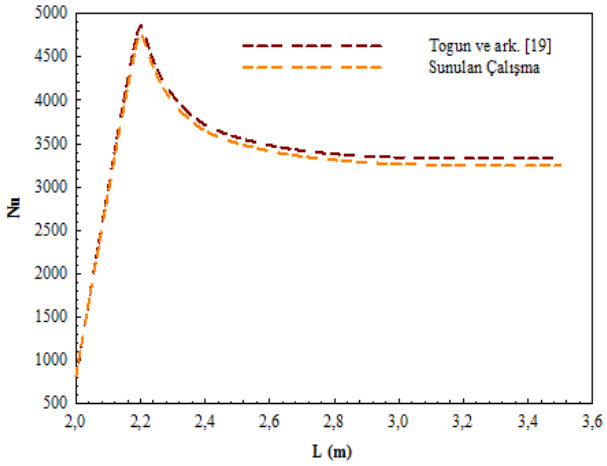
a) Geriye dönük adım akışı için akış alanı üç boyutlu, zamandan bağımsız ve türbülanslıdır.
b) Hesaplamalar sıkıştırılamaz akış için yapılmıştır.
c) Çalışma akışkanları olarak su ve sıvı sodyum kullanılmıştır.
d) Geriye dönük adımın arkasındaki duvar yüzeyine sabit 436.5 K yüzey sıcaklığı uygulanırken 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/4 ve h/2 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 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 pahsız (normal) 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. Kanallarda dikdörtgensel ağ elemanı kullanılmıştır. Ayrıca, pahsız, h/4 ve h/2 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

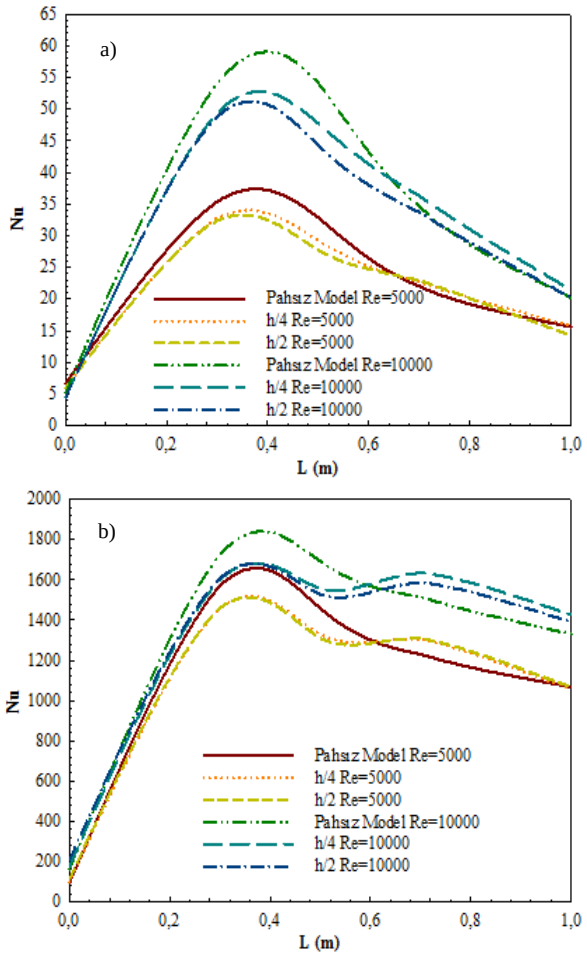
Ağ Sayısı	Nu_m	V_m (m/s)
939495	1185.25	0.034254
988942	1196.56	0.034824
1080420	1196.48	0.344715

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

Kanal Tipi	Ağ Sayısı
Pahsız Kanal	988942
h/4 Pahlı Kanal	988406
h/2 Pahlı Kanal	988594

Şekil 3 a ve b' de sırasıyla sıvı sodyum ve su akışkanları için Reynolds sayısının 5000 ve 10000 değerlerinde pahsız (normal) ve h/4 ve h/2 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 kısımda kanal yüzeyi ile akış arasındaki sıcaklık farkının en fazla olduğu pahsız model için Nu sayısı değerleri pahlı modeller olan h/4 ve h/2 modellerine göre daha fazla iken akışın yeniden birleştiği yaklaşık 0.6 m' lik kanal uzunluğundan sonra akışkan ve yüzey arasındaki sıcaklık farklarının daha fazla olduğu h/4 ve h/2 pah uzunluklu modeller için pahsız modele göre daha fazla Nu sayısı değerleri elde edilmektedir. Bununla birlikte, Re=5000 için sıvı sodyum

akışında pahsız (normal) geometrinin ortalama Nu sayısı değerinin, h/2 pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinden %9 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Su akışkanı için de benzer davranış elde edilmekle birlikte ısı iletim katsayısı, sudan daha yüksek olan sıvı sodyum için elde edilen Nu sayısı değerlerinin değer olarak suyunkinden daha küçük olduğu incelenen grafiklerden görülebilmektedir. Ayrıca, su akışkanı için Reynolds sayısının 5000 olduğu değerdeki Nu sayısı değerleri ile 10000 olduğu değerdeki değerlerin sıvı sodyuma göre birbirine daha yakın olması yeniden birleşme bölgesinde sudaki akış karışmasının sıvı sodyuma göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, her iki akışkan için Re=10000 için elde edilen Nu sayısı değerleri Re=5000' den daha fazla olduğu Şekil 3 a ve b' den görülebilmektedir.

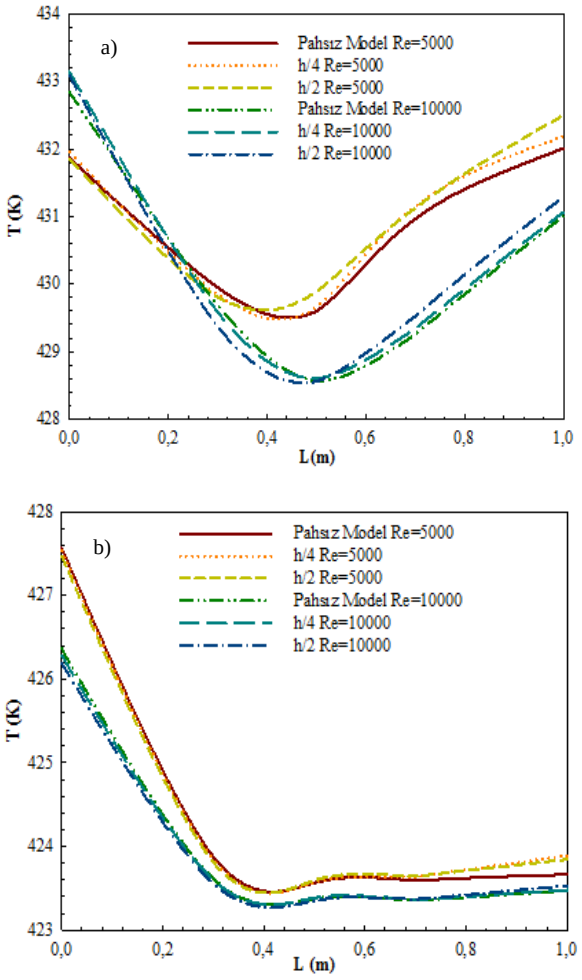


Şekil 3. Nu sayısı değişimi a) Sıvı sodyum b) Su

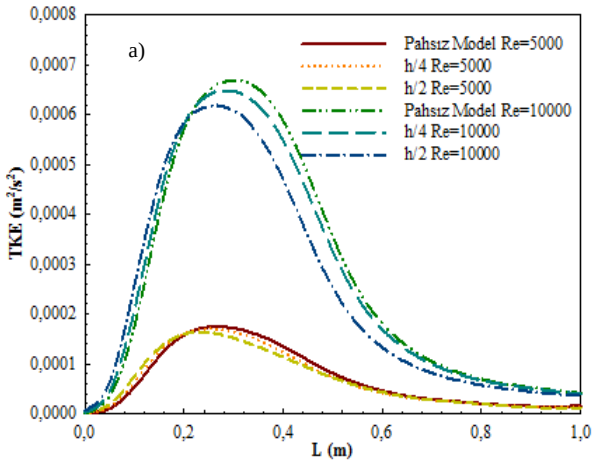
Şekil 4a ve b' de sırasıyla sıvı sodyum ve su akışkanlarına ait pahsız ve h/4 ve h/2 pah uzunluğuna sahip geriye dönük adım akışı geometrilerindeki aşağıakım bölgesinde h yükseklikli adımın yarı yüksekliği olan 0.5h yüksekliği için kanal boyunca akışkanların sıcaklık değişimleri gösterilmektedir. Sıcaklık değerleri incelendiğinde, sıvı sodyum için ısıl iletkenlik değeri suya göre yüksek olduğundan ve buna bağlı olarak ısının yayılımı daha iyi olduğundan daha yüksek akışkan sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Ayrıca, akış ayrılmasının olduğu kısımlarda pahsız modelin Nu sayısı değeri daha fazla olduğundan buna bağlı olarak akışkanların sıcaklık değerleri daha fazladır. Aşağıakım bölgesinin ilerleyen kısımlarında akış birleşmesinin olduğu kısımlarda ise h/4 ve h/2 pah uzunluklu modeller daha yüksek akışkan sıcaklık değerleri sergilemektedirler. Bununla birlikte, Nu sayısı grafiklerinde yeniden birleşme bölgesinden itibaren h/4 pah uzunluklu modelin Nu sayısı değerinin h/2 pah uzunluklu olana yakın olmakla birlikte çok az bir miktar daha fazla olduğu fakat sıcaklık grafiklerinde ise aynı bölgede h/2 modelinin sıcaklık değerinin daha fazla olduğu görülebilmektedir. Bu farklılığın, Nu sayısı değerlerinin kanal yüzeyinde alınırken; sıcaklık değerlerinin 0.5h yüksekliğinde alınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, maksimum ısı transferinin ve çevrim bölgesinin ve buna bağlı olarak akış hareketliliğinin fazla olduğu yeniden birleşme bölgesine kadar akışkan sıcaklık değerinde azalma meydana gelirken, bu bölgeden sonra akış hareketliliğinin azalmasıyla taşınımla ısı transferi direnci artarken; iletimle ısı transferi direnci azalmakta ve dolayısıyla akışkan sıcaklık değerleri artışa geçmektedir.

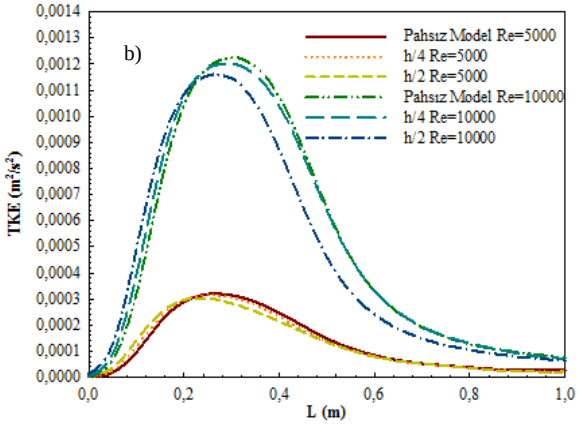
Şekil 5a ve b' de sırasıyla sıvı sodyum ve su akışkanlarına ait 0.5h adım yüksekliğindeki kanal hattı boyunca türbülans kinetik enerji (TKE) değişimleri Re=5000 ve 10000 değerleri için gösterilmektedir. Türbülans kinetik enerji, akışın türbülans değerinin yani karışmasının bir ölçüsüdür. Şekillderden de kolaylıkla görülebildiği gibi akış ayrılmasının olduğu bölgede en yüksek TKE değeri h/2 pah uzunluklu geriye dönük adım akışı bölgesi için elde edilirken, en düşük TKE değerleri pahsız kanal için elde edilmektedir. Bununla birlikte, akışın birleşme bölgesinden sonra her iki akışkan için de TKE değerleri pahlı kanallar için azalmaktadır. Çünkü pahlı kanalların türbülans kinetik enerjileri ayrılmış akış bölgesinde azaldığından yeniden birleşme bölgesinde düz kanal için TKE değerleri daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bunun yanısıra, akışkan viskozite değerinin sıvı sodyuma göre daha düşük olduğu su akışkanı için daha yüksek TKE değerlerine ulaşılmaktadır.

Sırasıyla sıvı sodyum ve su akışlarına ait farklı Re sayılarında 0.5h adım yüksekliğinde kanal boyunca akışkanların basınç değişimleri Şekil 6a ve b' de verilmektedir. Ayrılmış akış bölgesinde TKE değişiminin de dolayısıyla akışkan hızının fazla olduğu h/2 pah uzunluklu modelde en fazla basınç değerine ulaşılırken; akışın birleşme bölgesinde hızın azalmasıyla basınç değeri en düşük değerine gelmektedir. Su akışkanı için de benzer durum elde edilmekle birlikte TKE' nin daha fazla olduğu suda daha yüksek basınç değerleri elde edilmektedir. Ayrıca, en yüksek basınç değerlerine Re sayısının 10000 olduğu değerde ulaşılmaktadır.

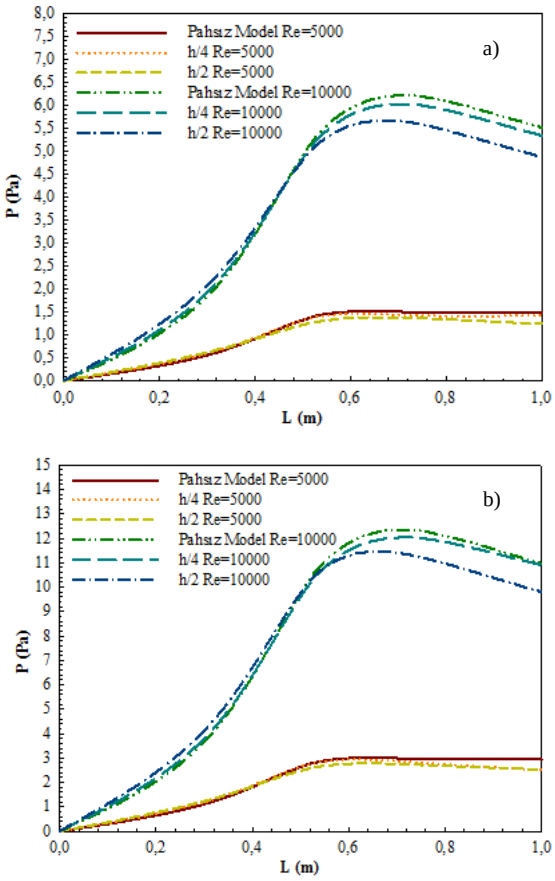


Şekil 4. Akışkan sıcaklık değişimi a) Sıvı sodyum b) Su





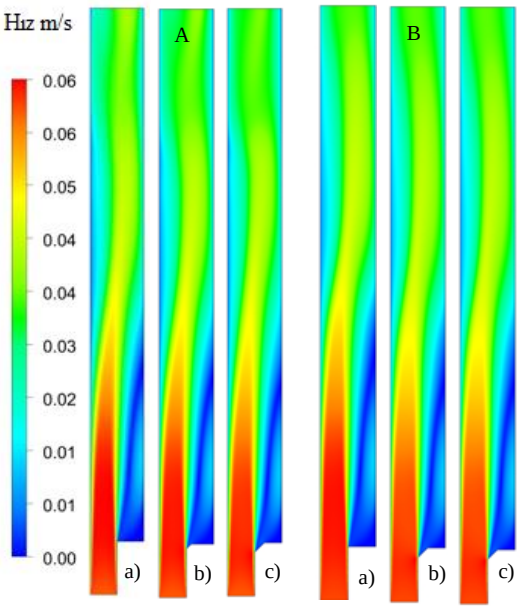
Şekil 5. Akışkan türbülans kinetik enerji değişimi
a) Sıvı sodyum b) Su



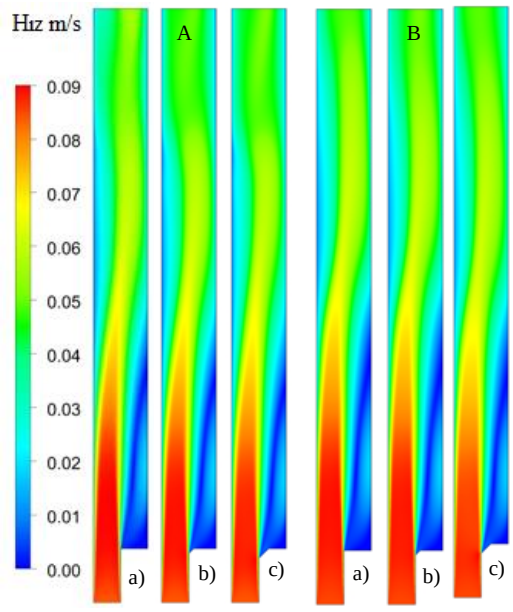
Şekil 6. Akışkan basınç değişimi
a) Sıvı sodyum b) Su

Şekil 7 ve 8' de sırasıyla sıvı sodyum ve su akışkanları için geriye dönük adım akışı modellerinin olduğu kanallarda A-Re=5000 B-Re=10000 ve a) Pahsız b) h/4 c) h/2 pah uzunluklu kanallar için hız dağılımı konturları verilmektedir. 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. Kanala girişte ise hız maksimum olduğundan koyu kırmızı renkle görülmektedir. h/2 pah uzunluğunda h/4' e göre özellikle akış ayrılmasının olduğu geriye dönük adım geometrisinin olduğu kısımda hız değerleri daha yüksek, bu bölgede kontur rengi daha açıktır. Bunula birlikte, Şekil 8' de görülebildiği gibi su için Şekil 7' deki sıvı sodyuma göre koyu kırmızı renkli kısmın şiddeti daha fazladır. Buna ek olarak, her iki akışkan için Re=10000 değerinde Re=5000' e göre hız değişimi daha fazladır.

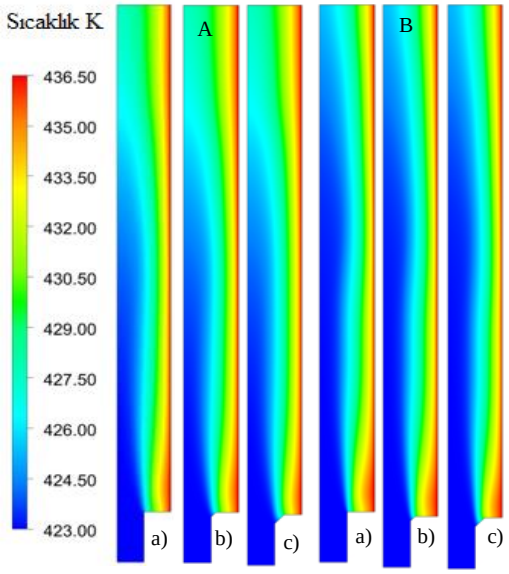


Şekil 7. Sıvı sodyum için hız dağılımları A-Re=5000 B-Re=10000 a) Pahsız b) h/4 c) h/2

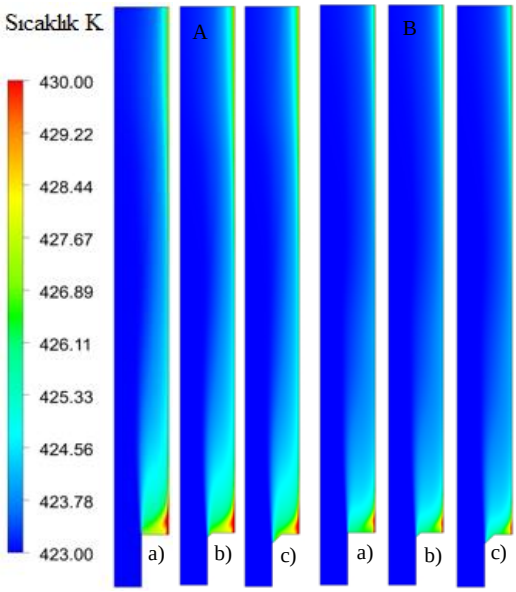


Şekil 8. Su için hız dağılımları A-Re=5000 B-Re=10000 a) Pahsız b) h/4 c) h/2

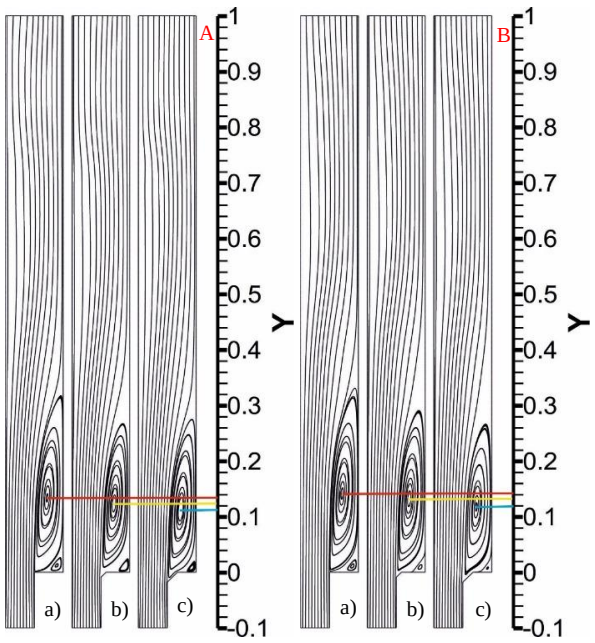
Sıvı sodyum ve su akışkanına ait sıcaklık dağılımı konturları sırasıyla Şekil 9 ve 10' da A-Re=5000 B-Re=10000 için a) Pahsız b) h/4 c) h/2 pah uzunlukları için gösterilmektedir. Şekil 9 ve 10' dan da kolaylıkla görülebildiği gibi ısı iletim katsayısı sudan yüksek olan sıvı sodyumun sıcaklık değerleri sudan daha yüksektir. Bu nedenle, sıcaklık konturu dağılımı daha açık renktedir. Bu durum, sabit yüzey sıcaklığındaki geriye dönük adımın aşağıakım kısmından sıvı sodyuma olan ısı transferi nedeniyle gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, özellikle h/2 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/4 pah uzunluklu modele göre daha koyu kırmızı renktedir. Ayrıca, Şekil 10' dan da görülebildiği gibi su akışkanında kanala pah verildiğinde ayrılmış akış bölgesinde hareketlilik sağlansa da oluşan yeniden dolaşım bölgesi nedeniyle geriye dönük adımın alt köşe noktasında akışkanın sıcaklığının maksimum olduğu koyu kırmızı renkli kısım bulunmaktadır.



Şekil 9. Sıvı sodyum için sıcaklık dağılımları A-Re=5000 B-Re=10000 a) Pahsız b) h/4 c) h/2

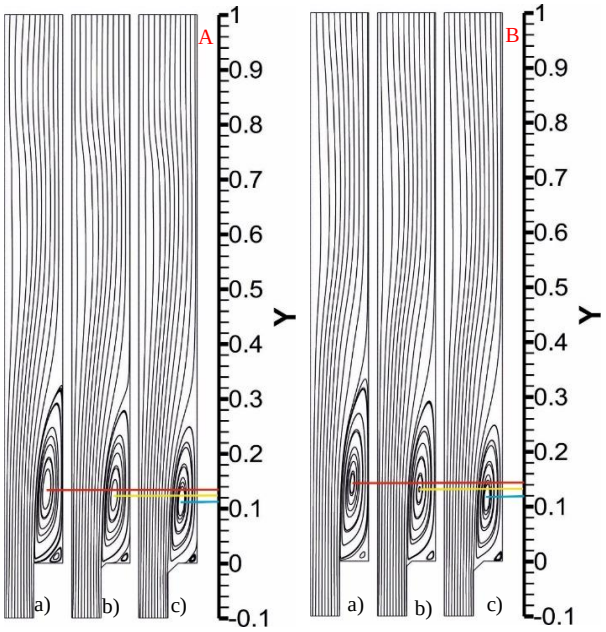


Şekil 10. Su için sıcaklık dağılımları
A-Re=5000 B-Re=10000 a) Pahsız b) h/4 c) h/2



Şekil 11. Sıvı sodyum için akım çizgisi dağılımları
A-Re=5000 B-Re=10000 a) Pahsız b) h/4 c) h/2

Şekil 11 ve 12' de sırasıyla sıvı sodyum ve su akışkanları için A-Re=5000 B-Re=10000 a) Pahsız b) h/4 c) h/2 uzunluklu geriye dönük adım akışı modelli kanallar için akım çizgileri dağılımları görselleştirilmiştir. Yeniden birleşme uzunluğu hakkında fikir sahibi olabilmek için şekiller üzerinde yeniden dolaşım bölgesinin merkez noktasının uzunlukları y koordinatı üzerinde çizilerek gösterilmiştir. Ayrılmış akış bölgesinde, yeniden dolaşım bölgesinin merkez noktası uzunluğunun azaltılması, geriye dönük adım akışında hareketliliğin artırılması anlamına gelmekte olup, akışkanın karışmasının sağlanarak ısı transferi artırılmaktadır. Şekil 11 ve 12' den de görüldüğü gibi her iki akışkan için h/2 pah uzunluğunda yeniden dolaşım ve yeniden birleşme noktaları geriye dönük adıma doğru daha fazla çekilerek kanal boyunca ısı transferinin arttığı bölge artırılmaktadır. Bununla birlikte, Re sayısının artışı ayrılmış akıştaki yeniden dolaşım noktasının konumunu etkileyerek bu bölgenin uzunluğunun artmasına sebep olurken, adım yüksekliği boyunca genişliğinin ise azalmasını sağlamaktadır. Böylece, Re sayısı artışıyla adım yüksekliği boyunca küçülen yeniden dolaşım bölgesinde hem hareketlilik de hem de ısı transferin de artışlar elde edilmektedir. Ayrıca, şekillerden her iki akışkan arasındaki ayrılmış bölgenin uzunluğunun tam olarak belirlenmesi oldukça zor görülmektedir.



Şekil 12. Su için akım çizgisi dağılımları
A-Re=5000 B-Re=10000 a) Pahsız b) h/4 c) h/2

V. GENEL SONUÇLAR

Gaz türbini motorları, yakıcılar, ısıtma ve soğutma sistemleri gibi birçok mühendislik uygulamasında geriye dönük adım akışı nedeniyle ayrılma ve yeniden birleşme bölgeleri meydana gelmektedir. Bu bölgelerin kontrolü, ısı ve kütle transferi miktarını artırmak için oldukça önemlidir. Bununla birlikte, hareketli akışkanların en önemli teknik uygulamalarından biri, ısıl enerjinin taşınmasıdır. Düşük Prandtl sayılı sıvı metaller, yüksek ısıl yayılımları nedeniyle hava veya su ile karşılaştırıldığında daha büyük ısı akıları sağladıkları için son yıllarda artan bir ilgi kazanmışlardır. Dahası, bu akışkanlar yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedirler. Bu sebeplerle, sıvı metaller ısı transferi ve depolanması için nükleer teknolojide ve yoğunlaştırılmış güneş uygulamalarında ayrı bir öneme sahip olup, göz önüne alınmaktadır.

Bu çalışmada, akış ayrılması ve yeniden birleşmesinin etkisini araştırmak amacıyla dikey olarak yerleştirilmiş geriye dönük adım akışı geometrisinde h/4 ve h/2 olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının pahsız (düz-normal) geometriye göre ısı transferi ve akış özellikleri sıvı sodyum metali ve su kullanılarak karşılaştırmalı ve üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak korunum denklemlerinin k-ε türbülans modelli, Boussinesq yaklaşımıyla ANSYS-FLUENT bilgisayar programıyla sayısal olarak çözdürülmesiyle incelenmiştir. 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=5000 için sıvı sodyum akışında pahsız (normal) geometrinin ortalama Nu sayısı değerinin, h/2 pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinden %9 daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Buna ek olarak, her iki akışkan için Re=10000 için elde edilen Nu sayısı değerleri Re=5000' den daha fazladır.
- Sıcaklık değerleri incelendiğinde, sıvı sodyum için ısıl iletkenlik değeri suya göre yüksek olduğundan ve buna bağlı olarak ısının yayılımı daha iyi olduğundan 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 sabit hızla hareketine devam ettiğinden akışkan sıcaklık değerleri de kanal boyunca sabit değerde devam etmektedir.
- Akış ayrılmasının olduğu bölgede en yüksek TKE değeri h/2 pah uzunluklu geriye dönük adım akışı bölgesi için elde edilirken, en düşük TKE değerleri pahsız kanal için elde edilmektedir.
- Bunun yanısıra, akışkan viskozite değerinin sıvı sodyuma göre daha düşük olduğu su akışkanı için daha yüksek TKE değerlerine ulaşılmaktadır.
- Ayrılmış akış bölgesinde TKE değişiminin de dolayısıyla akışkan hızının fazla olduğu h/2 pah uzunluklu modelde en fazla basınç değerine ulaşılırken; akışın birleşme bölgesinde hızın azalmasıyla basınç değeri en düşük değerine gelmektedir.
- 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.
- h/2 pah uzunluğunda h/4' e 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 sıvı sodyumun sıcaklık değerleri sudan daha yüksektir. Bu nedenle, sıcaklık konturu dağılımı daha açık renktedir. Bu durum, sabit yüzey sıcaklığındaki geriye dönük adımın aşağıakım kısmından sıvı sodyuma olan ısı transferi nedeniyle gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, özellikle h/2 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/4 pah uzunluklu modele göre daha koyu kırmızı renktedir.
- Her iki akışkan için h/2 pah uzunluğunda yeniden dolaşımın merkezi ve yeniden birleşme noktaları geriye dönük adıma doğru daha fazla çekilerek kanal boyunca ısı transferinin arttığı bölge artırılmaktadır. Bununla birlikte, Re sayısının artışıyla yeniden dolaşım bölgesinin merkez noktası ve buna bağlı olarak yeniden birleşme bölgesinin uzunluğu artmaktadır.
- Sonuç itibariyle, ısı transferini artırmak için ayrılmış akışın olduğu bölgeyi azaltacak şekilde kanal tasarımları yapılmalıdır. Ayrıca, yüksek ısı iletim katsayılı ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı akışkanların seçimi ısı transferi miktarının fazla olması istenen uygulamalarda son derece önem arz etmektedir.

REFERANSLAR

[1] X. Cheng, N. Tak, "Investigation on turbulent heat transfer to lead-bismuth eutectic flows in circular tubes for nuclear applications", Nuclear Eng. Des., vol. 236, pp. 385-393, 2006.

[2] J. Pacio, K. Litfin, A. Batta, M. Viellieber, A. Class, H. Doolaard, F. Roelofs, S. Manservisi, F. Menghini, M. Bottcher, "Heat transfer to liquid metals in a hexagonal rod bundle with grid

spacers: ¨Experimental and simulation results". Nuclear Eng. Des., vol. 290, pp. 27-39, 2015.
[3] J. Pacio, T. Wetzel, "Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems". Solar Energy, vol. 93, pp. 11-22, 2013.
[4] L. Marocco, G. Cammi, J. Flesch, T. Wetzel, "Numerical analysis of a solar tower receiver tube operated with liquid metals". Int. J. Thermal Sci., vol. 105, pp. 22-35, 2016.
[5] K. Niedermeier, J. Flesch, L. Marocco, T. Wetzel, "Assessment of thermal energy storage options in a sodium-based CSP plant". Appl. Therm. Eng., vol. 107, pp. 386-397, 2016.
[6] S. Manservisi, F. Menghini, "A cfd four parameter heat transfer turbulence model for engineering applications in heavy liquid metals". Int. J. Heat Mass Transf., vol. 69, pp. 312-326, 2014.
[7] H. Kim, D.A. Boysen, J.M. Newhouse, B.L. Spatocco, B. Chung, P.J. Burke, D.J. Bradwell, K. Jiang, A.A. Tomaszowska, K. Wang, W. Wei, L.A. Ortiz, S.A. Barriga, S.M. Poizeau, D.R. Sadoway, "Liquid metal batteries: past, present, and future". Chem. Rev., vol. 113, pp. 2075-2099, 2013.
[8] F. Stefani, T. Weier, T. Gundrum, G. Gerbeth, "How to circumvent the size limitation of liquid metal batteries due to the tayler instability", Energy Convers. Manage, vol. 52, pp. 2982-2986, 2011.
[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] M. Niemann, J. Fröhlich, "Turbulence budgeds in buoyancy-affected vertical backward-facing step flow at low Prandtl number", Flow Turbulence Combust., vol. 99, pp. 705-728, 2017.
[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.