



## Kare Silindir Etrafında Akış ve Tümlleşik Taşınım ile Isı Geçişi

### *Flow and Mixed Convection with Heat Transfer Around a Square Cylinder*

Zerrin Sert

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye.

#### Öz

Engelleyici yüzdürme kuvvetinin laminer rejim şartlarında akış ve ısı transferi özelliği üzerindeki etkisi, dikey kanaldaki bir kare silindir boyunca sayısal olarak incelenmiştir. Engelleyici akış, akış hareketleri ile doğal taşınımından kaynaklanan yüzdürme kuvvetlerinin zıt yönlü olması anlamına gelmektedir. Çalışma ortamı akışkanı olarak hava ( $Pr=0.7$ ) ve su ( $Pr=7$ ) seçilmiştir. Akış ve ısı transferi analizleri Reynolds ( $Re = 100, 150$  ve  $200$ ) ve Richardson sayıları ( $-0.5 \leq Ri \leq 0$ ) değiştirilerek elde edilmiştir. Sayısal çalışmanın çözümü Ansys/Fluent ticari yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Yüzdürme kuvvetleri etkilerini incelemek için Boussinesq yaklaşımının kullanıldığı Navier-Stokes denklemleri çözdürülmüştür. Geçici rejimde tümlleşik taşınımında ısı ve akış karakteristiklerini incelemek için Nusselt sayısı, Strouhal sayısı, sürüklenme ve kaldırma katsayısı her bir durum için elde edilmiştir. Ayrıca eş sıcaklık eğrileri her bir simülasyon için çizdirilmiştir. Richardson sayısının azalması ile Strouhal sayısı, ortalama sürüklenme katsayısı ve ortalama Nusselt sayısının azaldığı, ortalama kaldırma kuvveti katsayısının arttığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kare silindir, Engelleyici yüzdürme kuvveti, Tümlleşik taşınım

#### Abstract

The influence of opposing buoyancy on the laminar flow field and heat transfer characteristic is investigated across a square cylinder in a vertical channel numerically. "Opposing flow" means that the buoyancy flow and fluid motions are in opposite directions. The working fluids are air ( $Pr = 0.7$ ) and water ( $Pr = 7$ ). The flow and heat transfer simulations were changed with Reynolds number (100 and 200) and under various Richardson numbers (from 0 to 0.5). The numerical analysis was carried out by Ansys-Fluent software. The effect of buoyancy was incorporated into the Navier-Stokes equations using the Boussinesq approximation. Unsteady mixed convection heat transfer and fluid flow characteristics such as Nusselt number, Strouhal number, the drag and lift coefficient were obtained for each case. Also, the isotherms were depicted for each simulation. It was observed that the Strouhal number, the mean drag coefficient and Nusselt number decreased with the decrease of the Richardson number; but,  $C_{L,rms}$  increased.

**Keywords:** Square cylinder, Opposing buoyancy, Mixed convection

#### 1. Giriş

Serbest akıştaki silindirler arkasında oluşan girdaplar, silindir şekli ve akış rejimi özelliklerine bağlı olarak değişir. Akışın silindir üzerinde ve arkasında bıraktığı etkinin kontrol edilmesini gerektiren mühendislik uygulamaları mevcuttur. Bunlar özellikle birbirine yakın olarak yerleştirilen silindir gruplarında; ısı değiştiricileri, fabrika bacaları, soğutma kuleleri, denizlere ve okyanuslara yerleştirilen boru hatları, gelgit olayları ve dalgaları kullanarak güç üreten ekipmanların tasarımı, denizlerde inşa edilecek yapılar ve nükleer reaktör gibi uygulamalarda rastlamak mümkündür. Tek silindirli ve/

veya birden fazla silindir grupları arkasındaki akışlar birçok araştırmacı tarafından hem deneysel hem de sayısal olarak ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Dış akışa maruz kalan silindirler etrafındaki akış ve ısı problemleri analitik olarak çözülemeyecek kadar karmaşıktır. Önceleri deney verilerine dayanan çözümler; yüksek kapasiteli bilgisayarların gelişmesiyle birlikte, pahalı ve zaman alıcı deneylerin yerini sayısal çözümler almaya başlamıştır. Yalın zorlanmış taşınım durumunda bir dairesel silindir etrafındaki dış akış probleminde yapılan ilk nümerik çalışma Churchill ve Bernstein (1977) tarafından yapılmış ve bu çalışma literatürdeki pek çok problem ile kıyaslanmıştır. Çalışmada dairesel silindir üzerinden çapraz akıştaki farklı akışkanların (hem gaz hem de sıvılar için) zorlanmış taşınım ile ısı transferini araştırmışlardır. Çalışmaların sonucunda

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: [zbocu@ogu.edu.tr](mailto:zbocu@ogu.edu.tr)

dairese silindir için geniş aralıktaki Prandtl sayısında bir korelasyon üretmişlerdir. Bu çalışmalarda engel sadece dairese silindir geometrilı olmayıp tek kare silindir (Sharma ve Eswaran 2004a, 2004b), tek üçgen silindir geometrisinde (Zeitoun vd. 2011) veya farklı geometrik şekilli silindirler (Zhang vd. 2020, Zhu vd. 2020) içerecek şekilde de olmaktadır.

Şimdiye kadar literatürden anlatılan bu çalışmalarda yalın zorlanmış taşınım durumları ele alınmıştır. Halbuki silindir ve silindirin maruz kaldığı akışkan arasında sıcaklık farklılıkları varsa tümleşik (doğal+zorlanmış) taşınım şartları altında çalışılması gereklidir. Literatürde tümleşik taşınım çalışmaları; engelin akışa yatay ve dikey maruz kalma durumuna ve kanal cidarlarının sınırlı olması ve sınırlı olmaması durumuna göre sınıflandırıldığı görülmektedir. Ayrıca tümleşik taşınım da doğal taşınımın zorlanmış taşınımı desteklediği ve engellediği durumlar mevcuttur. Literatür incelendiğinde destekleyici tümleşik taşınım Richardson sayısı (Ri) sıfırdan büyük, engelleyici tümleşik taşınım Ri sayısının sıfırdan küçük olarak verildiği görülmüştür.

Dairesel veya kare silindiri dikey kanallarda tümleşik taşınım çalışmaları sayısal olarak analiz edilmiştir (Singh vd. 1998, Jassim 2010, Moulai vd. 2016, Salcedo vd. 2016a, Salcedo vd. 2016b). Duvar cidarları ile sınırlandırılmış akışlarda silindirin kanal genişliğine oranı (blokaj oranı) akış ve ısı geçişinde etken bir parametre olduğu için çalışmalarda bu oranın akış ve ısı geçişine etkisinin incelendiği görülmüştür. Örneğin bu çalışmalardan; Gandikota vd. (2010) çalışmalarında dikey kanala yerleştirilen bir adet dairese silindirin çapı  $D$  olup,  $-0.5 \leq Ri \leq 0.5$ ,  $50 \leq Re \leq 150$  değer aralığında tümleşik taşınımındaki akış ve ısı transferi karakteristiğini incelemişlerdir. Çalışmadaki dikey kenarların sınır şartı duvar olup, çalışmadaki kanal genişliğini  $4D$  olarak kanal cidar yakınlığının akış ve ısı transferi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Dhiman vd. (2014) yukarı yönlü hava akışlı dikey kanalda bulunan bir kare silindir etrafındaki yüzdürme kuvvetlerinin etkisini araştırmışlardır. Parametrik çalışmalarında değişkenler;  $Re$  (1-40),  $Ri$  (0-1) ve blokaj oranı (%25-%50) olarak alınmıştır. Toplam sürüklenme katsayısı  $Re$  sayısı ile azalırken,  $Ri$  sayısı ve duvar blokaj oranı ile artmıştır. Dikey bir adyabatik duvarları izole edilmiş dikey bir kanaldaki eliptik ve dairese şekilli bir izotermal silindirden Bingham plastik sıvılarında zorlanmış taşınım yardımcı-yüzdürme kuvvetli tümleşik taşınım ile ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir (Patel ve Chhabra 2016). Çalışmalarında Bingham sayısı  $0 \leq Bn \leq 100$ , Reynolds sayısı  $1 \leq$

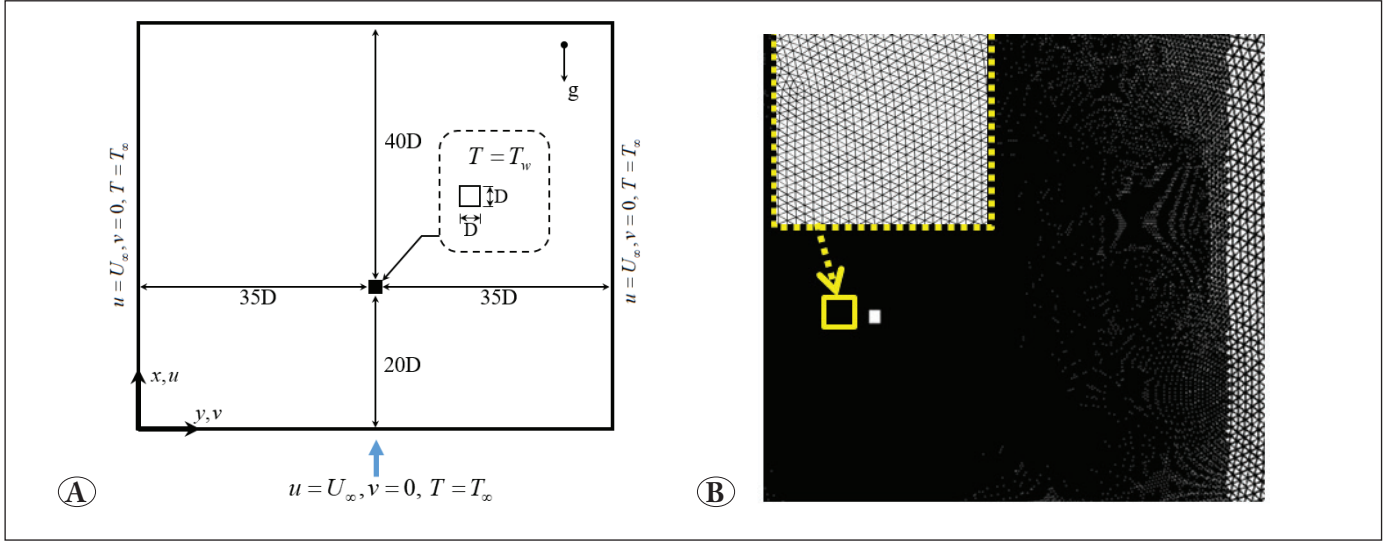
$Re \leq 40$ , Prandtl sayısı  $1 \leq Pr \leq 100$  ve Richardson sayısı 1 ve 10 olarak alınmıştır. Çalışmalarının sonucunda boyutsuz parametrelerin tanımlamalarını kullanarak, ortalama Nusselt sayısının değerini tahmin etmek için yeni korelasyonlar oluşturulmuştur. Dikey kanallarda engel içeren tümleşik taşınım çalışmaları deneysel olarak da incelenmiştir (Singh 2007, Guillen vd. 2014, Salcedo 2017).

Serbest akış alanı içerisindeki (dış akış problemlerinde) farklı geometrilı izotermal silindirler içeren tümleşik taşınım çalışmaları literatürde rastlamak mümkündür. Sharma ve Eswaran (2004b)  $Re=100$ ,  $Pr=0.7$  ve  $-1 \leq Ri \leq 1$  için bir kare silindir etrafında tümleşik taşınımın ısı ve akış karakteristikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ahmad vd. (2009) viskozitenin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılan bir izotermal dairese silindir etrafında laminer tümleşik taşınımı farklı Prandtl sayılarında araştırmışlardır. Sharma vd. (2012)  $Pr=0.7$  için bir kare silindir etrafında tümleşik taşınımın iki boyutlu sayısal analizini yapmışlardır. Ayrıca Zhang ve Samtaney (2016),  $Re=100$  ve  $0 \leq Ri \leq 0.1$  için bir dairese silindir etrafında geçici rejimde iki boyutlu tümleşik taşınım çalışmışlardır. Bu çalışmalara ek olarak; Altaç vd. (2019)  $10 \leq Re \leq 200$ ,  $0 \leq Ri \leq 10$  ve  $Pr=0.7$  ve 7 için izotermal bir üçgen silindir etrafında tümleşik taşınım modelleri ve çalışmaların sonucunda hem yalın zorlanmış ve doğal taşınım hem de tümleşik taşınım için korelasyon türetip literatüre katkı sağlamışlardır.

Literatüre bakıldığında serbest akış alanı içerisinde zorlanmış taşınım engelleyici doğal taşınım çalışmaları kısıtlıdır. Bu çalışma ile literatürdeki bu boşluk doldurulmak istenmektedir. Ayrıca hiçbir çalışmada Reynolds ve Prandtl sayıları bu çalışmadaki kadar kapsamlı ele alınmamıştır. Çalışmada, hava ( $Pr = 0.7$ ) ve su ( $Pr = 7$ ) için sayısal simülasyonlar 100 ile 200 arasında değişen Reynolds ve 0 ile -0.5 arasındaki Richardson sayısı için gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler sonucunda eş sıcaklık çizdirilmiştir. Ayrıca kare silindir üzerindeki direnç ve kaldırma kuvvetleri ile ortalama Nusselt sayısı değişimi incelenmiştir.

## 2. Problemin Tanımı ve Matematik Model

Serbest akış alanı içindeki izotermal kare silindir etrafındaki akış ve tümleşik (doğal+zorlanmış) taşınım sayısal olarak incelenmiştir. Kare silindir girişten  $20D$  uzaklıkta olup, aşağı akış bölgesindeki akışın doğru izlenebilmesi için silindir arkası mesafe  $40D$  olarak alınmıştır. Sistem geometrisi ve akış alanına uygulanan ağ yapısı Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1b'de sarı nokta ile belirtilen bölgede detaylı ağ yapısı çizdirilmiştir. Simülasyon hem hava ( $Pr=0.7$ ) hem de su ( $Pr=7$ ) için yapılmıştır.



**Şekil 1. A)** Ele alınan sistem geometrisi ve koordinat sistemi, **B)** akış alanı ağ yapısının yakından ve detaylı görünüşü.

İki boyutlu sıkıştırılamaz akış için geçici rejimde boyutsuz süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

Süreklilik denklemi:

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

x-momentum denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g\beta(T - T_0) \quad (2)$$

y-momentum denklemi:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (3)$$

Enerji denklemi:

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

Burada  $u$  ve  $v$   $x$  ve  $y$  koordinat sistemindeki hız bileşenleri,  $t$  zaman,  $\rho$  yoğunluk,  $\nu$  kinematik viskozite,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $\beta$  ısıl genleşme katsayısı,  $T$  sıcaklık,  $P$  basınç,  $\alpha$  ısı genleşme katsayısıdır. Akış alanı içerisindeki doğal taşınım, düşük sıcaklık farkları neticesinde yoğunluk gradyanı oluşumu esasına dayanmaktadır. Bu nedenle momentum denklemlerinde, kanal yüksekliğine paralel olan  $x$  doğrultusunda Boussinesq kabulü yapılmıştır (Avcıoğlu 2012). Hesaplamalarda uygulanan sınır şartlar:

Giriş:  $u = U_\infty, v = 0, T = T_\infty$

Sağ ve sol yüzeyler:  $u = U_\infty, v = 0, T = T_\infty$

$$\text{Çıkış: } \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

Silindir duvarları:  $u = 0, v = 0, T = T_w$

Sınır şartlardaki  $U_\infty$  ve  $T_\infty$  sırasıyla akışkan giriş hızı ve sıcaklığı,  $T_w$  ise silindir duvar sıcaklığını temsil etmektedir.

Bu parametrik çalışmada akış ve ısı transferi karakteristiklerinin hesaplanması için bazı boyutsuz parametrelerin değişimleri göz önüne alınmıştır. Bu boyutsuz sayılar ise Reynolds, Richardson, Rayleigh, Grashof ve Prandtl sayılarıdır. Bu boyutsuz sayılar sırasıyla,

$$\begin{aligned} Re &= U_\infty D / \nu, Ri = Gr / Re^2, Ra = g\beta(T_w - T_\infty) D^3 / \nu \alpha, \\ Gr &= Ra / Pr, Pr = \nu / \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

ile tanımlanır (Incropera vd. 2015). Çalışmada kare silindir bir kenarına göre tanımlanmış olan Reynolds sayısının 100, 150, 200 değerlerinde, Richardson sayısı 0 ile -0.5 değerleri arasında değiştirilmek suretiyle gerçekleştirilmiştir.

Kare silindir için kaldırma ve sürüklenme katsayısı sırasıyla,

$$C_L = \frac{2F_y}{\rho U_\infty^2 A}, C_D = \frac{2F_x}{\rho U_\infty^2 A} \quad (6)$$

ile hesaplanır. Burada  $F_y$  ve  $F_x$  sırasıyla  $x$  ve  $y$  yönündeki kuvvet bileşenleridir,  $A$  iz düşüm alanıdır.

Kare silindir üzerinden alan ortalamalı olarak hesaplanmış Nusselt sayısı,

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} Nu_{D,s} dA_s \quad (7)$$

ile hesaplanır. Burada  $h$  ortalama ısı taşınım katsayısı,

**Çizelge 1.** İki farklı ağ yapısından elde edilen sayısal simülasyonların literatürde sunulan sonuçlar ile karşılaştırılması.

	Nu	C <sub>D</sub>	C <sub>L</sub> (rms)	St
Ağ - 1	4.123	1.489	0.206	0.145
Ağ - 2	3.977	1.442	0.175	0.147
Okajima (1982) - deneysel		1.593		0.142
Sharma ve Eswaran (2004)	4.010		0.192	0.152
Sen vd. (2011)		1.529	0.191	0.149
Mahir ve Altaç (2019)	4.020	1.433	0.176	0.152

**Çizelge 2.** Ağ 2 ile Re=100 ve Pr=0.7 için zaman adımının ortalama Nusselt sayısı üzerine etkisi.

	Δt			
	0.01	0.05	0.1	0.2
Nu	3.9827	3.9765	3.9266	3.8674

D karakteristik uzunluktur yani kare silindirin bir kenar uzunluğu, A<sub>s</sub> ise ısıtılan kare silindir yüzeyinin alanıdır.

### 3. Nümerik Çözüm Detayları

Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri FLUENT® yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Taşınım terimlerinin ayrıklaştırılmasında ikinci mertebeden şema, çözüm algoritması olarak SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Korunum denklemlerinin her biri için yakınsama kriteri 10<sup>-5</sup> seçilmiştir.

Çözümün ağdan bağımsızlığını test etmek için 2 farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısı oluşturmak için Gambit® programından yararlanılmıştır. Size function komutu kullanılarak başlangıç ağı (start size) 0.01 ve büyüme oranı (Growth rate) 1.05 seçilmiştir. Daha sonra Fluent programında bölgesel adaptasyon (x eksen:0-60D; y eksen:10-60D) uygulanmıştır. Bu işlem bir kez yapıldığında Ağ 1, ikinci kez yapıldığında ise Ağ 2 yapısı oluşmuştur. İki ağ yapısı da üçgen elemanlardan oluşturulmuştur. Ağ 1'de 29,749 düğüm sayısı (58,938 hücre sayı), Ağ 2'de ise 141,496 düğüm sayısı (281,986 hücre sayı) bulunmaktadır. Ağ 2'de özellikle aşağı akış bölgesi ve silindir etrafında ağ yapısını sıklaştırmak için bölgesel adaptasyon işlemi yapılmıştır. Şekil 1b'de akış alanına uygulanan ağ yapısı gösterilmiştir. Çizelge 1'de iki farklı ağ yapısından elde edilen sayısal simülasyonların literatürde sunulan sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. Ağ 2'nin literatürde verilen değerlerinde ortalama Nusselt sayısı, C<sub>D</sub> ve C<sub>L,rms</sub> katsayıları ve St sayısındaki maksimum yüzde bağıl hataları sırasıyla %1, %9.5, %9 ve %6.5 şeklindedir. Ağ 2 ile hesaplanan

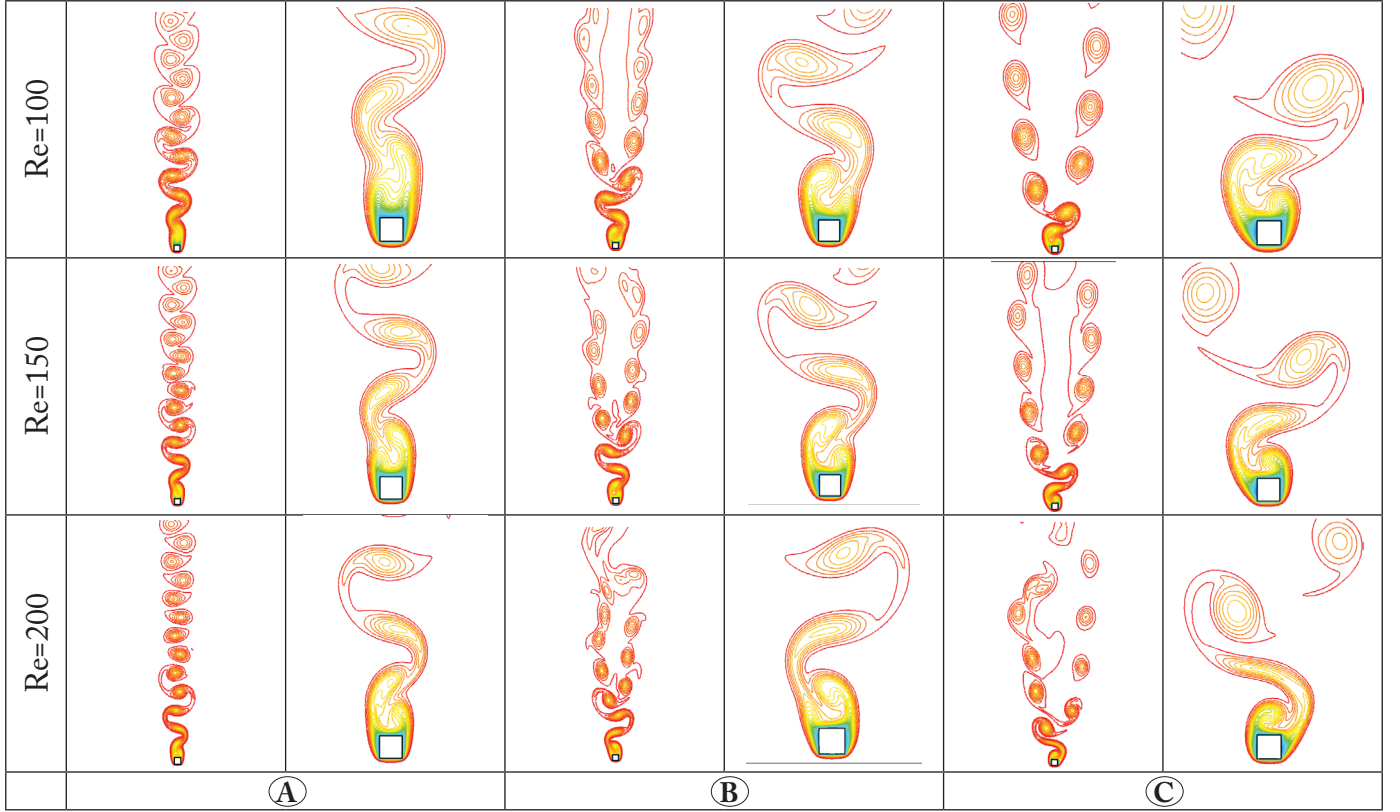
değerlerin literatür ile uyumlu olduğuna karar verilip, diğer tüm çözümler bu ağ yapısı ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2'de zaman adımının çözüm üzerinde etkisi, Ağ yapısı 2, Re=100 ve Pr=0.7 için gösterilmektedir. Zaman adımının 0.05 ve 0.01'e alınması durumunda ortalama Nusselt sayısında yaklaşık %0.16'lık bir değişim göstermiştir. Δt = 0.05 zaman adımı simülasyonun cpu ekonomisi açısından anlamlı ve doğru sonuçlar elde etmeye yeterli olduğu bu şekilde belirlenmiştir.

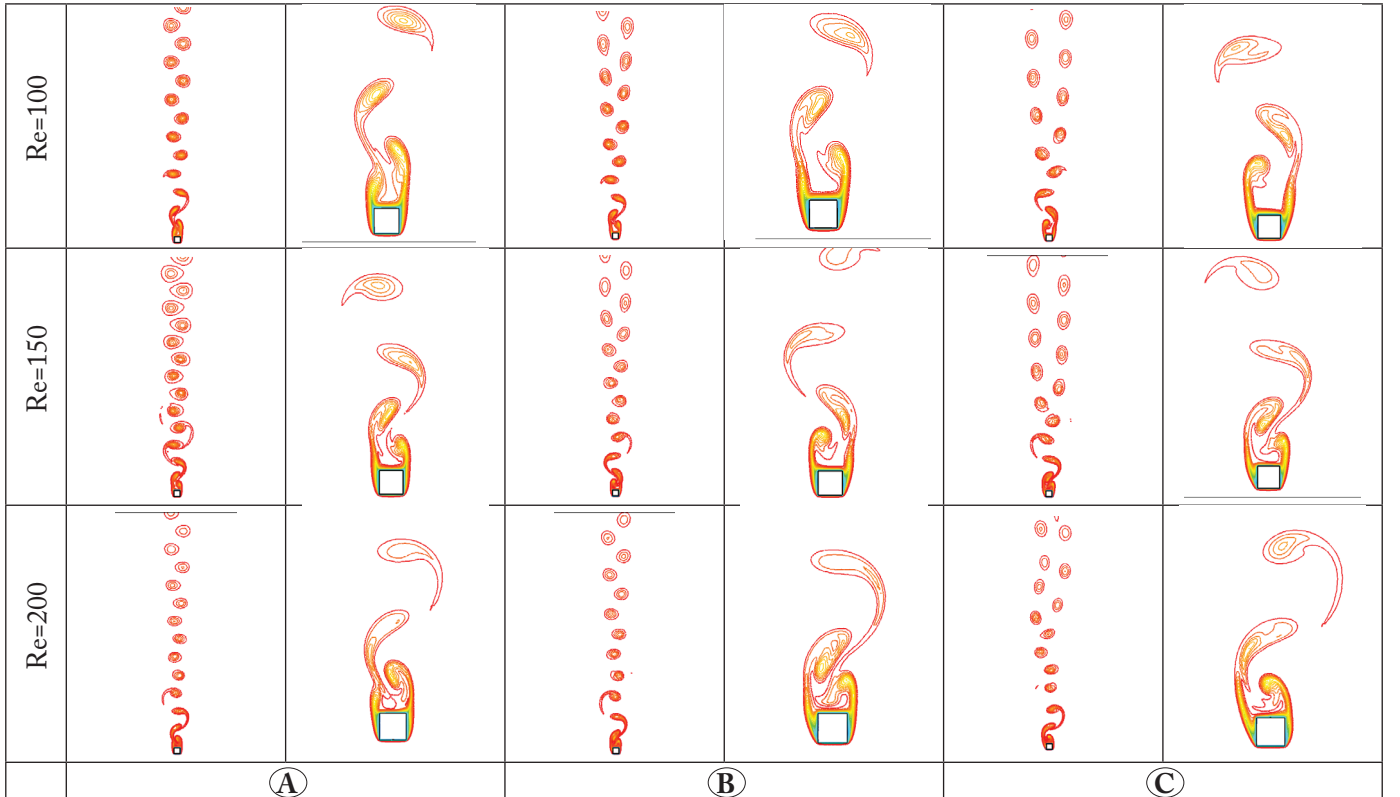
### 4. Bulgular

Pr=0.7 için kare silindir arkası akış bölgesindeki eş sıcaklık eğrilerinin Reynolds ve Richardson sayıları ile değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Silindir etrafındaki girdap atma sürecinin daha iyi görülebilmesi için eş sıcaklık eğrileri ve eş zamanlı girdap eğrilerinin yakından görüntüleri verilmiştir. Yakından verilen eş sıcaklık eğrilerinde kopma yerlerinin belirgin görülebilmesi için eğrilerin çizgileri seyrekleştirilmiştir. Eş sıcaklık ve girdap eğrileri benzer olduğu gözlenmiştir. Üç Reynolds sayısında da kare silindirin iz bölgesinde periyodik vorteksler meydana gelmektedir. Ri=0'da tek bir vorteks sırası gözlenirken, doğal taşınımın aktif olduğu Ri=-0.25 ve -0.5 değerlerinde iki vorteks sırasının oluştuğu tespit edilmiştir. Reynolds sayısı artıkça iki sıralı vortekslerin iz bölgesinde silindirlere daha yakın mesafede oluştuğu görülmektedir. Örneğin; Ri=-0.5'deki Re=100'de yaklaşık 12D oluşan çevrintideki bölünme, Re=200'de 8D civarında oluşmaktadır. Ayrıca aynı Reynolds sayılarında, Ri sayılarının artması ile iz bölgesinin genişliğini de arttırdığı görülmektedir.

Pr=7 için kare silindir arkası akış bölgesindeki eş sıcaklık eğrilerinin Reynolds sayıları ile değişimi Şekil 3'de verilmiştir. Ri=0'da kare silindir arka iz bölgesinde oluşan girdapların da Pr=0.7'ye benzer şekilde tek sıra oluşturdukları görülmektedir. Ri=-0.25 ve -0.5'de iz bölgesinde oluşan girdaplar aşağı akış bölgesinde iki sıra oluştururlar. Bu Ri sayılarında silindirin arkasındaki iz bölgesi Pr=0.7'deki kadar geniş değildir. Soğuyan akışkanın yoğunluğu artar ve



Şekil 2. Pr=0.7 ve A) Ri=0, B) Ri=-0.25 C) Ri=-0.5 için sıcaklık (solda) ve girdap (sağda) eğrileri.



Şekil 3. Pr=7 ve A) Ri=0, B) Ri=-0.25 C) Ri=-0.5 için sıcaklık (solda) ve girdap (sağda) eğrileri.

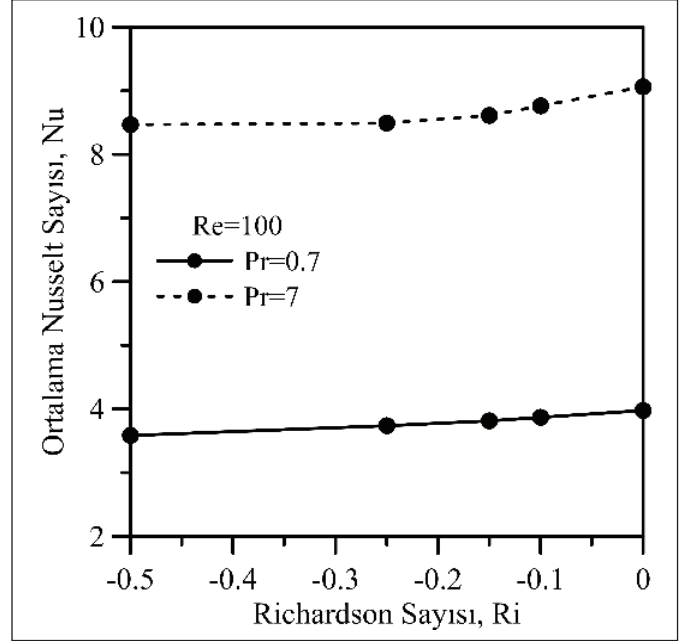
aşağı doğru hareket etmek ister. Bu durumda akışa zıt yönlü doğal taşınım etkileri meydana gelir. Özellikle  $Ri$  sayısının mutlak değeri arttığında engelleyici doğal taşınım etkileri arttığından, silindir duvarı sınır katmanı üzerindeki girdap atma sürecini yavaşlatır ve dökülme sürecini engeller.

$Re=150$  için  $Ri$  ve  $Pr$  sayılarına göre Strouhal sayıları Şekil 4'te verilmiştir. Salınlı akışta akış mekanizmasını belirleyen boyutsuz Strouhal sayısı ( $St$ )  $fD/U_\infty$  ile tanımlanır (Şentürk 2018). Burada  $f$  çevrinti oluşumunun frekansı ( $f'$ )'dir. Yalın zorlanmış taşınım şartlarında ( $Ri=0$ ) ve  $Re=100, 150$  ve  $200$  için elde edilen Strouhal sayılarının Prandtl sayısının  $0.7$  ve  $7$  değerlerinde bir birine çok yakın olduğu görülmüştür.  $Ri$  sayısının mutlak değeri arttığında engelleyici doğal taşınım etkileri arttığından, silindir duvarı sınır katmanı üzerindeki girdap atma sürecini yavaşlatır ve dökülme sürecini engeller. Bu yüzden engelleyici akıştaki  $Ri$  sayısının mutlak değerinin artması Strouhal sayısının düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca havanın ısı yayılma değeri suya göre daha yüksek olması nedeniyle Strouhal sayısı daha düşük çıkmıştır.

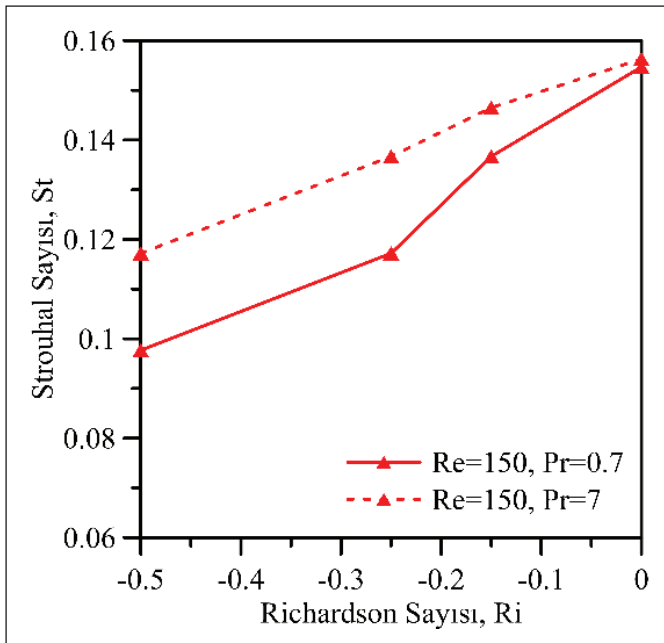
Hava ve su için kare silindir üzerindeki ortalama Nusselt sayısının  $Re=100$ 'de  $Ri$  sayısı ile değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir.  $Ri$  sayısının azalması ile ortalama Nusselt sayısı her iki Prandtl sayısında da azalma göstermektedir. Doğal taşınım zorlanmış taşınımı engelleyici durumda olduğu için bu zaten beklenen bir durumdur. Her iki Prandtl sayısındaki azalma eğilimi benzerdir.  $Pr=0.7$ 'de,  $Ri=0$ 'daki

ortalama Nusselt sayısı ile  $Ri=-0.5$ 'teki ortalama Nusselt sayısı arasındaki mutlak fark yaklaşık %35'tir. Suyun ortalama Nusselt sayısı havaya göre daha fazla çıkmıştır.

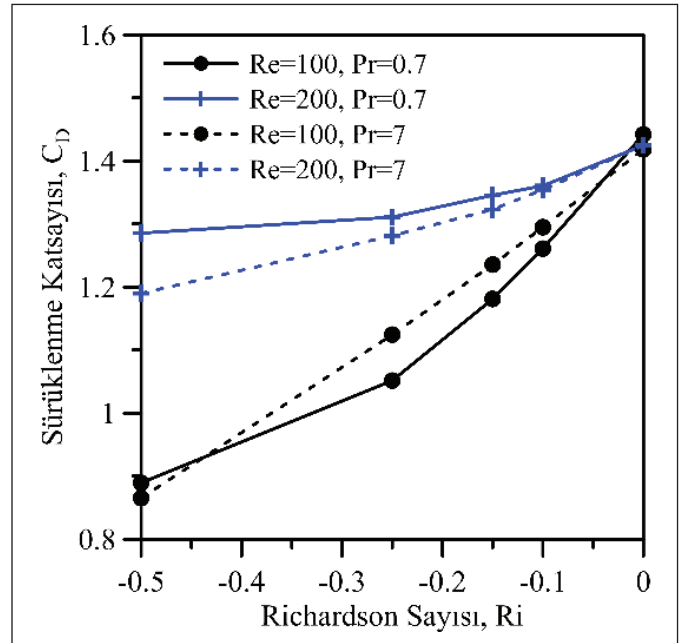
Şekil 6'da  $Pr=0.7$  ve  $7$  için Richardson ve Reynolds sayıları ile ortalama sürüklenme ( $C_D$ ) katsayısının değişimi gösterilmektedir.  $Ri=0$  olması durumunda  $Pr=0.7$  ve  $7$  için



Şekil 5. Kare silindir üzerindeki Nu sayılarının  $Re=100$ 'de  $Pr$  ve  $Ri$  sayılarına göre değişimi.



Şekil 4.  $Re=150$ 'de Strouhal sayısının Richardson ve Prandtl sayılarıyla değişimi.



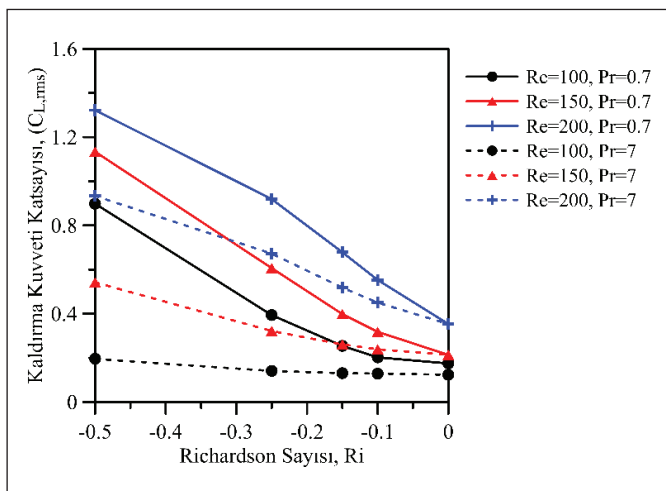
Şekil 6. Kare silindir üzerindeki sürüklenme katsayısının  $Re$  ve  $Ri$  sayılarına göre değişimi.

$C_D$  sayıları bütün Re sayıları için bir birlerine çok yakındır. Ri sayısının mutlak değer olarak artması durumunda bütün incelenen Re sayılarında ortalama sürüklenme katsayısının azaldığı görülmektedir. Akış yönüne ters yönde etki eden doğal taşınım, silindirin ön yüzeyi ve arka yüzeyi arasındaki basınç farkının azalmasına ve dolayısıyla sürünme kuvvet katsayısının azalmasına yol açmaktadır. Re =100 ve Richardson sayısının 0 ve -0.4 arasındaki değerlerinde Pr = 7 olması durumunda sürüklenme katsayılarının Pr=0.7 ye göre daha büyük değerlerdedir. Re=200 olması durumunda ise bunun tersi olduğu, Pr=0.7 için Ri sayılarının daha büyük değerler aldığı görülmektedir.

Kare silindir üzerindeki ortalama kaldırma kuvvetinin ortalama kare kök değerlerinin Ri sayısı ile değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Kaldırma kuvveti katsayılarının rms (kare ortalama kök) değerleri, geçici rejimde silindirde üzerindeki kaldırma kuvvetinin genliğinin bir ölçüsünü verir. Girdap oluşmadığından,  $C_L$ 'nin değerleri pratik olarak sıfırdır. Ri değeri azaldıkça  $C_{L,rms}$  değerleri artmış ve Pr = 0.7'nin  $C_{L,rms}$  değerleri Pr=7'ye göre daha büyük çıkmıştır. Şekil 2 ve 3 de görüldüğü gibi Pr= 0.7 olması durumunda silindirin arkasındaki iz bölgesi daha geniştir. Burada oluşan vorteksler silindir üzerindeki kaldırma kuvvetinde daha büyük salınımlara neden olmaktadır.

## 5. Tartışma

Bu çalışmada, Pr=0.7 ve Pr=7 akışkanların izotermal kare silindirden tümlleşik taşınım ile akışı ve ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizde Re=100-200 ve Ri=-0.5-0 aralığında değiştirilmiştir. Bu sayısal çalışmada eş



Şekil 7. Kare silindir üzerindeki kaldırma kuvveti kare ortalama kök değerlerinin Re ve Ri sayılarına göre değişimi.

sıcaklık eğrileri, ortalama Nusselt ve Strouhal sayısı, kaldırma ve sürüklenme katsayıları analiz sonuçlarında elde edilmiştir. Çizelge 1'de verilen çözümlerinde Re=100, Pr=0.7, Ri=0 parametreleri için analiz yapılmıştır. Çizelge 1'de görüldüğü gibi Nu,  $C_D$ ,  $C_L$  (rms) ve St değerleri literatürdeki (Sharma ve Eswaran 2004a, Sen vd. 2011, Mahir ve Altaç 2019) değerleri ile uyumludur.

Ri sayısı azaldıkça (doğal taşınım etkileri arttıkça) ortalama Nusselt sayısının azaldığı görülmüş olup, literatürde yer alan diğer çalışmalar ile paralellik içerisinde olduğu belirlenmiştir (Sharma ve Eswaran, 2004b, Houssein ve Mohamed 2017, ).

Yalın zorlanmış taşınımında (Ri=0 iken) Prandtl sayısının Strouhal sayısı üzerindeki etkin olmadığı Altaç vd. (2019) çalışmalarında vurgulanmıştır. Bu çalışmada da Ri=0 olması durumunda Pr=0.7 ve 7 için St sayıları birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Ayrıca engelleyici doğal taşınım şartlarında (Ri<0 durumunda) Ri sayısı azaldıkça St sayısı bu çalışmada olduğu gibi literatürde de azalma eğilimindedir (Chang ve Sa 1990, Patnaik vd. 1999, Sharma ve Eswaran 2004b).

Bunlara ek olarak; bu çalışmada Ri sayısı azaldıkça ortalama sürüklenme katsayısı azalmış, fakat kaldırma kuvveti (rms) değerinin arttığı tespit edilmiştir. Isıtılmış/soğutulmuş dairesel bir silindirden girdap atma olgusu, tümlleşik doğal ve zorlanmış konveksiyon rejimlerinde sayısal olarak Chang ve Sa (1990) tarafından araştırılan çalışmada da yздürme kuvvetlerinin zorlanmış taşınımına ters yönlü olduğu durumda Ri sayısı azaldıkça ortalama sürüklenme katsayısının azaldığını bulmuşlardır. Aynı şekilde Patnaik vd. (1999) yaptığı çalışmada da Ri sayısı azaldıkça  $C_D$  değerinin azaldığını,  $C_{L,rms}$  değerinin arttığı tespit edilmiştir.

## 6. Kaynaklar

- Ahmad, S., Arifin, N. M., Nazar, R., Pop, I. 2009. Mixed convection boundary layer flow past an isothermal horizontal circular cylinder with temperature-dependent viscosity. *Int. J. Therm. Sci.* 48(10): 1943–1948. Doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.02.014
- Avcioğlu, S. 2012. Ev tipi buzdolabı soğutucu bölgesinde sıcaklık dağılımının deneysel ve sayısal incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 77 s.
- Altaç, Z., Sert, Z., Mahir, N., Timuralp, Ç. 2019. Mixed convection heat transfer from a triangular cylinder subjected to upward cross flow. *Int. J. Therm. Sci.* 137: 75-85. Doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.010

- Chang, K. S., Sa, J. Y. 1990.** the effect of vortex shedding in the near wake of a circular cylinder. *J. Fluid Mech.* 220: 253–266. Doi: 10.1017/S002211209000324X
- Churchill, S. W., Bernstein, M. 1977.** A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow. *J. Heat Trans.* 99 (2): 300–306. Doi: 10.1115/1.3450685
- Dhiman, A. K., Sharma, N., Kumar, S. 2014.** Buoyancy-aided momentum and heat transfer in a vertical channel a built-in square cylinder. *Int. J. Sust. Ener.* 33(5): 963–984. Doi: 10.1080/14786451.2013.764878
- Gandikota, G., Amiroudine, S., Chartterjee, D., Biswas, G. 2010.** The effect of aiding/opposing buoyancy on two-dimensional laminar flow across a circular cylinder. *Numer. Heat. Tr. A-Appl.* 58: 385–402. Doi: 10.1080/10407782.2010.505167
- Guillen, I., Trevino, C., Martinez-Suastegui, L. 2014.** Unsteady laminar mixed convection heat transfer from a horizontal isothermal cylinder in contra-flow: Buoyancy and wall proximity effects on the flow response and wake structure. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 52: 30–46. Doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.08.019
- Houssein, L., Mohamed, B. 2017.** The Effect of asymmetrically confined circular cylinder and opposing buoyancy on fluid flow and heat transfer. *Defect Diff. Forum.* 374: 18–28. Doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.374.18
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Theodore, L. B., Lavine, A. S. 2015.** Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri. Palme Yayınevi, ISBN: 9786053552826, 1046 s.
- Jassim, S. L. G. 2010.** Numerical study of the mixed convection flow over a square cylinder. *Iraqi J. Chem. Petro. Eng.* 11(1): 29–45. Doi:-
- Mahir, N., Altaç, Z. 2019.** Numerical investigation of flow and combined natural-forced convection from an isothermal square cylinder in cross flow. *Int. J. Heat Fluid Fl.* 75: 103–121. Doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.11.013
- Moulai, S., Korichi, A., Polidori, G. 2016.** Aided mixed convection past a heated square cylinder at low blockage ratio. *J. Appl. Fluid Mech.* 9(1): 303–310. Doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.224.22891
- Okajima, A. 1982.** Strouhal numbers of rectangular cylinders. *J. Fluid Mech.* 123: 379–398. Doi: -
- Patel, S. A., Chhabra, R. P. 2016.** Laminar free convection in Bingham plastic fluids from an isothermal elliptic cylinder. *J. Thermophys. Heat Tr.* 30(1), 154–168. Doi: 10.2514/1.T4578
- Patnaik, B. S. V., Narayana, P. A. A., Seetharamu, K. N. 1999.** Numerical simulation of vortex shedding past a circular cylinder under the influence of buoyancy. *Int. J. Heat Mass Trans.* 42: 3495–3507. Doi: 10.1016/S0017-9310(98)00373-1
- Salcedo, E., Cajas, J. C., Trevino, C., Martinez-Suastegui, L. 2016a.** Unsteady mixed convection heat transfer from two confined isothermal circular cylinders in tandem: Buoyancy and tube spacing effects. *Int. J. Heat Fluid Fl.* 60: 12–30. Doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.04.001
- Salcedo, E., Cajas, J. C., Trevino, C., Martinez-Suastegui, L. 2016b.** Numerical investigation of mixed convection heat transfer from two isothermal circular cylinders in tandem arrangement: buoyancy, spacing ratio, and confinement effects. *Theor. Comp. Fluid Dyn.* 31: 159–187. Doi: 10.1007/s00162-016-0411-z
- Salcedo, E., Trevino, C., Palacios-Morales, C., Zenit, R., Martinez-Suastegui, L. 2017.** Experimental study on laminar flow over two confined isothermal cylinders in tandem during mixed convection. *Int. J. Therm. Sci.* 115: 176–196. Doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.01.015
- Sen, S., Mittal, S., Biswas G. 2011.** Flow past a square cylinder at low Reynolds numbers. *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 67: 1160–1174. Doi: 10.1002/flid.2416
- Sharma, A., Eswaran, V. 2004a.** Heat and fluid flow across a square cylinder in the two-dimensional laminar flow regime. *Numer. Heat. Tr. A-Appl.* 45 (3): 247–269. Doi: 10.1080/10407780490278562
- Sharma, A., Eswaran, V. 2004b.** Effect of aiding and opposing buoyancy on the heat and fluid flow across a square cylinder at Re=100. *Numer. Heat. Tr. A-Appl.* 45(6): 601–624. Doi: 10.1080/10407780490277798
- Sharma, N., Dhiman, A. K., Kumar, S. 2012.** Mixed convection flow and heat transfer across a square cylinder under the influence of aiding buoyancy at low Reynolds numbers. *Int. J. Heat Mass Tran.* 55 (9-10): 2601–2614. Doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.12.034
- Singh, S., Biswas, G., Mukhopadhyay, A. 1998.** Effect of thermal buoyancy on the flow through a vertical channel with a built-in circular cylinder. *Numer. Heat. Tr. A-Appl.* 34 (7): 769–789. Doi: 10.1080/10407789808914015
- Singh, S K., Panigrahi, P. K., Muralidhar, K. 2007.** Effect of buoyancy on the wakes of circular and square cylinders: a schlieren-interferometric study. *Exp. Fluids.* 43(1): 101–123. Doi: 10.1007/s00348-007-0329-8
- Şentürk, U. 2018.** Serbest akım içerisinde salınan bir silindir etrafındaki akışın ataletsiz koordinatlarda sayısal incelenmesi. *Pamukkale Univ. Muh. Bilim. Derg.* 24(1): 13–18. Doi: 10.5505/pajes.2017.92195
- Zeion, O., Mohamed, A., Nuhait, A. 2011.** Convective heat transfer around a triangular cylinder in an air cross flow. *Int. J. Therm. Sci.* 50 (9): 1685–1697. Doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.04.011



- Zhang, N., Rong, L. W., Dong, K. J., Zeng, Q. D. 2020.** Fluid flow and heat transfer characteristics over a superelliptic cylinder at incidence. *Powder Technol.* 2020: 193-208. Doi: 10.1016/j.powtec.2019.09.076
- Zhang, W., Samtaney, R. 2016.** Numerical simulation and global linear stability analysis of low-Re flow past a heated circular cylinder. *Int. J. Heat Mass Tran.* 98: 584-595. Doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.058
- Zhu, H., Tang, T., Zhou, T., Liu, H., Zhong J. 2020.** Flow structures around trapezoidal cylinders and their hydrodynamic characteristics: Effects of the base length ratio and attack angle. *Phys. Fluids.* 32: 103606. Doi: 10.1063/5.0021043