

**SIVI SODYUMUN GERİYE DÖNÜK ADIM AKIŞINDA ISI TRANSFERİ ARTIŞI VE
AKIŞ ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**
INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER ENHANCEMENT AND FLOW
CHARACTERISTICS OF LIQUID SODIUM IN BACKWARD-FACING STEP FLOW

Dr. Öğr. Üyesi Koray KARABULUT

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü

Arş. Gör. Yeliz ALNAK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü

Özet

Geriye dönük adım akışı, hem teorik hem de mühendislik uygulamalarının gelişiminde önemli olan bir ayrılmış akış modelidir. Geriye dönük adım akışının çeşitli uygulamaları, büyük hücum açısında kanat uçlarında, hız kesici kanat akışlarında, bir aracın arkasındaki ayrılma akışında, bir yoğuşturucu/yakıcının içi veya bir motorun giriş tüneli akışında ve ayrıca bir tekne veya binanın etrafındaki akış gibi günlük yaşantımızda bulunabilir. Bununla birlikte, bu bölgelerin kontrolü, ısı ve kütle transferi miktarını artırmak için oldukça önemlidir. 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 ısı depolanması için nükleer teknolojide ve yoğunlaştırılmış güneş uygulamalarında göz önüne alınmaktadır. Bu çalışmada, akış ayrılması ve yeniden birleşmesinin etkisini incelemek amacıyla dikey olarak konumlandırılmış geriye dönük adım akışı geometrisinde $3h/4$ ve h olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının paksız (normal) geometriye göre ısı transferi ve akış karakteristikleri bir sıvı metal olan sıvı sodyumun kullanılmasıyla su ile karşılaştırılarak sayısal olarak incelenmiştir. Akışkanların kanala giriş sıcaklığı 423 K iken, geriye dönük adımın sabit duvar yüzey sıcaklığı 436.5 K' dir. Geriye dönük adımın arkasındaki duvarlardan biri sabit sıcaklıkta tutulurken diğerleri adyabatiktir. Çalışmanın sonuçları, üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak korunum denklemlerinin $k-\epsilon$ türbülans modeli, Boussinesq yaklaşımıyla ANSYS-FLUENT bilgisayar programıyla çözülmesiyle elde edilmiştir. 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. $Re=10000$ için sıvı sodyum akışında paksız (normal) geometrinin ortalama Nu sayısı değerinin, h pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinden %5.2 daha fazla olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ayrılmış akış, Yeniden birleşme, Geriye dönük adım akışı, Isı transferi, Sıvı sodyum

Abstract

The backward step flow is a separated flow model that is important in the development of both theoretical and engineering applications. Various applications of the backward step flow can be found in our daily life, such as at the wing ends at a large angle of attack, the deceleration wing flows, the separation flow behind a vehicle, the inside of a condenser/burner or the inlet tunnel flow of an engine, and also the flow around a boat or building. However, control of the this area is very important to increase the amount of heat and mass transfer. Liquid metals of low Prandtl have gained increasing interest in recent years due to their greater heat dissipation because they provide greater heat fluxes compared to air or water. Moreover, these fluids can withstand high temperatures. For these reasons, liquid metals are considered in nuclear technology and condensed solar applications for heat transfer and heat storage. In this study, in order to research the effect of flow separation and reattachment, the heat transfer and flow characteristics of step corner structures with different chamfer lengths as $3h/4$ and h according to without chamfer (normal) geometry have been numerically searched in the vertically positioned backward-facing step flow geometry by using liquid sodium which is an liquid metal and comparing with water. The inlet temperature of the fluids into the duct is 423 K, while the constant wall surface temperature of the backward step is 436.5 K. One of the walls behind the backward step is 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 $k-\epsilon$ turbulence model with Boussinesq approach using ANSYS-FLUENT computer program. 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 $Re=10000$, the average Nu number value of the step geometry without chamfer (normal) in the liquid sodium flow has been determined to be 5.2% higher than the backward-facing step geometry with h chamfer length.

Keywords: Separated flow, Reattachment, Backward-facing step flow, Heat transfer, Liquid sodium

1. GİRİŞ

Düşük Prandtl sayılı sıvı metaller, yüksek ısı 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 (Cheng ve Tak, 2006) ve yoğunlaştırılmış güneş uygulamalarında göz önüne alınmaktadır (Pacio ve Wetzel, 2013; Marocco ve diğ., 2016; Niedermeier ve diğ., 2016). 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 (Manservisi ve Menghini, 2014). Kaldırmanın önemli etkiye sahip olduğu sıvı metallerin bir diğer uygulaması günümüzde araştırması yapılan sıvı metal bataryalardır (Kim ve diğ., 2013; Stefani ve diğ., 2011).

Son yıllarda, ayrılma ve yeniden birleşmeli akışlar için prototip olarak geriye dönük basamak akışında çeşitli çalışma akışkanlarıyla çalışılmıştır. Armaly ve diğ., (1983) 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 (2014) 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 (1995) üçlü korelasyonları ve tam gelişmiş türbülanslı geriye dönük basamak akışında türbülans kinetik enerji yığınlarını ölçmüşlerdir. Le ve diğ., (1997)' 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 (Simpson, 1989).

Geriye dönük basamaklı akışlardaki ısı transferi çalışmaları hala oldukça azdır. Vogel ve Eaton (1985) 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 diğ., (2004) 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 (2002) 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 $3h/4$ ve h olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının pahsız (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 sıcaklığı 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 $k-\varepsilon$ 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 da 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 $k-\varepsilon$ 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 çözümünü 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 (ANSYS, 2003).

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

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

y momentum denklemi

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

z momentum denklemi

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

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

Enerji denklemi

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

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

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

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

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

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

Türbülans kinetik enerji dağılım denklemi

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

Model sabitleri olan C_μ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k ve σ_ϵ standart k- ϵ türbülans modelinde kullanılan genel saptanmış değerlerdir (ANSYS, 2003). Bu sabitlerin değerleri, birçok türbülanslı akış için çok sayıda veri uyumuyla sağlanmıştır. Bu sabitlerin değerleri aşağıdaki gibidir;

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

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.

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

Burada h yüzey üzerindeki yerel ısı taşınım katsayısı ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), 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

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

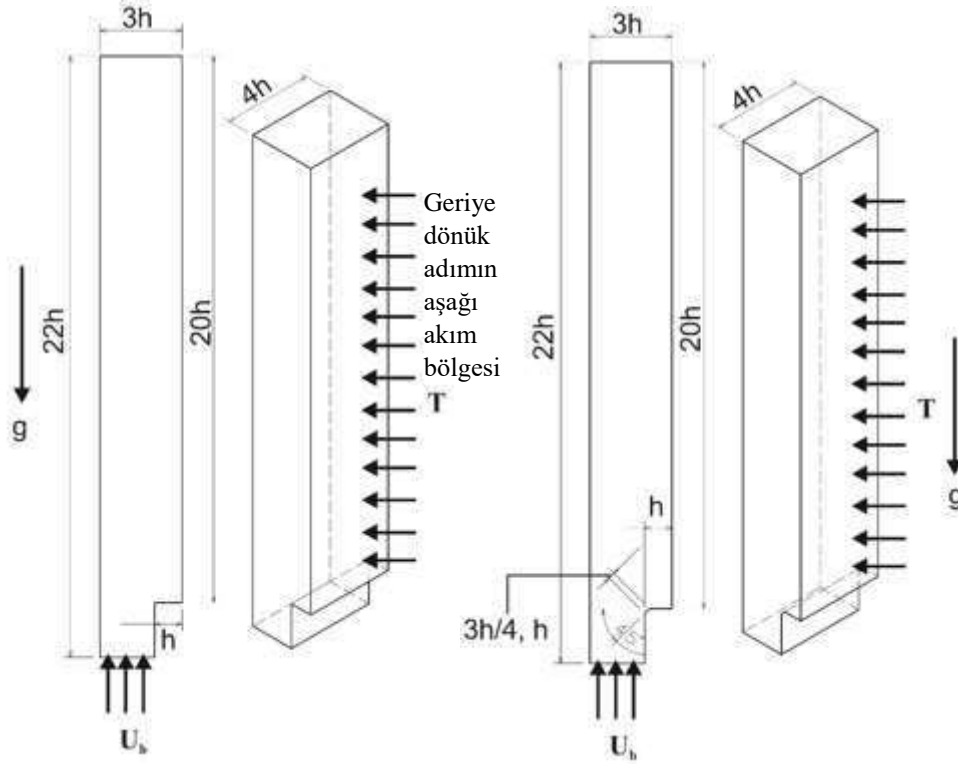
Burada ΔP kanal boyunca akış yönündeki basınç düşüşü ve f sürtünme faktörüdür.

3. GEOMETRİK MODEL

Şekil 1a' da geriye dönük adım geometrisinin pahsız (normal) geometrik yapısı gösterilirken, Şekil 1b' de ise $3h/4$ ve h 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. 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 $3h/4$ ve h 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 çözümlenelerde g yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²) de hesaba katılmıştır. Sıvı sodyumun termofiziksel değerleri (Niemann ve Fröhlich, 2017) $\rho=915.52$ kg/m³, $c_p=1361.85$ J/kgK, $k=84.4$ W/mK, $\mu=0.4575$ Ns/m², ısı genleşme katsayısı $\beta=0.00025644$ K⁻¹ iken suyun termofiziksel değerleri $\rho=916.6$ kg/m³, $c_p=4311$ J/kgK, $k=0.682$ W/mK, $\mu=0.000183$ Ns/m², ısı genleşme katsayısı $\beta=0.001025$ K⁻¹, dir.

Bu çalışma şu kabuller altında gerçekleştirilmiştir.

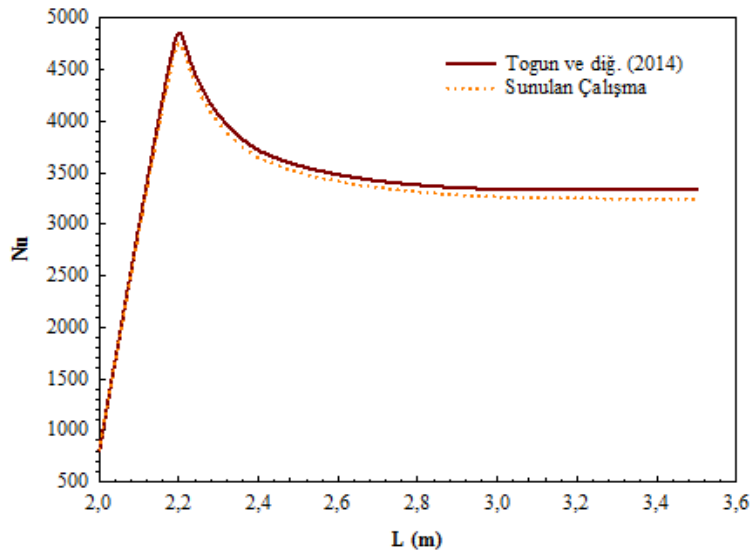
- a) Geriye dönük adım akışı için akış alanı üç boyutlu, zamandan bağımsız ve türbülanslıdır.
- b) Hesaplamalar sıkıştırılamaz akış için yapılmıştır.
- c) Çalışma akışkanları olarak su ve sıvı sodyum kullanılmıştır.
- d) Geriye dönük adımın arkasındaki duvar yüzeyine sabit 436.5 K yüzey sıcaklığı uygulanırken diğer duvarlar adyabatiktir.
- e) Akışkanların ısı özellikleri sabittir.
- f) Hem akışkanlar hem de duvarlar için ısı üretimi yoktur.



Şekil 1. Geriye dönük adım geometrisi a) Pahsız (normal) b) 3h/4 ve h 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/m²) aşağı akım uzunluğuna sahip bir geriye dönük adım geometrisi modelinde Re=10000' de su akışkanı için Togun ve diğ. (2014) 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 diğ. (2014)' nin 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 dikdörtgenel ağ elemanı kullanılmıştır. Ayrıca, pahsız, $3h/4$ ve h 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_{ort} |
|-----------|---------|-----------|
| 939495 | 1185.25 | 0.034254 |
| 988942 | 1196.56 | 0.034824 |
| 1080420 | 1196.48 | 0.344715 |

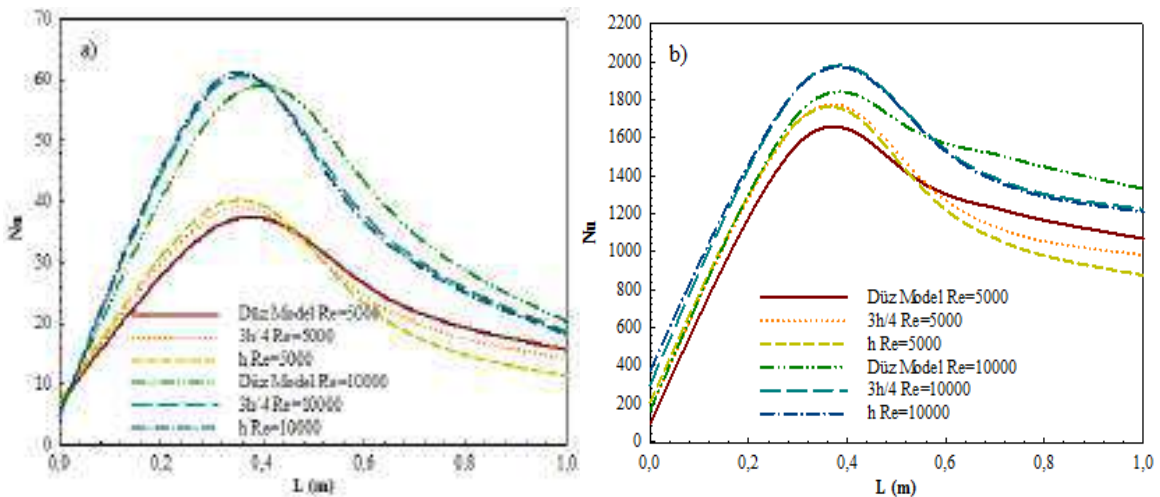
Tablo 2. Pahsız, $3h/4$ ve h pah uzunluklu kanaldaki ağ sayıları

| Kanal Tipi | Mesh Sayısı |
|----------------------|-------------|
| Pahsız | 988942 |
| $3h/4$ Pah Uzunluklu | 990582 |
| h Pah Uzunluklu | 991830 |

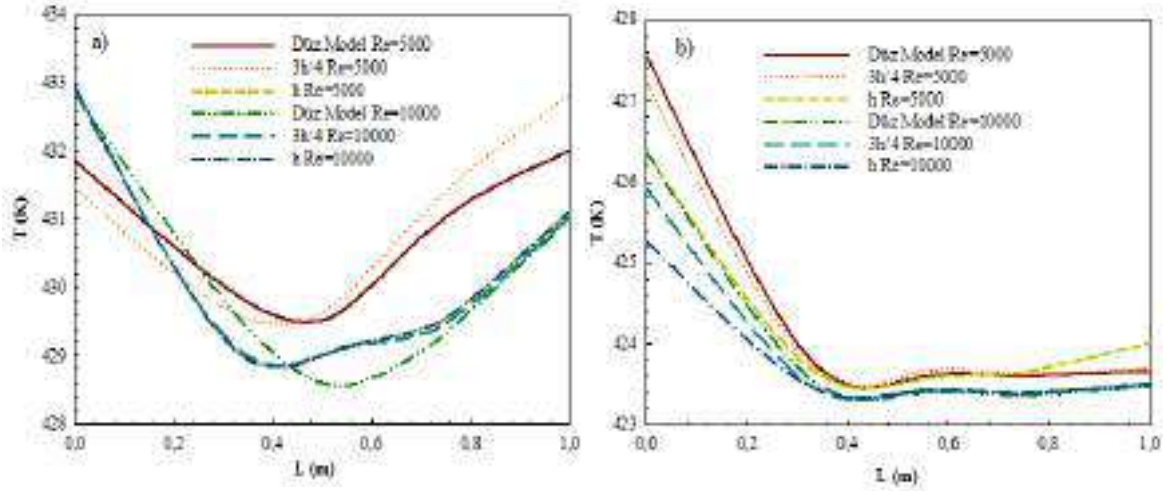
Şekil 3a ve b’ de sırasıyla 5000 ve 10000 Reynolds sayıları için sıvı sodyum ve su akışkanlarına ait pahsız (düz), $3h/4$ ve h pah uzunluklu kanal modeli geriye dönük adım geometrilerinin aşağı akım bölgelerindeki (sabit yüzey sıcaklığında tutulan kısım) Nu sayısı değişimleri verilmektedir. Geriye dönük adım akışı için akış ayrılmasının olduğu yaklaşık 0.4 m’ lik kanal uzunluğuna kadar her iki Re sayısı ve akışkan için $3h/4$ ile birbirlerine çok yakın olmakla birlikte en yüksek Nu sayısına akışkan ile yüzey arasında en yüksek sıcaklık farkının olduğu h pah uzunluklu modeller için erişilirken, en düşük Nu sayısına düz modelde ulaşılmaktadır. Bununla birlikte, 0.4 m kanal uzunluğundan sonra akışın yeniden birleştiği bölgede $3h/4$ ve h pah uzunlukları için akışkanın ısınmasıyla sıcaklık farkı azaldığından ısı transferi azalmakta ve bu noktadan sonra pahsız (düz) kanal için pahlı kanallara ($3h/4$ ve h) göre daha yüksek Nu sayısı değerleri elde edilmektedir. Dahası, $Re=10000$ için sıvı sodyum akışında pahsız (normal) geometrinin kanal boyunca ortalama Nu sayısı değerinin, h pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinden %5.2 daha fazla olduğu bulunmuştur. Su akışkanında da 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 Re sayısının 5000 olduğu değerdeki Nu sayısı değerleri ile 10000 olduğu değerdeki Nu sayısı değerlerinin sıvı sodyuma göre birbirine daha yakın olması yeniden birleşme bölgesinde su için akışkan karışmasının sıvı sodyuma göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Buna ilaveten, her iki akışkan için $Re=10000$ için elde edilen Nu sayısı değerlerinin $Re=5000$ ’ den daha fazla olduğu Şekil 3 a ve b’ den kolaylıkla görülebilmektedir.

Sırasıyla sıvı sodyum ve su akışkanlarına ait düz, 3h/4 ve h pah uzunluğuna sahip geriye dönük adım akışı geometrilerindeki aşağı akım bölgesinde h yükseklikli adımın yarı yüksekliği olan 0.5h yüksekliği için kanal boyunca akışkanların sıcaklık değişimleri Şekil 4a ve b' de gösterilmektedir. Sıvı sodyum için ısı iletkenlik değeri suya göre yüksek olduğundan ve buna bağlı olarak ısının yayılımı daha iyi olduğundan daha yüksek akışkan sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Nu sayısı grafiğine paralel olarak, kanalın giriş kısmında akış ayrılmasının olduğu bölge civarında pahlı kanallarda (3h/4 ve h) daha yüksek akışkan sıcaklık değerleri elde edilirken, akışın yeniden birleşme bölgesine doğru sıcaklık değeri ısı transferinin azalması nedeniyle azalmakta ve bu bölgeden sonra düz ve pah uzunluklu kanalların sıcaklık değerleri birbirine yaklaşarak artışa geçmektedir. Su için de yine benzer durum elde edilmekle birlikte yeniden birleşme bölgesinden sonra sıcaklık değerleri birbirlerine daha yakın seyretmektedir. Bununla birlikte, geriye dönük adım geometrisinde sıvı sodyum için h pah uzunluklu kanallar için ayrılma bölgesinde daha yüksek akışkan sıcaklık değerleri elde edilirken; su için karışmanın daha iyi olduğu 3h/4 modelinde daha yüksek sıcaklık değişimleri elde edilmektedir. Ayrıca, yeniden birleşme bölgesinde sıcaklık değerleri birbirine yaklaşmaktadır.

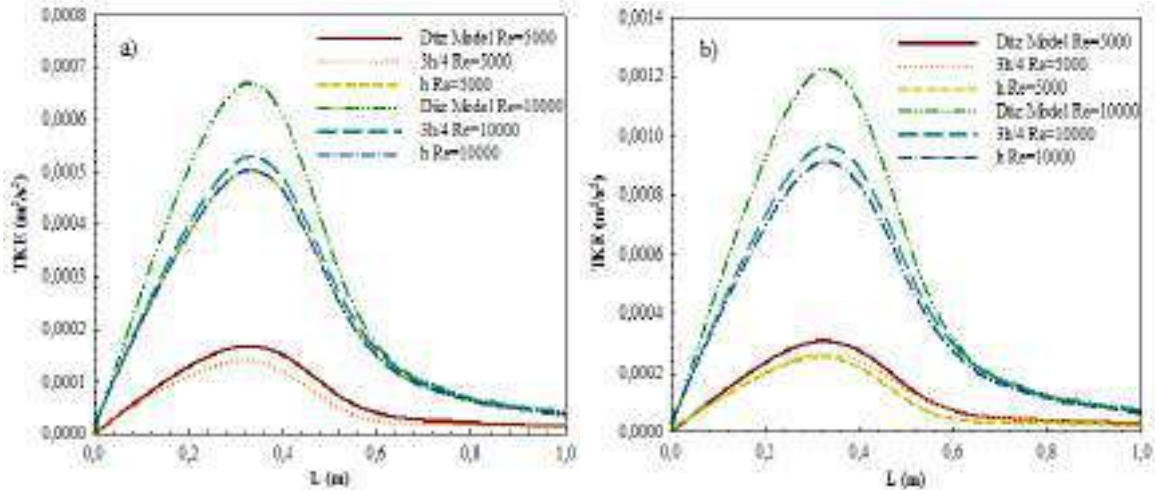
Sıvı sodyum ve su akışkanlarına ait 0.5h adım yüksekliğindeki kanal hattı boyunca türbülans kinetik enerji (TKE) değişimleri Reynolds sayısının 5000 ve 10000 değerleri için sırasıyla Şekil 5a ve b' de verilmektedir. Türbülans kinetik enerji, akışın türbülans değerinin yani karışmasının bir ölçüsüdür. Re=10000 için TKE değerinde Re=5000' e göre daha fazla artış meydana gelirken, akışın yeniden birleşme bölgesine doğru TKE değerlerinde meydana gelen artış, bu noktadan sonra azalarak devam etmektedir. Çünkü, bu noktadan sonra akış ayrılmış akış bölgesinde oluşan yeniden dolaşım bölgesinden uzaklaştığından hız daha sabit ve düzenli bir hale gelmektedir. Bununla birlikte, geriye dönük pah kısmına verilen eğim uzunluklarına rağmen düz (pahsız) kanaldaki TKE değerlerine ulaşamadığı Şekil 5a ve b' den görülebilmektedir. Ayrıca, sıvı sodyumun su akışkanına göre yüksek olan viskozitesi ve buna bağlı olarak azalan hız değerleri nedeniyle kanal boyunca TKE değerleri daha düşüktür.



Şekil 3. Farklı Pah Uzunluklu Geriye Dönük Adım Geometrileri için Kanal Boyunca Nu sayısı Değişimi a) Sıvı sodyum b) Su

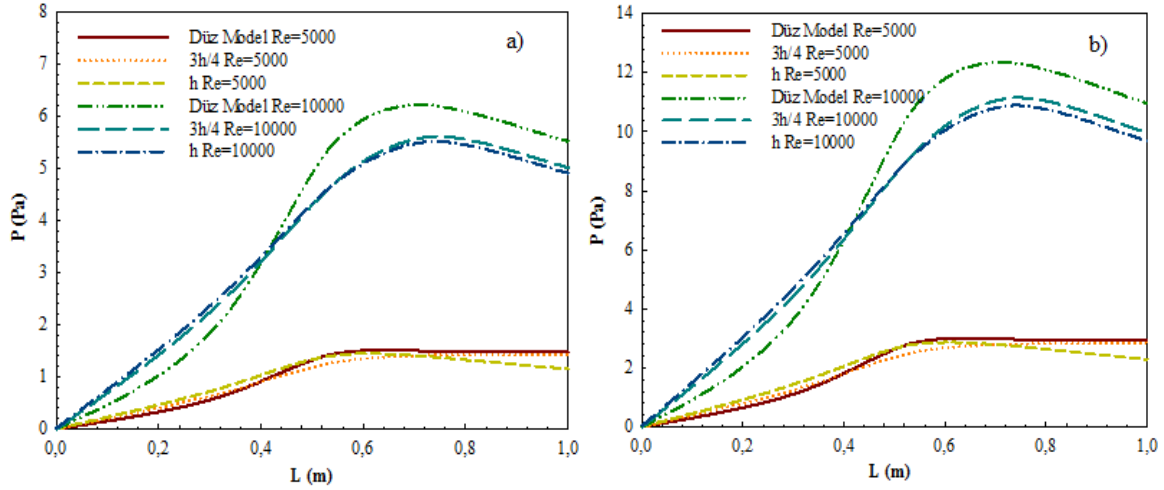


Şekil 4. Farklı Pah Uzunluklu Geriye Dönük Adım Geometrileri için Kanal Boyunca Akışkan Sıcaklık Değişimi a) Sıvı sodyum b) Su



Şekil 5. Kanal Boyunca Akışkan Türbülans Kinetik Enerji Değişimi a) Sıvı sodyum b) Su

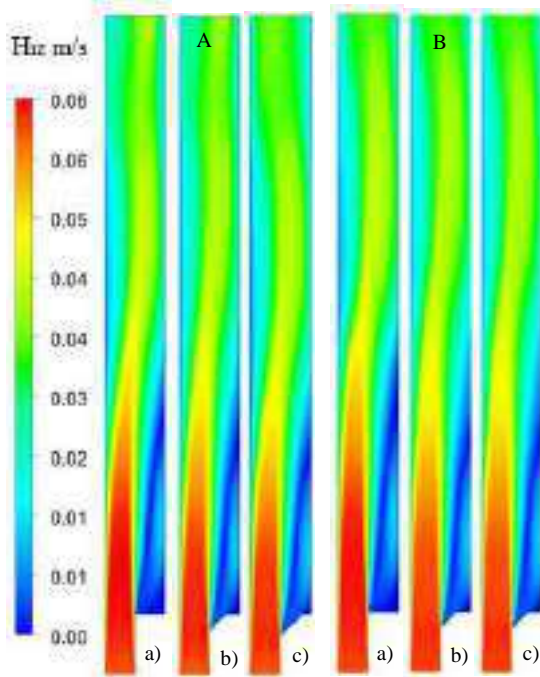
Sırasıyla sıvı sodyum ve su akışlarına ait farklı Re sayılarında 0.5h adım yüksekliğinde kanal boyunca akışkanların basınç değişimleri Şekil 6a ve b' de verilmektedir. Ayrılmış akış bölgesinde TKE değişiminin de dolayısıyla akışkan hızının nispeten fazla olduğu h pah uzunluklu modelde en fazla basınç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



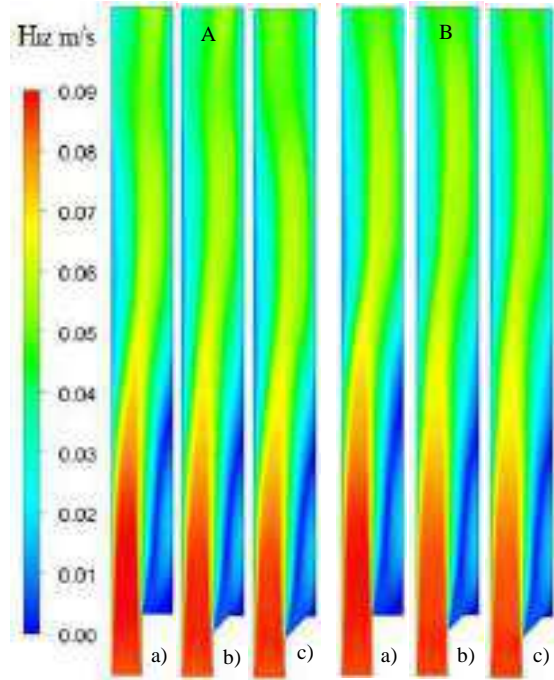
Şekil 6. Kanal Boyunca Akışkanın Basınç Değişimi a) Sıvı sodyum b) Su

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 (Düz) b) 3h/4 c) h pah uzunluklu kanallar için hız dağılımı konturları gösterilmektedir. Hız dağılımı konturlarından da görülebildiği gibi geriye dönük adım kısmında koyu mavi renk olan kısım akışkan hızının en az olduğu yeniden dolaşım bölgesinin olduğu bölgedir. Adım kısmına pah uzunluğu verildiğinde akış geriye dönük adıma doğru yönlendirilebilmektedir. Böylece, bu bölgede akış hareketliliği artırılmakta ve koyu mavi renkli kısım açık maviye doğru renk değiştirmektedir. Bununla birlikte, kanala girişte ise hız maksimum olduğundan koyu kırmızı renkle görülmektedir. h pah uzunluğunda 3h/4’ e göre özellikle akış ayrılmasının olduğu geriye dönük adım geometrisinin olduğu kısımda hız değerleri daha yüksek ve bu nedenle bu bölgede kontur rengi daha açıktır. Bunun yanısıra, 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 değişimleri daha şiddetlidir.

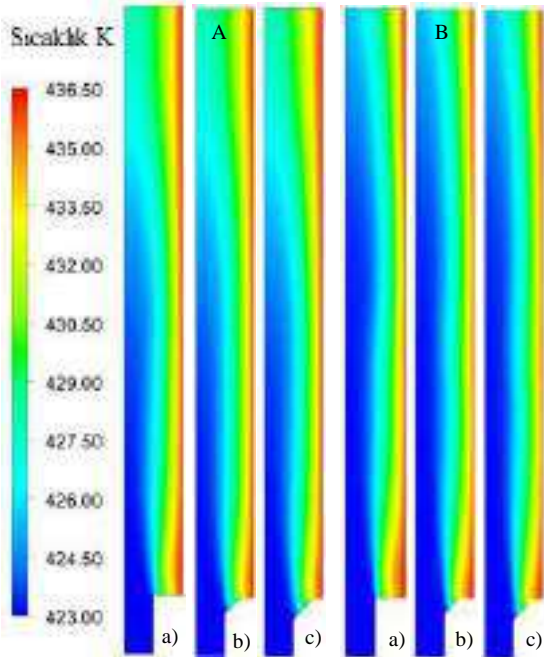
Sıvı sodyum ve su akışkanına ait sıcaklık dağılımı konturları sırasıyla Şekil 9 ve 10’ da A-Re=5000 B-Re=10000 için a) Pahsız b) 3h/4 c) h pah uzunlukları için gösterilmektedir. Şekil 9 ve 10’ dan da rahatlıkla görülebildiği gibi ısı iletim katsayısı sudan yüksek olan sıvı sodyumun sıcaklık değerleri sudan daha yüksektir. Bu nedenle, sıcaklık konturu dağılımı daha açık renktedir. Bununla birlikte, sıvı sodyum için özellikle h pah uzunluklu modelde akış ayrılma bölgesinde sabit sıcaklıktaki yüzeyden üst taraftaki diğer yüzeye doğru sıcaklıkta daha fazla değişim meydana gelirken, su için aynı bölgede 3h/4 pah uzunluklu modelde diğer pah uzunluklu model olan h’ a göre sıcaklık konturu rengi daha açık mavi renktedir. Bunun yanı sıra, akışkan karışması nedeniyle h uzunluklu modelde de akışkanın sıcaklığında artış yönünde değişim meydana gelmektedir. 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.



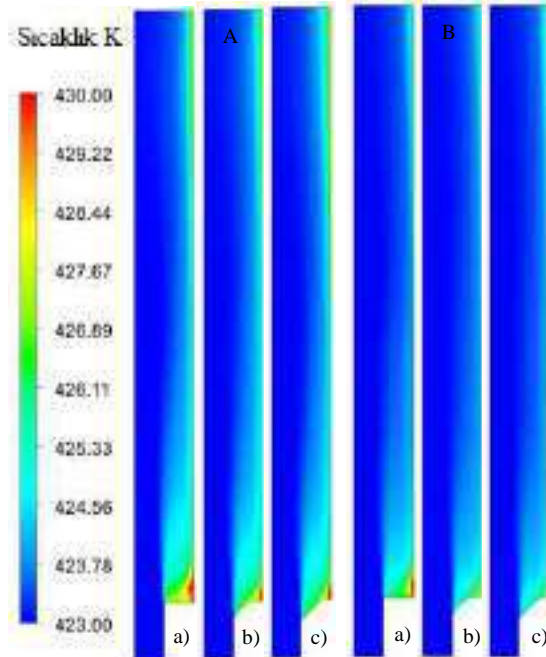
Şekil 7. Sıvı sodyum için hız dağılımları
A-Re=5000 B-Re=10000
a) Pahsız b) 3h/4 c) h



Şekil 8. Su için hız dağılımları
A-Re=5000 B-Re=10000
a) Pahsız b) 3h/4 c) h



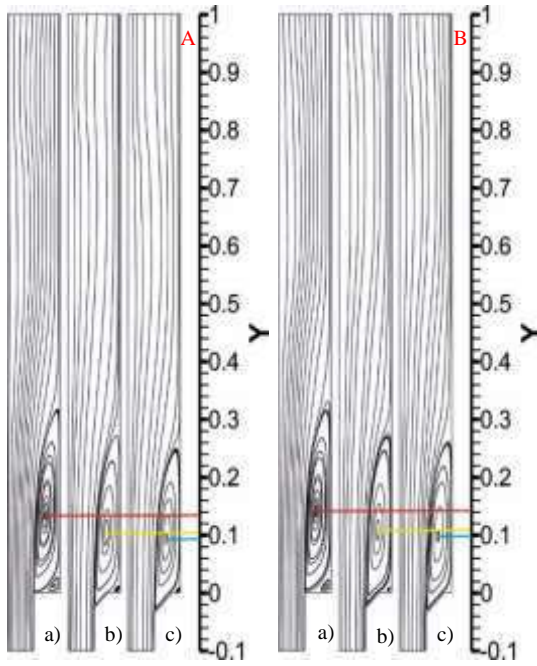
Şekil 9. Sıvı sodyum için sıcaklık dağılımları
A-Re=5000 B-Re=10000
a) Pahsız b) 3h/4 c) h



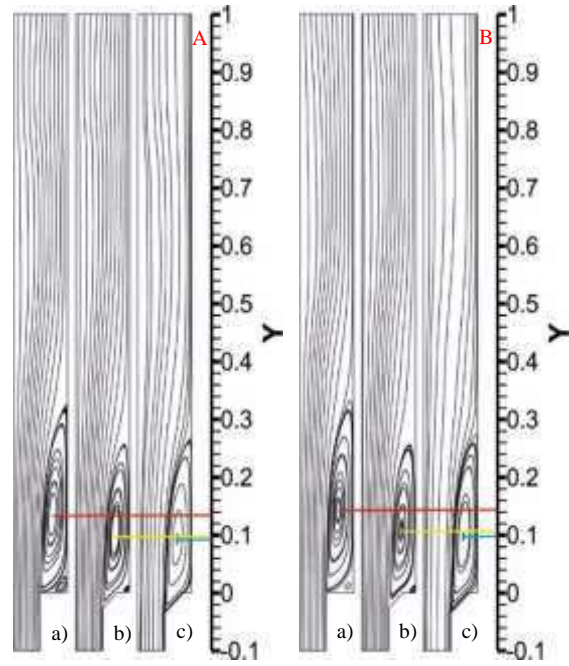
Şekil 10. Su için sıcaklık dağılımları
A-Re=5000 B-Re=10000
a) Pahsız b) 3h/4 c) h

Şekil 11 ve 12' de sırasıyla sıvı sodyum ve su akışkanları için A-Re=5000 B-Re=10000 a) Pahsız b) 3h/4 c) h uzunluklu geriye dönük adım akışı modellenmiş kanallar için akım çizgileri dağılımları görselleştirilmiştir. Yeniden birleşme uzunluğu belirleyebilmek için modeller 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 gelirken, akışkanın karışmasının sağlanarak ısı transferi artırılmaktadır. Şekil 11 ve 12' den de görüldüğü gibi her iki akışkan için h 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.



Şekil 11. Sıvı sodyum için
akım çizgisi dağılımları
A-Re=5000 B-Re=10000
a) Pahsız b) 3h/4 c) h



Şekil 12. Su için akım çizgisi dağılımları
A-Re=5000 B-Re=10000
a) Pahsız b) 3h/4 c) h

5. 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 $3h/4$ ve h olmak üzere farklı pah uzunluklu adım köşe yapılarının pahsız (düz-normal) geometriye göre ısı transferi ve akış özellikleri sıvı sodyum metali ve su kullanılarak karşılaştırılmalı ve üç boyutlu ve zamandan bağımsız olarak korunum denklemlerinin $k-\epsilon$ türbülans modeli, 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;

- $Re=10000$ için sıvı sodyum akışında pahsız (normal) geometrinin kanal boyunca ortalama Nu sayısı değerinin, h pah uzunluklu geriye dönük adım geometrisinden %5.2 daha fazla olduğu bulunmuştur.

- 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 ısı 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.

- $Re=10000$ için TKE değerinde $Re=5000'$ e göre daha fazla artış meydana gelirken, akışın yeniden birleşme bölgesine doğru TKE değerlerinde meydana gelen artış, bu noktadan sonra azalarak devam etmektedir. Bununla birlikte, su akışkanı için akışkanın karışması daha iyi olduğundan sıvı sodyuma göre daha yüksek TKE değerleri elde edilmektedir. Aynı zamanda, yeniden birleşme bölgesinde az da olsa pahsız düz modelin karışım oranının daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

- Ayrılmış akış bölgesinde TKE değişiminin de dolayısıyla akışkan hızının nispeten fazla olduğu h 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 pah uzunluğunda $3h/4$ e göre özellikle akış ayrılmasının olduğu geriye dönük adım geometrisinin olduğu kısımda hız değerleri daha yüksek ve bu nedenle 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 aşağı akım kısmından sıvı sodyuma olan ısı transferi nedeniyle gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, sıvı sodyum için özellikle h pah uzunluklu modelde akış ayrılma bölgesinde sabit sıcaklıktaki yüzeyden üst taraftaki diğer yüzeye doğru sıcaklıkta daha fazla değişim meydana gelirken, su için aynı bölgede $3h/4$ pah uzunluklu modelde diğer pah uzunluklu model olan h' a göre sıcaklık konturu rengi daha açık mavi renktedir.

-Her iki akışkan için h pah uzunluğunda yeniden dolaşımın merkezi ve yeniden birleşme noktaları geriye dönük adıma doğru daha fazla çekilerek kanal boyunca ısı transferinin arttığı bölge artırmaktadır. Bununla birlikte, Re sayısının artışıyla yeniden dolaşım bölgesinin merkez noktası ve buna bağlı olarak yeniden birleşme bölgesinin uzunluğu artmaktadır.

- Sonuç itibarıyla, 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.

KAYNAKLAR

ANSYS Inc., (2003). ANSYS FLUENT User's Guide, Fluent, Netherland, Lebanon, ANSYS Press.

Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F., Schönung, B. (1983). Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, J. Fluid Mech., 127, 473-496.

Avancha, R.V., Pletcher, R.H. (2002). Large eddy simulation of the turbulent flow past a backward-facing step with heat transfer and property variations, Int. J. Heat Fluid Flow, 23, 601-614.

Cheng, X., Tak, N. (2006). Investigation on turbulent heat transfer to lead-bismuth eutectic flows in circular tubes for nuclear applications, Nuclear Eng. Des., 236, 385-393.

Kasagi, N., Matsunaga, A. (1995). Three-dimensional particle-tracking velocimetry measurement of turbulence statistics and energy budget in a backward-facing step flow, Int. J. Heat Fluid Flow, 16, 477-485.

Keating, A., Piomelli, U., Bremhorst, K., Nei, S. (2004). Large-eddy simulation of heat transfer downstream of a backward-facing step, J. Turbul., 5, 1-27.

- Kim, H., Boysen, D.A., Newhouse, J.M., Spatocco, B.L. Chung, B. Burke, P.J., Bradwell, D.J., Jiang, K., Tomaszowska, A.A., Wang, K., Wei, W., Ortiz, L.A., Barriga, S.A., Poizeau, S.M., Sadoway, D.R. (2013). Liquid metal batteries: past, present, and future, *Chem. Rev.*, 113, 2075-2099.
- Le, H., Moin, P., Kim, J. (1997). Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step, *J. Fluid Mech.*, 330, 349-374.
- Manservisi, S., Menghini, F. (2014). A cfd four parameter heat transfer turbulence model for engineering applications in heavy liquid metals, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 69, 312-326.
- Marocco, L., Cammi, G., Flesch, J., Wetzel, T. (2016). Numerical analysis of a solar tower receiver tube operated with liquid metals, *Int. J. Thermal Sci.*, 105, 22-35.
- Nadge, P., Govardhan, R. (2014). High Reynolds number flow over a backward-facing step: structure of the mean separation bubble, *Exp. Fluids*, 55, 1-22.
- Niedermeier, K., Flesch, J., Marocco, L., Wetzel, T. (2016) Assessment of thermal energy storage options in a sodium-based CSP plant, *Appl. Therm. Eng.*, 107, 386-397.
- Niemann, M., Fröhlich, J. (2017). Turbulence budgets in buoyancy-affected vertical backward-facing step flow at low Prandtl number, *Flow Turbulence Combust.*, 99, 705-728.
- Pacio, J., Wetzel, T. (2013). Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems, *Solar Energy*, 93, 11-22.
- Pacio, J., Litfin, K., Batta, A., Viellieber, M., Class, A., Doolaard, H., Roelofs, F., Manservisi, S., Menghini, F., Bottcher, M. (2015). Heat transfer to liquid metals in a hexagonal rod bundle with grid spacers: Experimental and simulation results. *Nuclear Eng. Des.*, 290, 27-39.
- Stefani, F., Weier, T., Gundrum, T., Gerbeth, G. (2011). How to circumvent the size limitation of liquid metal batteries due to the Taylor instability, *Energy Convers. Manage.*, 52, 2982-2986.
- Simpson, R.L. (1989). Turbulent boundary-layer separation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 21, 205-232.
- Togun, H., Safaei, M.R., Sadri, R., Kazi, S.N., Badarudin, A., Hooman, K., Sadeghinezhad, E. (2014). Numerical simulation of laminar to turbulent nanofluid flow and heat transfer over a backward-facing step, *App. Mathematics and Comp.*, 239, 153-170.
- Vogel, J.C., Eaton, J.K. (1985). Combined heat transfer and fluid dynamic measurements downstream of a backward-facing step, *J. Heat Transfer*, 107, 922-929.

TEŞEKKÜR

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