

KARE SİLİNDİR ÜZERİNDEN LAMİNER SÜREKLİ AKIŞTA BLOKAJ ORANININ ISI TRANSFERİ VE AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

M. Özgün KORUKÇU 

Alınma: 07.10.2019 ; düzeltme: 01.04.2020 ; kabul: 03.04.2020

Öz: Sınırlandırılmış bir kanal içerisinde yer alan tek kare silindir (KS) üzerinden iki boyutlu laminar sürekli akış için blokaj ($\beta=B/H$) oranının ısı transferi ve akış karakteristiklerine olan etkisi incelenmiştir. Çalışmada Reynolds sayısı $Re=40$ değerinde sabit tutulurken blokaj oranı $\beta=0.125-0.8$ değerleri arasında değiştirilmiştir. Hesaplamalarda ANSYS CFX 14.0 kullanılmıştır. Blokaj oranı etkisinin KS yüzeyleri üzerindeki sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme katsayısı (C_f), boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) üzerine olan etkileri incelenmiştir. Blokaj oranı arttıkça sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme katsayısı (C_f) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) değerlerinin arttığı ancak boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) değerinin azaldığı bulunmuştur. Sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme faktörü (C_f), boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) ve ortalama Nusselt sayısı değerlerinin blokaj oranına göre değişimini veren bağıntılar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sınırlandırılmış Akış, Kare Silindir, Akış Karakteristikleri, Isı Transferi, HAD

Effect Of Blockage Ratio On Heat Transfer And Flow Characteristics Of Laminar Steady Flow Over Square Cylinder

Abstract: Effect of blockage ratio ($\beta=B/H$) on heat transfer and flow characteristics are investigated for two-dimensional laminar steady flow over a square cylinder (SC) in a confined channel. In the study, while Reynolds number held at $Re=40$, blockage ratio is changed between $\beta=0.125-0.8$ values. For numerical calculations, ANSYS CFX 14.0 is used. Effect of blockage ratio on drag coefficient (C_d), friction factor (C_f), dimensionless recirculation length (L_r/B) and average Nusselt number (Nu) values on SC surfaces are investigated. It is found that as the blockage ratio increases drag coefficient (C_d), friction coefficient (C_f), and average Nusselt number (Nu) values increase, but dimensionless recirculation length (L_r/B) values decrease. Equations of drag coefficient (C_d), friction coefficient (C_f), dimensionless recirculation length (L_r/B), and average Nusselt number variation respect to blockage ratio are derived.

Keywords: Confined Flow, Square Cylinder, Flow Characteristics, Heat Transfer, CFD

SİMGELER DİZİNİ

A	Alan (m^2)
B	Kare silindirin bir kenar uzunluğu (m)
C_d	Sürüklenme katsayısı
C_f	Sürtünme katsayısı
F_d	Sürüklenme kuvveti (N)
h	Isı taşınım katsayısı ($W/m^2.K$)
H	Kanal yüksekliği (m)
k	Isı iletim katsayısı ($W/m.K$)
KS	Kare silindir
L_r	Yeniden birleşme uzunluğu (m)
Nu	Nusselt sayısı
P	Statik basınç (Pa)
Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık (K)
u	Akış yönündeki hız (m/s)
v	Akışa dik yöndeki hız (m/s)
U	Hız (m/s)
x	Akış yönündeki uzunluk (m)
y	Akışa dik yöndeki uzunluk (m)

Yunan Harfleri

α	Isı yayılım katsayısı (m^2/s)
β	Blokaj oranı
χ	Kare silindir yüzeyinde boyutsuz uzunluk
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
τ	Kayma gerilmesi (Pa)

Alt indisler

∞ Giriş

c Merkez

1. GİRİŞ

Endüstride ve uygulamada kanal içerisinde yer alan bir kare silindir üzerinden akış problemi oldukça geniş kullanım alanı bulmaktadır. Kare silindir üzerinden akışta amaç karenin ısıtılması/soğutulması ve daha sonra diğer başka proseslerde kullanılması olabilmektedir. Kanal içerisine yerleştirilmiş kare silindir üzerinden akış; ısıtma-soğutma sistemlerinde, enerji santrallerinde, ağaç-kağıt-meyve-sebze kurutulmasında, otomotiv sanayiinde, ziraat-tarım sektöründe, bina aerodinamiğinde ve deniz üstü yapılar gibi birçok değişik alanda kullanılmaktadır.

Sınırlandırılmış bir kanal içerisinde yer alan kare silindir etrafındaki ısı - kütle transferi ve akış karakteristikleri konusunda oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Bhattacharyya ve Dhinakaran (2008) ard arda dizilmiş kare silindir çifti üzerindeki akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Akışı laminer, iki boyutlu, geçici rejimde kabul ederek Reynolds sayısının etkisini incelemişlerdir. Dhiman (2009) dilatant akışkanların bir kanal içerisinde yer alan uzun kare silindir üzerindeki akış ve ısı transfer karakteristiklerini incelemiştir. Reynolds sayısının 1-45 ve Prandtl sayısının 1-100 aralığında ve blokaj oranının 1/8 olduğu senaryoları çalışmıştır. Dhiman ve diğ. (2005) sınırlandırılmış kanal içerisinde yer alan bir kare üzerindeki akış için sürekli rejimde, Reynolds sayısının 1-45, Prandtl sayısının 0.7-4000 aralığı ve sabit yüzey sıcaklığı ve sabit ısı akısı sınır şartları için ısı transferi korelasyonlarını elde etmişlerdir. Malekzadeh ve Sohankar (2012) dar bir kanal içerisindeki kareden belirli bir uzaklıkta yerleştirilen plakanın ısı ve akış karakteristiklerini azaltması üzerine çalışmışlardır. Reynolds sayısının 50-200 arasında, plaka genişliğinin karenin bir kenar uzunluğunun 0.1-0.9 katı ve plakanın kareden 1.1-7 kenar uzunluğu uzaklığında olacak şekilde yerleştirdiği senaryolar için akış biçimleri ve ısı-akış karakteristiklerindeki azalmaları incelemişlerdir. Song ve Park (2009) kanal içerisinde yer alan kare üzerindeki akışı kısmi ortalama Navier-Stokes (PANS) denklemleri çözümü ile analiz etmişlerdir. Geliştirdikleri modeli çözümlenmeden önce Reynolds Ortalama Navier-Stokes denklemleri çözümlenmesi ile türbülans ve Kolmogorov uzunluğu ölçeklerini belirlemişlerdir. Ayrıca elde ettikleri deneysel sonuçları Large Eddy Simülasyonu (LES) ve Detached Eddy Simülasyonları (DES) sonuçları ile karşılaştırmışlardır ve geliştirdikleri modelin ayrılan türbülanslı akışların LES ve DES modellerinde göre daha az ağ yapısı kullanılarak belirlenmesine olanak sağladığını göstermişlerdir. Turki ve diğ. (2003) kanal içerisinde yer alan bir kare üzerindeki akışı geçici rejimde iki boyutlu olarak incelemişlerdir. Navier-Stokes denklemlerini kontrol hacmi sonlu elemanlar yöntemi (CVFEM) ile çözmüşlerdir. İnceledikleri senaryolarda blokaj oranını 1/4 ve 1/8, Reynolds sayısını 62-200 ve Richardson sayısını ise 0-0.1 değerleri arasında almışlardır. Blokaj oranının, Reynolds ve Richardson sayılarının akış ve ısı karakteristikleri üzerindeki etkileri ile zorlanmış ve karışık ısı taşınımı için ısı transferi korelasyonları elde etmişlerdir. Berrone ve diğ. (2011) düşük Reynolds sayılarında bir kanal içerisinde yer alan kare ve dikdörtgen silindirler üzerinden akışı adaptif sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemleri için incelemişlerdir. Dikdörtgenin en boy oranının 5 olduğu durumda ve değişik Reynolds sayıları için hız profilleri, Strouhal sayısı, sürüklenme katsayısı ve resürkülasyon uzunluğu gibi parametreleri her iki yöntem için karşılaştırmışlar ve aralarında oldukça iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir. Sheard (2011) kanal içerisinde yerleştirilmiş bir karenin akış yönüne göre düşük eğim açılarında yerleştirilmiş bir kare üzerinden akışı incelemişlerdir. Karenin eğim açısını 0°-12° değerleri arasında değiştirmişler ve aynı zamanda eğim açısının ve Reynolds sayısının stabilite üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Bouaziz ve

diğ. (2010) düzlemsel bir kanal içerisinde ısıtılmış kare silindir üzerindeki akış ve ısı transferi karakteristiklerini aynı zamanda akışkanların güç kanununu uygulayarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Breuer ve diğ. (2000) kanal içerisinde yerleştirilmiş bir kare üzerindeki laminer akışı Lattice Boltzmann ve sonlu hacimler yöntemleri kullanılarak çözdürmüş ve elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Blokaj oranını $1/8$ ve en yüksek Reynolds sayısını ise 300 aldıkları çalışmalarında sonuç olarak Lattice Boltzmann yöntemi ile elde edilen sonuçların sonlu hacimler yöntemi kullanarak elde ettikleri sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Chatterjee ve Mondal (2011) kanal içerisinde yer alan ve ısıtılmış bir kare üzerindeki akış için kaldırma kuvvetlerinin girdap oluşumuna olan etkisini incelemişlerdir. Reynolds sayısını 5-45 aralığında tutmuşlar ve böylece akış sürekli rejimde gerçekleşmiştir. Ortalama Nusselt sayısı, akışın yeniden birleşme uzunluğunu ve toplam sürüklenme katsayısı gibi değerleri bulmuşlardır. Cheng ve diğ. (2007) kanal içerisinde yer alan bir kare silindir üzerindeki kayma akışını Lattice Boltzmann yöntemi ile çözümlenmişlerdir. Reynolds sayısını 50-200 arasında ve kayma oranını 0-0.5 arasında tutmuşlardır. Kayma oranının girdap oluşumu, kaldırma ve sürüklenme katsayılarına olan etkisi de incelenmiştir. Kim ve diğ. (2004) kare üzerinden türbülanslı akışı Large Eddy Simülasyonu (LES) kullanarak çözmüşlerdir. Çalışmalarının esas amacı aynı akışın deneysel sonuçları ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırmak olup aynı zamanda Karman girdap oluşumunu da simüle etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda simülasyon ile deneysel sonuçlar arasında çok iyi derecede uyum olduğunu göstermişlerdir. Mahir (2009) bir kanal içerisinde duvara yakın olan kare üzerinden olan akışı iki ve üç boyutlu olarak incelemiştir. Kare silindir ile duvar arasındaki boşluğu (G/D) 0.2-0.4 arasında ve Reynolds sayısını ise 175-185 ve 250 değerleri arasında almıştır. Üç boyutlu çözümlenmenin kaldırma, sürüklenme ve Strouhal sayıları üzerine olan etkileri incelenmiş ve elde edilen çözümler iki boyutlu çözümlenme yapısı ile karşılaştırılmıştır. Özgören (2006) kare ve dairesel silindir arkasındaki girdap akışını dijital parçacık görüntülemesi üzerine çalışmıştır. Kare ve dairesel silindirler arkasındaki akışların zaman ortalamalı anlık hızlarını, girdap oluşumlarını, hızların kare köklerinin ortalamasını Reynolds sayısının 550 ve 3400 arasındaki değerleri için elde etmiştir. Silindir geometrisi ve Reynolds sayısının akış üzerindeki etkilerini tespit etmiştir. Paliwal ve diğ. (2003) kare üzerinden akışta akışkanların güç kanunu üzerine çalışmışlardır. Oldukça düşük bir blokaj değerinde ($1/15$), güç katsayısını 0.5-1.4, Reynolds sayısını 5-40 ve Peclet sayısını ise 5-400 aralığında almışlardır. Kare üzerindeki sınır şartının sabit ısı akışı ya da sabit yüzey sıcaklığı alınması durumları da karşılaştırmışlardır. Sharma ve Eswaran (2004) kare üzerinden akışta blokaj ve kaldırma kuvveti etkisini incelemişlerdir. Richardson sayısının -1 ve 1, Reynolds sayısının 100 ve Prandtl sayısının 0.7 olduğu durumlarda üç değişik blokaj oranı 0.1-0.3 ve 0.5 değerleri için sayısal çözümlenmeler yapmışlardır. Blokaj oranının kaldırma, sürüklenme kuvvetlerine, Strouhal sayısına, pompa gücüne ve akışın resürkilasyon uzunluğuna olan etkilerini göstermişlerdir.

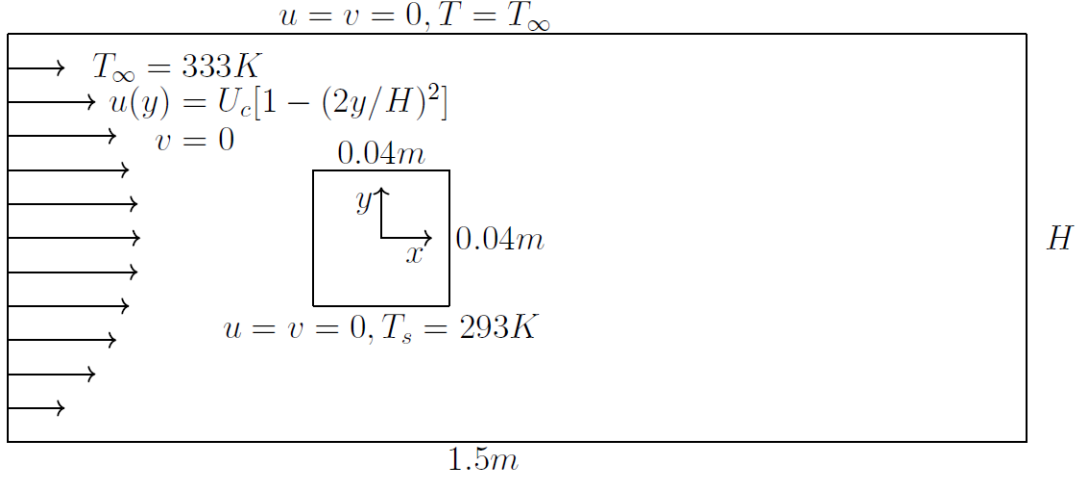
Reynolds sayısının $Re=40$ değerinden fazla olması durumunda akış kararsız hale geçeceğinden bu çalışmada Reynolds sayısının $Re=40$ değerinde sabit tutulduğu laminer sürekli akışta yüzeyleri sabit sıcaklıkta tutulan bir kare silindir üzerinden akış için değişik blokaj oranı değerlerinin ($\beta=0.125-0.8$) ısı transferi ve akış karakteristiklerine olan etkileri incelenmiştir. Literatürde sınırlandırılmış akış için yüksek blokaj oranlarında ısı ve akış karakteristiklerinin incelendiği çalışma oldukça azdır, bu çalışma zayıf, orta ve yüksek blokaj oranlarının ısı ve akış karakteristiklerini açıklamak adına yapılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Geometri ve Sınır Koşulları

Şekil 1'de kare silindir etrafındaki akış için geometrik konum ve akış durumu belirtilmektedir. Hava, tam gelişmiş laminer hız profili $u(y) = U_c \left[1 - \left(\frac{2y}{H} \right)^2 \right]$ ile kanala girmektedir. $U_c = \frac{3}{2} U_\infty$ olup, merkezdeki akış hızıdır. Çıkışta basınç değeri için $P=0$ Pa ve kare

silindirin bir kenarı $B=0.04$ m alınmıştır. Şekil 2 'de ise hesaplamalarda kullanılan örnek bir ağ yapısı gösterilmektedir. Kare yüzeylerine yakın bölgelerde daha sık ağ yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 1:
Akış geometrisi, sınır koşulları ve ölçüleri.



Şekil 2:
Hesaplamalarda kullanılan örnek bir ağ yapısı.

Blokaj oranının $\beta=1/4-1/8$ olduğu aralıkta ise Dhiman ve diğ. (2008) geçici rejime geçiş limitini $Re_{kr}=45$ olarak göstermiştir. Belirtilen kritik Reynolds sayısı altında akış sıkıştırılmaz, sabit termodinamik özellikler ile sürekli rejimde iki boyutta incelenmiştir. Bu koşullar altında sürekli rejimde laminar akış için iki boyutlu Kartezyen koordinatlardaki korunum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

Süreklilik denklemi:

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

Momentum denklemi:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Enerji denklemi:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Kullanılan diğer parametreler ise şu şekildedir:

$$\beta = \frac{B}{H} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho U_c B}{\mu} \quad (6)$$

$$Nu = \frac{hB}{k} \quad (7)$$

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (8)$$

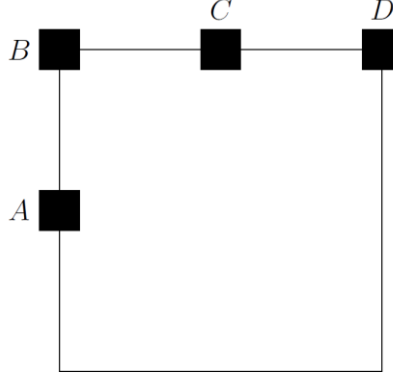
$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (9)$$

Yukarıdaki denklemlerde β blokaj oranı, Re kare silindir için Reynolds sayısı, ρ akışkanın yoğunluğu, μ dinamik viskozite, Nu Nusselt sayısı, h ısı taşınım katsayısı, k akışkanın ısı iletim katsayısı, C_d , sürüklenme katsayısı, F_d sürüklenme kuvveti, U_∞ serbest akış hızı, A alan, C_f sürtünme katsayısı ve τ kayma gerilmesidir.

Sayısal hesaplamalarda ANSYS-CFX 14.0 kullanılmıştır. Hesaplamalar için toplam elemana sahip ağ yapısında ağdan bağımsızlık sağlanmıştır ve korunum denklemleri için yakınsama şartı olarak 1×10^{-7} değeri alınmıştır.

2.2. Ağdan Bağımsızlık

Gerçekleştirilen simülasyonlarda ağdan bağımsızlığın kontrolü için dört farklı ağ yapısı için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kare silindir üzerinde yer alan dört nokta için statik basınç P , kayma gerilmesi τ , hız gradyanı du/dy ve ısı taşınım katsayısı h değerleri karşılaştırılmıştır. Kare üzerinde yer alan bu noktalar Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3:

Ağdan bağımsızlık kontrol noktaları.

Ağdan bağımsızlık için elde edilen değerler Tablo 1’de gösterilmiştir. Dört ağ yapısı incelendiğinde 1464575 eleman içeren ağ yapısı ile 2618046 eleman içeren ağ yapısı için elde edilen değerlerin aynı olduğu görülmektedir. Sonuçların daha doğru olması açısından bu çalışmada verilen bütün sonuçlar 2618046 eleman içeren ağ yapısı için verilmiştir.

Tablo 1. Ağdan bağımsızlık için elde edilen değerler.

	644436 eleman				1188596 eleman			
	A	B	C	D	A	B	C	D
P (N/m ²)	2.32E-2	2.01E-2	9.72E-3	-9.72E-4	2.33E-2	2.05E-2	9.77E-3	-1.19E-3
τ (N/m ²)	1.92E-10	8.11E-3	1.13E-3	2.54E-3	8.33E-11	9.10E-3	1.13E-3	2.82E-3
du/dy (1/s)	-1.41E-5	8.09E+1	6.10E+1	5.39E+1	-7.24E-7	9.40E+1	6.16E+1	5.93E+1
h (W/m ² K)	3.48	4.13E+1	3.76	5.05	3.49	4.23E+1	3.75	5.27
	1464575 eleman				2618046 eleman			
	A	B	C	D	A	B	C	D
P (N/m ²)	2.34E-2	2.07E-2	9.81E-3	-1.59E-3	2.34E-2	2.07E-2	9.81E-3	-1.59E-3
τ (N/m ²)	1.26E-10	1.10E-2	1.14E-3	3.46E-3	1.26E-10	1.10E-2	1.14E-3	3.46E-3
du/dy (1/s)	1.39E-6	1.19E+2	6.20E+1	6.81E+1	1.39E-6	1.19E+2	6.20E+1	6.81E+1
h (W/m ² K)	3.51	5.06E+1	3.74	6.45	3.51	5.06E+1	3.74	6.45

2.3. Doğrulama

Elde edilen akış karakteristikleri sonuçları Breuer ve diğ. (2000) yaptıkları çalışma ile karşılaştırılmıştır. Tablo 2’de bu çalışmada $Re=40$ için elde edilen boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) ve sürükleme katsayısı değerleri C_d ile Breuer ve diğ. (2000) elde ettikleri

sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 2’de verilen değerlere göre mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar kabul edilebilir düzeydedir.

Tablo 2. Boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) ve sürüklenme katsayısı (C_d) değerleri ile Breuer ve diğ. (2000) sonuçlarının karşılaştırılması.

$Re=40$	L_r/B	C_d
Breuer ve diğ. (2000)	2.151	1.708
Mevcut Çalışma	2.152	1.748

Isı transferi katsayıları için elde edilen sonuçlar Dhiman ve diğ. (2005)’de yaptığı çalışma ile karşılaştırılmıştır. $Re=40$ için elde edilen Nusselt sayısı (Nu) değerlerinin Dhiman ve diğ. (2005) elde ettikleri sonuçları ile karşılaştırılması Tablo 3’de gösterilmiştir. $\beta=1/8-1/6-1/4$ için elde edilen sonuçlara göre mevcut çalışma ile Dhiman ve diğ. (2005) yaptığı çalışma uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

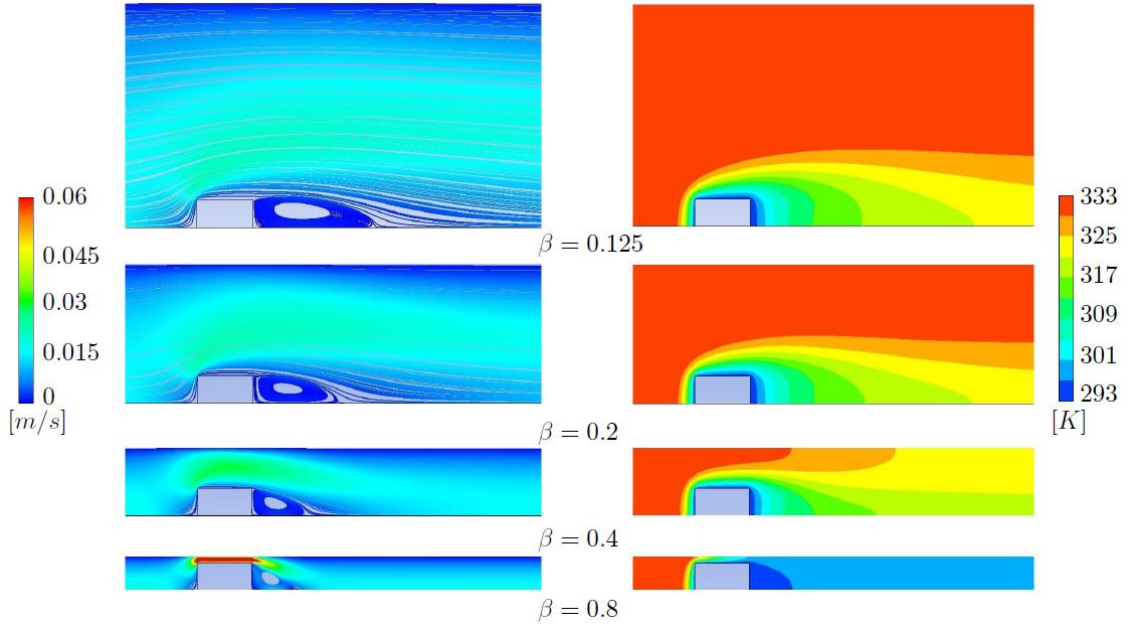
Bu çalışmada, sınırlandırılmış bir kanal içerisinde yer alan bir kare üzerinden iki boyutlu laminer akış için $Re=40$ sabit tutulmuş, blokaj oranı ise $\beta=0.125-0.8$ değerleri arasında değiştirilmiştir. Değişen blokaj oranının KS yüzeyleri üzerindeki sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme katsayısı (C_f), boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) üzerine olan etkileri incelenmiştir.

Tablo 3. Mevcut çalışmada elde edilen Nusselt sayısı değerleri ile Dhiman ve diğ. (2005) sonuçlarının karşılaştırılması.

	$Re=40$	Nu
$\beta=1/8$	Dhiman ve diğ. (2005)	2.76
	Mevcut Çalışma	2.79
$\beta=1/6$	Dhiman ve diğ. (2005)	2.81
	Mevcut Çalışma	2.85
$\beta=1/4$	Dhiman ve diğ. (2005)	2.87
	Mevcut Çalışma	3.02

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Akış alanı içerisindeki hız ve sıcaklık parametrelerinin değişimi KS üzerindeki ısı transferi ve akış karakteristiklerini etkilemektedir. Şekil 4’de $\beta=0.125-0.2-0.4-0.8$ blokaj oranı değerleri için akım çizgileri ve sıcaklık kontürleri gösterilmiştir. Akış x eksenine boyunca simetrik olduğundan, akış alanının yalnızca üst yarısı gösterilmiştir. Blokaj oranı arttıkça, KS ve kanar arasındaki kesit alanı daraldığından akışkanın hızı artmaktadır. Düşük blokaj oranı değerlerinde ise hız değerleri daha yavaş olduğundan KS arkasında daha büyük girdap oluşmaktadır. Sıcaklık kontürleri incelendiğinde ise blokaj oranı arttıkça artan hız değerlerinden dolayı KS üzerinde ve arkasında daha soğuk bir bölge oluşmaktadır.



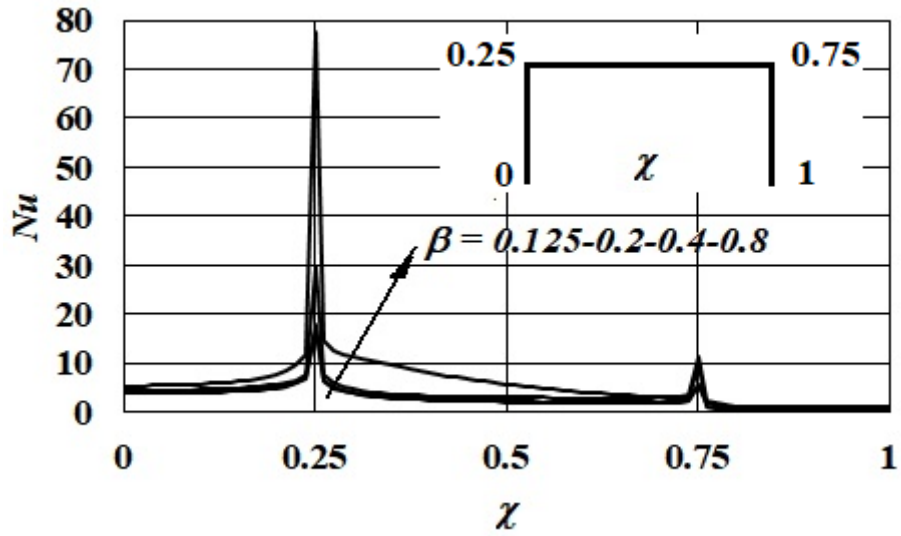
Şekil 4:

$\beta=0.125-0.2-0.4-0.8$ blokaj oranları için akım çizgileri ve sıcaklık kontürleri.

Şekil 5’de ise $\beta=0.125-0.2-0.4-0.8$ blokaj oranı değerleri için KS yüzeyindeki boyutsuz uzunluğa göre (χ), KS yüzeyi üzerindeki Nusselt sayısı (Nu) değerleri gösterilmiştir. En yüksek Nusselt sayısı (Nu) değerleri KS ön yüzeyinde elde edilirken, KS üst ve arka yüzeylerinde daha düşük Nusselt sayısı (Nu) değerleri elde edilmiştir. Blokaj oranı arttıkça Nusselt sayısı (Nu) değerleri artmıştır.

Çalışmada yer alan bütün blokaj oranı değerleri için ($\beta=0.125-0.8$) elde edilen sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme katsayısı (C_f), boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) değerleri Tablo 4’de verilmiştir. Tablo 4’den görüleceği üzere blokaj oranı değeri arttıkça KS yüzeyi üzerindeki sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme katsayısı (C_f) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) değerleri artmaktadır. Ancak artan blokaj oranı değeri ile boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) değeri azalmaktadır. Artan blokaj oranı değeri ile birlikte KS üst ve alt yüzeyleri ile kanal arasındaki alan giderek azalmakta ve sıkıştırılamaz akış koşullarındaki akışta KS üst ve alt yüzeyi üzerindeki hız değerleri giderek artmaktadır. Artan hız değerleri, KS yüzeyleri üzerine gelen sürüklenme kuvveti ve kayma gerilme değerlerini artırmaktadır. Artan blokaj oranı değeri, aynı zamanda KS üst ve alt yüzeyi üzerindeki akışı baskılamakta ve bu nedenle KS arkasında kalan girdap küçülmektedir. Küçülen girdap bölgesi ile birlikte akışın yeniden birleşme uzunluğu kısalmaktadır.

Elde edilen bu sonuçlar çerçevesinde değişen blokaj oranı değeri (β) ile sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme katsayısı (C_f), boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) değerlerinin değişimini veren bağıntılar çıkarılmıştır.



Şekil 5:

$\beta=0.125-0.2-0.4-0.8$ blokaj oranları için KS yüzeyindeki yerel Nu değerleri.

Tablo 4. Bütün blokaj oranı değerleri için elde edilen sonuçlar.

β	C_d	C_f	Nu	L_r/B
0.125	1.748	0.122	2.791	2.152
0.133333333	1.770	0.122	2.793	2.052
0.142857143	1.806	0.125	2.810	1.977
0.153846154	1.848	0.127	2.826	1.877
0.166666667	1.902	0.131	2.847	1.752
0.2	2.073	0.141	2.910	1.527
0.25	2.422	0.162	3.024	1.301
0.285714286	2.760	0.182	3.117	1.176
0.333333333	3.376	0.217	3.261	1.076
0.363636364	3.899	0.245	3.364	1.051
0.4	4.705	0.287	3.498	1.001
0.444444444	6.057	0.352	3.679	0.976
0.5	8.580	0.463	3.928	0.951
0.571428571	14.196	0.678	4.276	0.901
0.625	21.829	0.926	4.551	0.876
0.666666667	31.787	1.209	4.767	0.851
0.714285714	51.717	1.711	5.009	0.826
0.740740741	70.184	2.110	5.130	0.801
0.769230769	100.991	2.702	5.246	0.776
0.8	157.781	3.631	5.346	0.776

Yukarıda elde edilen bağıntılar Reynolds sayısının $Re=40$ değerinde sabit tutulduğu ve blokaj oranı değerlerinin $\beta=0.125-0.8$ arasında olduğu koşullar altında geçerlidir.

4. SONUÇLAR

Sınırlandırılmış bir kanal içerisinde sabit yüzey sıcaklığında tutulan kare silindir üzerinden iki boyutlu laminer akışın incelendiği bu çalışmada, blokaj etkisinin kare silindir üzerindeki ısı transferi ve akış karakteristikleri sayısal olarak incelenmiştir. Blokaj oranı $\beta=0.125-0.8$ değerleri arasında tutulurken Reynolds sayısı $Re=40$ değerinde sabit tutulmuştur. İncelenen bütün blokaj oranı değerleri ve elde edilen sonuçlar yardımıyla blokaj oranının (β), sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme katsayısı (C_f), boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) ile değişimini veren ifadeler elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar yardımıyla kare silindir üzerine etki eden sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme katsayısı (C_f), boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) değerleri elde edilmiştir. Blokaj oranının artması, sürüklenme katsayısı (C_d), sürtünme katsayısı (C_f) ve ortalama Nusselt sayısı (Nu) değerlerinin artmasına neden olmuştur. Artan blokaj oranı değerleri ile birlikte boyutsuz yeniden birleşme uzunluğu (L_r/B) değerleri azalmıştır. Kare silindirin içerisinde yer aldığı kanalın daraltılması daha yüksek hız değerlerinin elde edilmesine kare silindir yüzeyine etki eden kuvvetler ile ısı transferini artırmaktadır.

Uygulamada birçok kullanım alanı olan kare silindir üzerinden akışta, ısı transferini artırmanın bir yolu olarak kare silindirin bulunduğu kanalı daraltmak bir çözüm olabilir. Yapılan bu çalışma farklı Reynolds sayıları ve akışkanlar için geliştirilip, daha geniş bir hale getirilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın KUAP-MH(2014)/15 sayılı proje ile gerçekleşmesini sağlayan Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

1. Berrone, S., V. Garbero, and M. Marro. 2011. "Numerical Simulation of Low-Reynolds Number Flows Past Rectangular Cylinders Based on Adaptive Finite Element and Finite Volume Methods." *Computers and Fluids* 40 (1): 92–112. doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.08.014.
2. Bhattacharyya, S., and S. Dhinakaran. 2008. "Vortex Shedding in Shear Flow Past Tandem Square Cylinders in the Vicinity of a Plane Wall." *Journal of Fluids and Structures* 24 (3): 400–417. doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.09.002.
3. Bouaziz, Mohamed, Sameh Kessentini, and Saïd Turki. 2010. "Numerical Prediction of Flow and Heat Transfer of Power-Law Fluids in a Plane Channel with a Built-in Heated Square Cylinder." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (23–24): 5420–29. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.014.
4. Breuer, M., J. Bernsdorf, T. Zeiser, and F. Durst. 2000. "Accurate Computations of the Laminar Flow Past a Square Cylinder Based on Two Different Methods: Lattice-Boltzmann and Finite-Volume." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21 (2): 186–96. doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00081-8.
5. Chatterjee, Dipankar, and Bittagopal Mondal. 2011. "Effect of Thermal Buoyancy on Vortex Shedding behind a Square Cylinder in Cross Flow at Low Reynolds Numbers." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (25–26): 5262–74. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.016.
6. Cheng, M., D. S. Whyte, and J. Lou. 2007. "Numerical Simulation of Flow around a Square Cylinder in Uniform-Shear Flow." *Journal of Fluids and Structures* 23 (2): 207–26. doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.08.011.

7. Dhiman, A. K., R. P. Chhabra, and V. Eswaran. 2005. "Flow and Heat Transfer across a Confined Square Cylinder in the Steady Flow Regime: Effect of Peclet Number." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (21–22): 4598–4614. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.033.
8. Dhiman, A. K., R. P. Chhabra, and V. Eswaran. 2008. "Steady Flow across a Confined Square Cylinder: Effects of Power-Law Index and Blockage Ratio." *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 148 (1–3): 141–50. doi.org/10.1016/j.jnnfm.2007.04.010
9. Dhiman, Amit Kumar. 2009. "Heat Transfer to Power-Law Dilatant Fluids in a Channel with a Built-in Square Cylinder." *International Journal of Thermal Sciences* 48 (8): 1552–63. doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.12.013.
10. Kim, Do Hyeong, Kyung Soo Yang, and Mamoru Senda. 2004. "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Past a Square Cylinder Confined in a Channel." *Computers and Fluids* 33 (1): 81–96. doi.org/10.1016/S0045-7930(03)00040-9.
11. Mahir, Necati. 2009. "Three-Dimensional Flow around a Square Cylinder near a Wall." *Ocean Engineering* 36 (5): 357–67. doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.01.002.
12. Malekzadeh, S., and A. Sohankar. 2012. "Reduction of Fluid Forces and Heat Transfer on a Square Cylinder in a Laminar Flow Regime Using a Control Plate." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 34: 15–27. doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.12.008.
13. Ozgoren, Muammer. 2006. "Flow Structure in the Downstream of Square and Circular Cylinders." *Flow Measurement and Instrumentation* 17 (4): 225–35. doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.11.005.
14. Paliwal, B., Atul Sharma, R. P. Chhabra, and V. Eswaran. 2003. "Power Law Fluid Flow Past a Square Cylinder: Momentum and Heat Transfer Characteristics." *Chemical Engineering Science* 58 (23–24): 5315–29. doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.010.
15. Sharma, Atul, and V. Eswaran. 2004. "Heat and Fluid Flow across a Square Cylinder in the Two-Dimensional Laminar Flow Regime." *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications* 45 (3): 247–69. doi.org/10.1080/10407780490278562.
16. Sheard, Gregory J. 2011. "Wake Stability Features behind a Square Cylinder: Focus on Small Incidence Angles." *Journal of Fluids and Structures* 27 (5–6): 734–42. doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.02.005.
17. Song, Chi Su, and Seung O. Park. 2009. "Numerical Simulation of Flow Past a Square Cylinder Using Partially-Averaged Navier-Stokes Model." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97 (1): 37–47. doi.org/10.1016/j.jweia.2008.11.004.
18. Turki, Said, Hassen Abbassi, and Sassi Ben Nasrallah. 2003. "Two-Dimensional Laminar Fluid Flow and Heat Transfer in a Channel with a Built-in Heated Square Cylinder." *International Journal of Thermal Sciences* 42 (12): 1105–13. doi.org/10.1016/S1290-0729(03)00091-7.