

Kare Kesitli İki Silindir Etrafında Akış ve Isı Geçişi

Özge Yetik

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2013

Flow And Heat Transfer from Two Square Cylinders

Özge Yetik

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Mechanical Engineering

June 2013

# Kare Kesitli İki Silindir Etrafında Akış ve Isı Geçişi

Özge Yetik

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Enerji - Termodinamik Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Necati Mahir

Haziran 2013

## ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Özge Yetik'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Kare Kesitli İki Silindir Etrafında Akış ve Isı Geçişı" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Necati Mahir

**İkinci Danışman** : -

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Doç. Dr. Necati Mahir

**Üye** : Prof. Dr. Zekeriya Altaç

**Üye** : Prof. Dr. Neşe Öztürk

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. M. Ertunç Tat

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Mesut Tekkalmaz

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Bu tezde hesaplama alanı içerisinde yüksekliği ve genişliği  $D$  olan kare kesitli tek ve art arda yerleştirilmiş iki silindirin arasındaki ve iz bölgesindeki akış ve ısı geçişi incelenmiştir. Çift silindir için alt tarafta duvar olması ve olmaması durumları incelenmiştir.  $x$  ve  $y$  eksenleri yönünde uniform olmayan ağ yapısı oluşturulmuş, silindir ve duvarın yakınında daha sık ağ yapısı kullanılmıştır. Tek silindirden elde edilen sonuçlar kullandığımız program sonuçlarının doğruluğunu tespit etmek için literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Art arda yerleştirilmiş iki silindir arasındaki akış alt tarafta plaka olması ve olmaması durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Altta plaka olduğu zaman, akış simetrik olmadığından sonuçlar birbiriyle çok farklı çıkmıştır. Altta plaka yokken silindirler arası mesafe  $2 D$  olana kadar silindirler arasında vorteks oluşmazken, silindirler arası mesafe  $2.5 D$  olduğunda vorteks oluşmaya başlamış fakat  $3.5 D$  olduğunda ön silindirden ayrılan sınır tabaka tamamen silindirler arasında vorteks oluşturduğu için ön ve arka silindirlerin direnç kuvveti, kaldırma kuvveti ve Nusselt sayıları en yüksek değerlerini  $3.5 D$  de almışlardır. Altta plaka varken silindirler arası mesafe  $1.5 D$  ve duvara olan uzaklık  $1.5 D$  olduğunda ön silindirden ayrılan sınır tabaka silindirler arasında kıvrılmaya başlamıştır ancak  $2 D$  olduğunda plakadan ayrılan sınır tabaka ön silindire ve arka silindire değmeden yoluna devam etmiştir. Bu nedenle direnç kuvveti ve Nusselt sayısı en yüksek değerlerini ön ve arka silindirde  $1.5 D$  olduğunda almışlardır. Silindirler arası mesafe  $2.5 D$  ve  $4 D$  olması durumunda plakadan ayrılan sınır tabaka duvara olan uzaklık  $2 D$  olduğunda ön silindire, duvara olan uzaklık  $3.5 D$  olduğunda da arka silindire değmeden yoluna devam etmiştir. Direnç kuvveti ve Nusselt sayısı en yüksek değerlerini ön silindirde  $1.5 D$  arka silindirde  $3 D'$  de almıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kare Kesitli Silindir, Art Arda Yerleştirilmiş Kare Kesitli Silindir, Silindirler Arası Mesafe, Duvar Etkisi

## SUMMARY

This thesis analyses the flow and the heat transfer between one and two tandem square cylinders of height and width  $D$ . For the two cylinders, the orientations with and without the existence of a wall were examined. Nonuniform grid structure was formed in  $x$  and  $y$  axes directions, and denser grid structure was used near the cylinder and the wall. The results of the one cylinder tests were compared with other studies in literature in order to check reliability and accuracy of the program used. The flow between the two tandem cylinders were analyzed separately for cases with and without a plate. When there is a plate in the vicinity of the cylinders, very different results were reached due to lack of symmetric flow. When there was no a plate, no vortex also was formed between the cylinders until the distance was  $2 D$ . When the distance between the cylinders was  $2.5 D$ , the vortex formation occurred but when the distance was  $3.5 D$  the boundary layer that separated from the upstream cylinder formed a vortex between the cylinders. Thus the highest drag coefficient, lift coefficient and Nusselt number values for the upstream and the downstream cylinders were obtained with  $3.5 D$ . Given the existence of a plate and the distance between the cylinders as  $1.5 D$ , and the distance to the wall as  $1.5D$  a boundary layer that split from the upstream cylinder started to bend between the cylinders; however, when the distance was  $2 D$  the boundary layer that split from the plate drifted between the cylinders without touching either cylinder. Thus the highest drag coefficient and Nusselt number values were obtained for the upstream and the downstream cylinders as  $1.5 D$ . When the distance between the cylinders was  $2.5 D$  and  $4 D$ , the boundary layer that split from the plate drifted without touching the upstream cylinder. When the distance from the wall was  $2 D$ , the same applied for the downstream cylinder when the distance to the wall was  $3.5 D$ . The highest drag coefficient and Nusselt number values were obtained at  $1.5D$  for the upstream cylinder and at  $3 D$  for the downstream cylinder.

Keywords: Square Cylinder, Tandem Square Cylinders, Distance Between Square Cylinders, Wall Effect.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarında, gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanım Doç. Dr. Necati Mahir hocama ve hiç bir zaman desteklerini esirgemeyen eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET .....	v
SUMMARY .....	vi
TEŞEKKÜR .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SAYISAL METOD .....</b>	<b>6</b>
<b>3. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR .....</b>	<b>14</b>
3.1. Kare Kesitli Tek Silindir Etrafında Akış ve Isı Geçişi .....	14
3.2. Kare Kesitli İki Silindir Etrafında Akış ve Isı Geçişi .....	17
3.2.1. Duvar yokken kare kesitli art arda iki silindir etrafında akış ve ısı geçişi .....	17
3.2.1.1. <u>Girdap eğrileri</u> .....	17
3.2.1.2. <u>Kaldırma kuvvetinin değişimi</u> .....	21
3.2.1.3. <u>Direnç kuvvetinin değişimi</u> .....	23
3.2.1.4. <u>Strouhal sayılarının değişimi</u> .....	25
3.2.1.5. <u>Nusselt sayılarının değişimi</u> .....	26
3.2.2. Duvar varken kare kesitli art arda iki silindir etrafında akış ve ısı geçişi.....	29
3.2.2.1. <u>Girdap eğrileri</u> .....	30
3.2.2.2. <u>Kaldırma kuvvetinin değişimi</u> .....	41
3.2.2.3. <u>Direnç kuvvetinin değişimi</u> .....	43
3.2.2.4. <u>Strouhal sayılarının değişimi</u> .....	45
3.2.2.5. <u>Nusselt sayılarının değişimi</u> .....	46
<b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>51</b>
<b>5. KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>53</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Blok etkisindeki silindir için hesaplama alanı.....	6
2.2. Kare kesitli silindir etrafındaki ağ yapısı.....	7
2.3. Blok etkisindeki silindirler için hesaplama alanı (altta duvar olmaması durumu).....	8
2.4. Blok etkisindeki silindirler için hesaplama alanı (altta duvar olması durumu).....	8
2.5. Kare kesitli silindirler etrafındaki ağ yapısı (altta duvar olmaması durumu).....	9
2.6. Kare kesitli silindirler ve duvar yakınındaki ağ yapısı (altta duvar olması durumu).....	9
3.1. Kare kesitli tek silindir için $CD_{mean}$ katsayısının $Re$ sayısı ile değişimi...	14
3.2. Kare kesitli tek silindir için $Nu_{mean}$ sayısının $Re$ sayısı ile değişimi.....	15
3.3. Kare kesitli tek silindir için $St$ sayısının $Re$ sayısı ile değişimi.....	15
3.4. Kare kesitli tek silindir için $Nu_{Sol}$ , $Nu_{Üst}$ ve $Nu_{Sağ}$ sayılarının $Re$ sayısı ile değişimi.....	16
3.5. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesindeki girdap eğrileri: a) $L/D=0.5$ , b) $L/D=1$ , c) $L/D=1.5$ , d) $L/D=2$ .....	17
3.6. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesinde girdap eğrileri: a) $L/D=2.5$ , b) $L/D=3$ .....	19
3.7. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesinde girdap eğrileri: a) $L/D=3.5$ , b) $L/D=4$ , c) $L/D=5$ , d) $L/D=6$ , e) $L/D=7$ .....	20
3.8. Ortalama kaldırma kuvvet katsayısının $L/D$ oranı ile değişimi.....	22
3.9. Kaldırma kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değerinin $L/D$ oranıyla değişimi.....	23
3.10. Ortalama direnç kuvvet katsayısının $L/D$ oranı ile değişimi.....	24
3.11. Direnç kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değerinin $L/D$ oranıyla değişimi.....	25
3.12. $St$ sayısının $L/D$ oranıyla değişimi.....	26

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.13. Ortalama nusselt sayısının L/D oranıyla değişimi.....	27
3.14. $Nu_{rms}$ değerinin L/D oranıyla değişimi.....	28
3.15. Silindirlerin alt, üst, sol ve sağ taraflarındaki Nu sayılarının L/D oranıyla değişimi.....	28
3.16. Silindirlerin alt, üst, sol ve sağ taraflarındaki $Nu_{rms}$ sayılarının L/D oranıyla değişimi.....	29
3.17. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesindeki girdap eğrileri (L/D=1.5D): a) G/D=0.7, b) G/D=1, c) G/D=1.5, d) G/D=2, e) G/D=2.5 f) G/D=3, g) G/D=3.5, h) G/D=4, ı) G/D=6.....	31
3.18. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesindeki girdap eğrileri (L=2.5D):a) G/D=0.7, b) G/D=1, c) G/D=1.5, d) G/D=2, e) G/D=2.5, f) G/D=3, g) G/D=3.5, h) G/D=4, ı) G/D=6.....	35
3.19. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesindeki girdap eğrileri (L/D=4) a) G/D=0.7, b) G/D=1, c) G/D=1.5, d) G/D=2, e) G/D=2.5, f) G/D=3, g) G/D=3.5, h) G/D=4, ı) G/D=6.....	38
3.20. Ön ve arka silindirlerdeki ortalama kaldırma kuvvet katsayısının G/D oranıyla değişimi.....	42
3.21. Ön ve arka silindirlerdeki ortalama kaldırma kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değerinin G/D oranıyla değişimi.....	43
3.22. Ön ve arka silindirlerin ortalama direnç kuvvet katsayısının G/D oranıyla değişimi.....	44
3.23. Ön ve arka silindirlerin ortalama direnç kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değerinin G/D oranıyla değişimi.....	45
3.24. Farklı silindirler arası mesafeler için Strouhal sayısının G/D oranıyla değişimi.....	46
3.25. Ön ve arka silindirlerdeki ortalama Nu sayısının G/D oranıyla değişimi.....	47

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Şekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.26. Ön ve arka silindirlerdeki ortalama Nu sayısının kare ortalama karekök değerinin G/D oranıyla değişimi.....	48
3.27. Silindirlerin alt, üst, sol ve sağ taraflarındaki Nu sayılarının G/D oranıyla değişimi (L/D=1.5).....	49
3.28. Silindirlerin alt, üst, sol ve sağ taraflarındaki Nu sayılarının G/D oranıyla değişimi (L/D=4).....	50

**ÇİZELGELER DİZİNİ****Çizelge****Sayfa**

- 2.1. Silindirlerin arka arkaya serbest akış alanına yerleştirilmesi durumundaki ağ testleri..... 13

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
$b$	Silindirin alt kısmı
CD	Direnç kuvvet katsayısı
CL	Kaldırma kuvvet katsayısı
D	Silindirin yüksekliği ve genişliği
$f$	Silindirin ön kısmı
FD	Direnç kuvveti
FL	Kaldırma kuvveti
G	Silindir ile duvar arasındaki mesafe
$G$	Gradient
$H$	Ayrık adveksiyon
$h_{\theta}$	Yerel ısı transfer katsayısı
L	Silindirler arası mesafe
$L$	Diffüzyon bileşeni
n	Zaman adımı
$Nu$	Nusselt sayısı
$Nu_{\theta}$	Yerel Nu sayısı
$p$	Boyutsuz basınç
Pr	Prandtl sayısı
$r$	Silindirin arka kısmı
Re	Reynolds sayısı
St	Strouhal Sayısı
T	Boyutsuz sıcaklık
$t$	Boyutsuz zaman bileşeni
$u$	$x$ yönündeki boyutsuz hız bileşenleri
$v$	$y$ yönündeki boyutsuz hız bileşenleri
V	Hız bileşeni
$\alpha$	Isı yayılım katsayısı

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklamalar</u></b>
$\eta$	Kinematik viskozite
$\Phi$	Basınç için poisson denklemi

## 1. GİRİŞ

Belli bir hızdaki daimi bir akım içerisindeki cismin arkasındaki periyodik çevrime vorteks adı verilir. Vorteksler titreşimli bir yapıya sahip olup bazen istenmeyen durumlara neden olabilirler. Elektrik iletim hattının rüzgârla ıslık çalması, bazı yapıların kritik rüzgâr ya da araç hızlarında sallanması, rüzgâr kaynaklı çevri kopmaları, doğal burulma titreşimlerinin rezonansa yol açıp Tacoma Narrows asma köprüsünün yıkılma felaketine neden olması çarpıcı örneklerdir. Uçaklar, arabalar, yüksek katlı binalar, gemiler, deniz altılar, türbinler, köprü ayakları, ısı değiştiriciler, fabrika bacaları gibi uygulama alanlarından dolayı akan akışkan içerisindeki silindirlerin etrafındaki ve arkasındaki akışlar çok önemlidirler.

Konu ile ilgili olarak literatür çalışması yapıldığında genellikle tek silindir yada çift silindir için duvar olmaması durumundaki akışlar ele alınmış, alt tarafta duvar varken kare kesitli çift silindir için meydana gelen akış sonuçları incelenmemiştir.

Chatterjee and Amiroudine, (2010) çalışmalarında  $Re$  sayısını 1 ile 30 arasında,  $Pr$  sayısını 0,7 ile 100 arasında alıp iki boyutta kare kesitli iki silindire gelen akışı incelemiştir. Sonuç olarak ortalama  $Nu$  sayısı ile Colburn  $j$ -faktörü benzer dağılımlar göstermiştir. Genel olarak ise global akış ve ısı transferi değerleri ön silindirde arka silindire göre daha yüksek değerler aldığı görülmüştür.

Chatterjee, et al., (2009) çalışmalarında 5 kare silindiri belirli aralıklarla üst üste koyup  $Re$  sayısını 150 alıp ısı transferi geçişini incelemiştir. Sayısal çalışmalarında PISO algoritması kullanmışlardır. Silindirler arasındaki mesafenin silindir boyutuna oranını 0,2 ile 10 arasında almışlardır. Nispeten yüksek ayrılma oranlarında (2 ile 4 arasında) vorteksler tarafından akış ve termal alanların oluştuğu görülmüştür. Ortalama direnç kuvveti ( $CD$ ), Strouhal ( $St$ ) sayısı ve Nusselt ( $Nu$ ) sayılarının benzer dağılımlar gösterdiği bulunmuştur.

Chatterjee and Mondal, (2012) art arda yerleştirilmiş kare kesitli iki silindiri iki boyutta sayısal olarak incelemiştir. Silindir arasındaki mesafenin silindir boyutuna oranını 1, 2, 3, 4, 5, 7 ve 10 almışlardır. Sayısal hesaplamalar PISO algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Re sayıları 50 ile 100 arasında alınmıştır. Pr sayısı da sabit tutularak 0,71 alınmıştır. Sonuç olarak seçilen bir aralıkta Re sayısı artarken kritik uzaklık azalmıştır. Nu sayısı Re sayısı ile birlikte artmıştır ve aynı zamanda silindirler arası uzaklıkta artmıştır. Ön silindirdeki Nu sayısı ile tek silindirdeki Nu sayısı yaklaşık olarak aynı değerleri almıştır. Genel olarak, global akış ve ısı transferi miktarı değerleri ön silindirde arka silindire göre daha yüksek değerler almışlardır.

Harichandan and Roy, (2012) teorik olarak hesaplama alanı içerisinde düz bir duvar üzerindeki tek ve art arda yerleştirilmiş silindirler üzerindeki akışı incelemiştir. Hesaplamalarını iki boyutlu daimi olmayan akışı sonlu hacimler metodu ile Re sayısı 100 ve 200 için yapmışlardır. Akış karakteristiği Re sayısının yanı sıra silindirlerin duvara olan uzaklığı ve iki silindir arasındaki uzaklığa bağlı olduğu görülmüştür. Çalışmalarının üç boyutlu analiz için faydalı noktalar içerdiğini ileri sürmüşlerdir. Ayrıca bu çalışmanın ileriki zamanlarda daha ayrıntılı üç boyutlu bir çalışma ile karşılaştırmalar için faydalı olacağı düşünülmüştür.

Gegez, (2010) yüksek lisans tezinde kanal içerisindeki kare kesitli silindir etrafında türbülanslı akışı incelemiştir. Re sayısı 20000 de sabit tutulmuştur. İncelenen bütün blok oranlarında, silindir boyutunun alt duvara olan uzaklığının oranı 0,2 olması halinde silindirlerin arkasında vorteks caddesi oluşmadığı görülmüştür. Silindirlerin plakalara simetrik yerleştirilmesi durumunda; blok oranının artması ile birlikte ortalama direnç kuvvet katsayısı, kaldırma kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değeri ve Strouhal sayısı da arttığı ileri sürülmüştür. Aynı zamanda silindir duvar aralığının küçük olması durumunda (0,2) zaman ortalama akım çizgileri, silindirlerin arkasında simetrik olmayan uzun sirkülasyon bölgeleri meydana geldiği gösterilmiştir.

Luo, et. al., (2003) çalışmalarında Re sayısını 250 ve 1000 de sabit tutarak kare kesitli tek silindir üzerindeki akışı simule etmek için melez vorteks metodunu kullanmışlardır. Sonuçlara göre, Re sayısı 250 iken  $C_y$  kavisine karşı dönüm noktası



içermediği ama Re sayısı 1000 ve  $\alpha$  4 iken dönüm noktası olduğu görülmüştür. Güçlü ama aralıklı kayma tabakaları ise Re sayısı 1000 de değil 250 de elde edilmiştir.

Mahir, (2009) çalışmasında duvar yanındaki tek kare kesitli silindirin üç boyutlu akış analizini yapmıştır. Silindir ile duvar arasındaki boşluğu 0,2 ile 4 arasında, Re sayısını 175, 185 ve 250 almıştır. Üç boyutlu yapıda kaldırma kuvveti, direnç kuvveti ve St sayısı araştırılmıştır. Çıkan sonuçlar iki boyutlu çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Re 250 değerinde silindir arkasındaki bölgede B tipi ikincil vorteks oluşurken, Re 175 ve 185 de A tipi vorteksin ardından tamamen B tipi girdapların geçişi gözlenmiştir.

Malekzadeh and Sohankar, (2012) laminer akış durumunda kontrol paneli içerisindeki kare kesitli bir silindir etrafındaki akış güçlerinin ve ısı transferinin azaltılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Re sayısı 50 ile 200 arasında alınmıştır. Kontrol paneli genişliğinin silindir boyutuna oranı 0,1 ile 0,9 arasında değiştirilmiştir. Kontrol paneli ile silindir arasındaki mesafenin silindir boyutuna oranı 1,1 ile 7 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en uygun kontrol paneli ile silindir arasındaki mesafenin silindir boyutuna oranı ve kontrol panel genişliğinin silindir boyutuna oranı sırasıyla 3 ve 0,5 bulunmuştur. Bu durumda akış gücü en yüksek düzeyde azaltılmış ve ısı transferinde minimum seviyede düşüş sağlanmıştır. Aynı zamanda, farklı boşluk aralıkları için toplam Nu sayısında azalma olmuştur.

Sahu, et. al., (2009 a) çalışmalarında daimi olmayan akış içerisindeki kare kesitli tek silindirin Reynolds (Re) ve Prandtl (Pr) sayılarının ısı transferi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Re sayısını 60 ile 160 arasında alırken, Pr sayısını 0,7 ile 50 arasında almışlardır. Sayısal sonuçlar kullanılarak, sabit sıcaklık ve sabit ısı akışı koşulları için kare kesitli silindir üzerindeki basit ısı transferi korrelasyonları elde edilmiştir. Sonuçlara göre, yerel Nu sayısı, Re ve Pr sayısı ile birlikte artış göstermektedir.

Sahu, et. al., (2009 b) çalışmalarında iki boyutlu daimi olmayan akış içerisindeki kare kesitli silindir etrafındaki akışı sayısal olarak incelemişlerdir. Re sayısı 60 ile 160 arasında, güç indeksi 0,5 ile 2 arasında alınmıştır. Çalışmada Re sayısının artışı ile direnç katsayısının azaldığı görülmüştür.

Sharma and Eswaran, (2004) çalışmalarında iki boyutlu laminar akış rejiminde tek kare kesitli silindir için ısı ve debi kontrolü yapmışlardır. Daimi ve daimi olmayan akış rejimi içerisinde Re sayısı 1 ile 160 arasında, Pr sayısı 0,7 alınmıştır. Çalışmada vorteks eğrilerinin ısı transferine etkisi tartışılmıştır. Uniform ısı akışı ve sabit silindir sıcaklığı sınır koşulunda Nu sayısı ile Re sayısı arasındaki ilişki incelenmiştir. Silindir üzerindeki ortalama Nu sayısı, Re sayısı ile birlikte arttığı bulunmuştur. Sabit silindir sıcaklığı ve sabit ısı akışı sınır koşullarında, silindirin ön yüzeyinde Nu sayısı en yüksek değeri, üst ve alt yüzeyler orta değerleri, arka yüzeyde en düşük değerini almıştır. Sonuç olarak, iki boyutlu akış rejimi içerisindeki ısı transferi ilişkisi hem sıcaklık hem de sınır koşullarına bağlı olduğu ileri sürülmüştür.

Art arda yerleştirilmiş iki kare silindir etrafındaki akışı, Sohankar and Etminan (2009) incelemiştir. Re sayısı 1 ile 200 arasında, Pr sayısı da 0,71 alınmıştır. İki boyutlu daimi ve daimi olmayan laminar akış SIMPLEKS algoritması temelli sonlu hacimler metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak Nu sayısı ön yüzey için en yüksek değerini, üst ve alt yüzey orta değerleri, arka yüzeyde en düşük değerini almıştır. Ön silindirdeki değerler arka silindirdeki değerlere göre daha yüksek bulunmuştur.

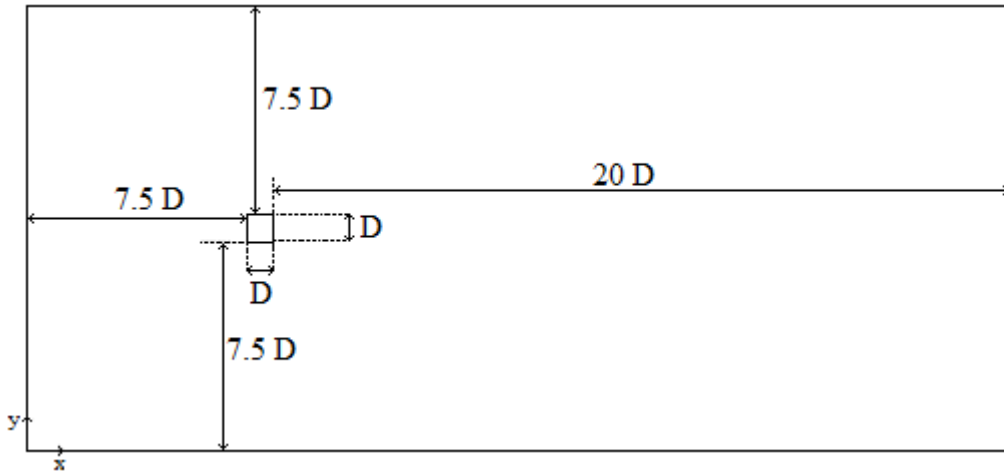
Sohankar, et. al., (1997) çalışmalarında daimi olmayan akış rejimi içerisinde kare kesitli silindir etrafındaki akışı sayısal olarak incelemiştir. Re sayısını 200' den küçük almışlardır. Çalışmada St sayısı, direnç, kaldırma ve moment katsayıları hesaplanmıştır.

Sohankar, et. al., (1998) çalışmalarında kare kesitli silindir etrafındaki akışı iki boyutta incelemiştir. Re sayısı 45 ile 200 arasında alınmıştır. Hesaplama alanının çıkışında konvektif Sommerfeld sınır koşulu ile geleneksel Neumann sınır koşulu karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda Sommerfeld sınır koşulunun daha etkili olduğu bulunmuştur. Bu çalışma; St sayısı, kaldırma, direnç ve moment katsayıları, Re sayısı ve akışın geliş açısının etkileri ile ilgili veri sağlamaktadır.

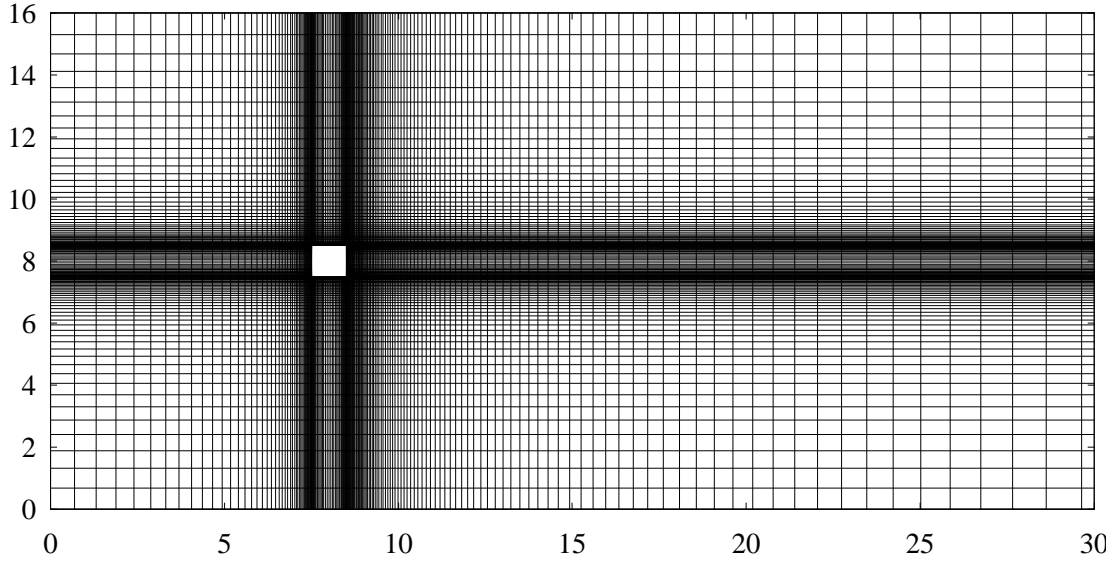
Yukarıdaki çalışmalardan da görüldüğü gibi genellikle serbest akış alanına yerleştirilmiş tek silindir ya da çift silindir için akışlar ele alınmıştır. Alt tarafında duvar olması durumunda iki silindir ile ilgili yeterli araştırma yoktur. Bundan dolayı duvar yakınına yerleştirilmiş art arda iki silindir etrafındaki akış ve silindirlerden olan ısı geçişi bu çalışmada ele alınmıştır.

## 2. SAYISAL METOD

İlk olarak hesaplama alanı içerisinde yüksekliği ve genişliği  $D$  olan kare kesitli tek silindir etrafındaki akış sayısal olarak incelenmiştir. Alan içerisinde giriş ve çıkış kısımlarının, akış parametreleri üzerinde etkisi göz ardı edilebilir derecede olması için silindir girişten, üst ve alt taraftan  $7,5 D$  uzaklığa yerleştirilmiştir.  $x$  ve  $y$  eksenleri yönünde uniform olmayan ağ yapısı oluşturulmuş, silindir ve duvarın yakınında daha sık ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama alanı ve silindirin yerleşimi Şekil 2.1.'de, ağ yapısı Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Hesaplama yapılırken simülasyonlarda Reynolds sayısı 100, 120, 140 ve 160 seçilmiştir.

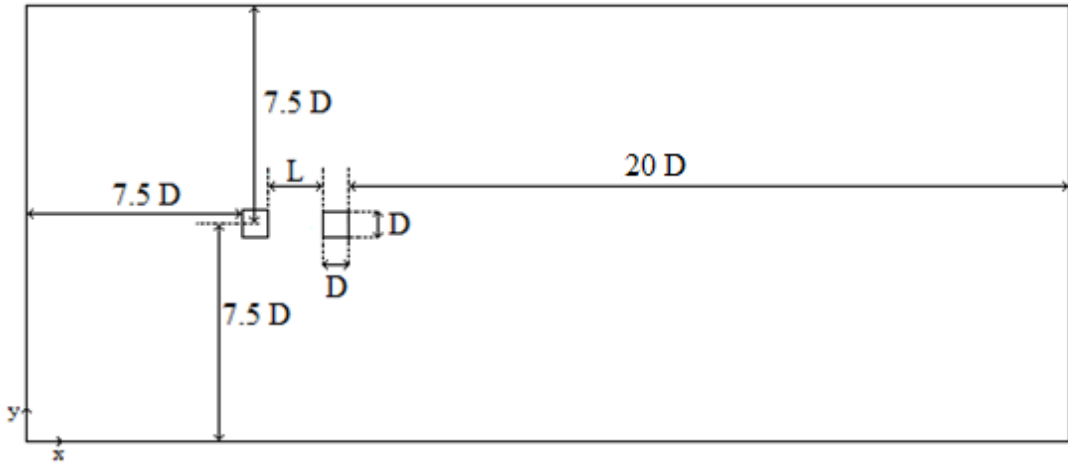


Şekil 2.1. Blok etkisindeki silindir için hesaplama alanı

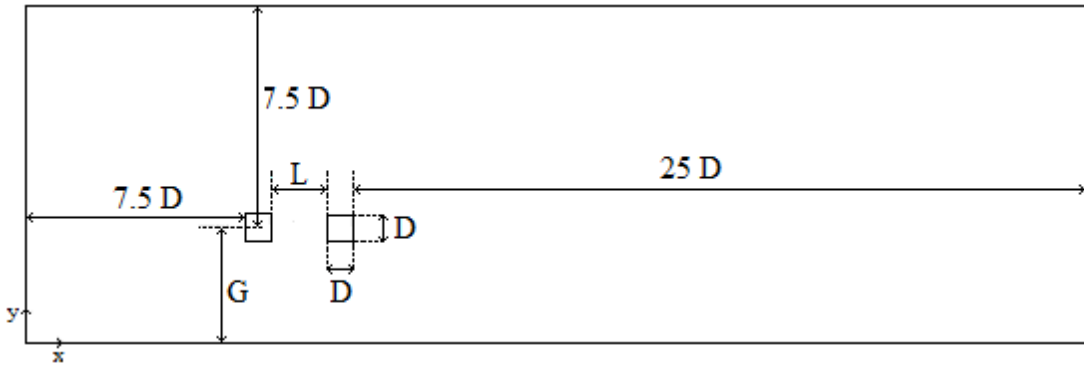


Şekil 2.2. Kare kesitli silindir etrafındaki ağ yapısı

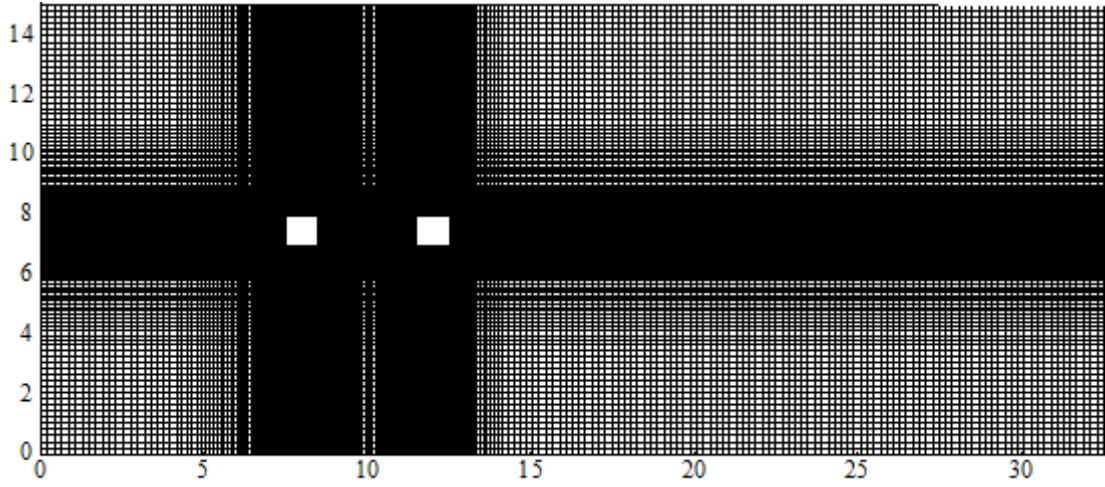
İkinci olarak serbest akış alanına yerleştirilmiş aralarındaki mesafe  $L$ , yükseklik ve genişlikleri  $D$  olan art arda yerleştirilmiş kare kesitli iki silindir arasında ve iz bölgesindeki akış sayısal olarak incelenmiştir. Alan içerisinde duvar olmaması durumunda giriş ve çıkış kısımlarının, akış parametreleri üzerinde etkisi göz ardı edilebilir derecede olması için silindir girişten, üst ve alt taraftan  $7,5D$  uzaklığa yerleştirilmiştir. Silindirler arası mesafe  $0,5 D$ ,  $1 D$ ,  $1,5 D$ ,  $2 D$ ,  $2,5 D$ ,  $3 D$ ,  $3,5 D$ ,  $4 D$ ,  $5 D$ ,  $6 D$ ,  $7 D$  seçilmiştir.  $x$  ve  $y$  eksenleri yönünde uniform olmayan ağ yapısı oluşturulmuş, silindir ve duvarın yakınında daha sık ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama alanı ve silindirlerin yerleşimi Şekil 2.3.'de gösterilmiştir. Hesaplama alanının altında duvar olması durumunda silindir girişten ve üstten  $7,5 D$  uzaklığa, çıkış ise 2. silindirden  $25 D$  uzaklığa yerleştirilmiştir. İki silindir arasındaki mesafeler  $1,5D$ ,  $2,5D$  ve  $4D$ , silindirlerin alt taraftaki duvara uzaklıkları  $0,7 D$ ,  $1 D$ ,  $1,5 D$ ,  $2 D$ ,  $2,5 D$ ,  $3 D$ ,  $3,5 D$ ,  $4 D$  ve  $6 D$  olarak değiştirilmiştir. Hesaplama alanı ve silindirlerin yerleşimi Şekil 2.4.'de gösterilmiştir. Kare kesitli silindirler ve duvar yakınındaki ağ yapısı Şekil 2.5. ve Şekil 2.6.'da gösterilmiştir. Her iki durumun simülasyonlarında Reynolds sayısı  $150$  seçilmiştir.



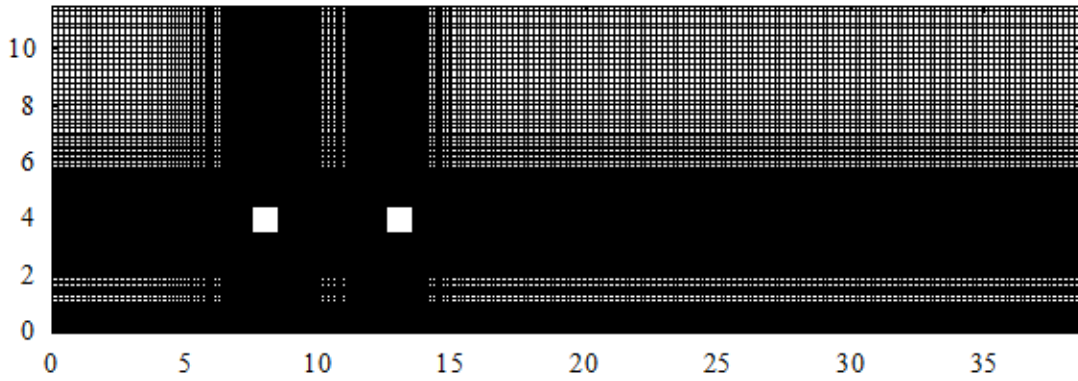
Şekil 2.3. Blok etkisindeki silindirler için hesaplama alanı  
(altta duvar olmaması durumu)



Şekil 2.4. Blok etkisindeki silindirler için hesaplama alanı  
(altta duvar olması durumu)



Şekil 2.5. Kare kesitli silindirler etrafındaki ağ yapısı  
(altta duvar olmaması durumu)



Şekil 2.6. Kare kesitli silindirler ve duvar yakınındaki ağ yapısı  
(altta duvar olması durumu)

Kare kesitli silindirler üzerindeki akışı incelemek için iki boyutlu Navier-Stokes ve enerji denklemleri Denklem (1) - Denklem (4)'de verilmiştir. Denklemlerdeki  $u$ ,  $v$  ve  $T$  boyutsuz hız bileşenlerini ve sıcaklığı,  $x$  ve  $y$  koordinatları,  $p$  basıncı ve  $t$  ise zamanı göstermektedir. Prandtl sayısı  $Pr = \eta / \alpha$  denklemindeki gibi çözülmüştür. Buradaki  $\eta$  kinematik viskozite,  $\alpha$  ise ısı yayılım katsayısıdır.

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{RePr} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Momentum denklemlerindeki taşınım ve viskoz terimlerine, Crank-Nicolson şeması kullanan kısmi adımlar metodu uygulanmıştır.

Ara hızlar aşağıdaki ayrıklaştırma şeması yardımıyla bulunmuştur.

$$\begin{aligned} \frac{V^{n+1/2} - V^n}{\Delta t} + \left[ \frac{1}{2} H(V^{n+1/2}) + \frac{1}{2} H(V^n) \right] = \\ -G(p^n) + \frac{1}{Re} \left[ \frac{1}{2} L(V^{n+1/2}) + \frac{1}{2} L(V^n) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$H$  ayrık adveksiyon,  $G$  gradient ve  $L$  difüzyon bileşenleridir.

Konvektif terimler yaklaşık olarak:

$$H(V^{n+1/2}) \cong (V^n \nabla) V^{n+1/2} \quad (6)$$

Basınç için poisson denklemi  $\Phi$  ile ifade edilebilir.

$$L\Phi = \frac{1}{\Delta t} \Delta V^{n+1/2} \quad (7)$$



Hız alanı ve bir sonraki zaman düzeyindeki basınç, Denklem (8) ve Denklem (9) ile hesaplanır.

$$V^{n+1} = V^{n+1/2} - \Delta t G \emptyset \quad (8)$$

$$p^{(n+1)} = p^n + \emptyset \quad (9)$$

(5) - (8) denklemlerinin çözümünde çapraz ağ yapısı kullanılmıştır. Taşınım terimlerindeki birinci mertebeden türevler üçüncü mertebeden doğru ileri farklar formülleriyle; viskoz terimlerdeki ikinci mertebeden türevler ise merkezi farklar formülleri kullanılarak ayrıştırılmıştır. Poisson tipi denklemlere chebyshev ile hızlandırılmış Jacobi metodu uygulanmıştır.

Birbirini izleyen ağ çizgileri arasındaki uzaklık geometrik seriler ile belirlenmiş, alt duvar ve silindirin alt yüzeyi yakınında  $\Delta x_i / \Delta x_{i-1} = 0,9$  ve arka yüzeyinde  $\Delta x_i / \Delta x_{i-1} = 1,1$  alınarak ağ yapısı oluşturulmuştur (Mahir, 2009). Her bir zaman adımı için çözümlerin yakınsaması Denklem (10) ile belirlenmiştir. Burada  $\emptyset$  basınç, orta hızları ve sıcaklık,  $n$  ise zaman adımını göstermektedir. Silindir yüzeylerinde ve duvarda kaymama (no-slip) sınır şartı kullanılmıştır. Uniform akış alanına yerleştirilmiş tek silindir ve art arda yerleştirilmiş silindirler halinde, girişte uniform hız kabul edilmiştir.  $U_\infty$  ve  $T_\infty$  serbest akış hızı ve sıcaklığını  $T_w$  ise silindir duvar sıcaklığını göstermektedir.

$$\sum_{i,j} \frac{(\emptyset_{i,j}^n - \emptyset_{i,j}^{n-1})^2}{(\emptyset_{i,j}^n)^2} < 5 \times 10^{-5} \quad (10)$$

Sınır koşulları ise Denklem (11) – Denklem (13) arasında verilmiştir.

$$\text{Girişte, } u = 1, T = 1 \quad (11)$$

$$\text{Alttaki duvarda, } u = 1, v = 0, T = 0 \quad (12)$$

$$\text{Silindir duvarlarında, } u = 0, v = 0, T = 1 \quad (13)$$

Duvar olması halinde ise sınır tabaka içerisindeki hız değişimi 3. mertebede Blasius profili ile belirlenmiştir (Schlichting, 1979). Çıkışta ise hız için taşınım sınır şartı  $\partial u_i / \partial t + u_c \partial u_i / \partial x = 0$  ve sıcaklık için  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$  sınır şartı uygulanmıştır.

Sırasıyla Denklem (14) - Denklem (17)'deki direnç ve kaldırma kuvvetlerinin her ikisi de silindir yüzeyleri üzerindeki viskoz ve basınç kuvvetleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Direnç kuvveti akış yönündeki kuvvet iken kaldırma kuvveti de akışa dik yönlü kuvvettir. Denklemlerdeki  $f$ ,  $r$ ,  $t$  ve  $b$  sırasıyla silindirin ön, arka, üst, alt yüzeylerini ifade etmektedir. Isı transfer katsayısı ve Nusselt sayısı Denklem (18) yardımıyla hesaplanmıştır. Denklem (18)'deki  $n$  silindir yüzeyinin dik yönünü,  $h_\theta$  ve  $Nu_\theta$  yerel ısı transferi katsayısını ve yerel Nu sayısını göstermektedir.

$$CD = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 D} \quad (14)$$

$$CL = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 D} \quad (15)$$

$$F_D = \int_0^D (\tau_t(x) + \tau_b(x)) dx + \int_0^D (P_f(y) + P_r(y)) dy \quad (16)$$

$$F_L = \int_0^D (\tau_f(y) + \tau_r(y)) dy + \int_0^D (P_t(x) + P_b(x)) dx \quad (17)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w = h_\theta (T_w - T_\infty), \quad Nu_\theta = \frac{h_\theta D}{k} \quad (18)$$

Strouhal sayısı Denklem (19) yardımıyla hesaplanmıştır. Denklemdeki  $f$  frekansı ifade etmektedir.

$$St = \frac{fD}{U} \quad (19)$$

Direnç ve kaldırma kuvveti katsayılarının ortalama değerleri, bu değerlerin zaman geçmişi ortalaması alınarak elde edilmiştir.

Tablo 2.1.' de silindirlerin arka arkaya serbest akış alanına yerleştirilmesi durumundaki ağ testleri görülmektedir. Farklı ağ yapılarını hesaplanan değerler üzerindeki etkilerini belirlemek için silindirler arasında vorteks oluşmadığı uzaklık 0,5 D ve vorteks caddesinin oluştuğu uzaklık 7 D göz önüne alındı. Her iki durum için, silindirler üzerindeki ortalama direnç kuvvetleri, kaldırma kuvvetleri, Nusselt sayıları ve Strouhal sayıları karşılaştırılmıştır. Tablo 2.1 de görüldüğü gibi bu değerlerdeki en küçük farklar B ile C ağ yapılarında görülmektedir. Bu ağ yapılarında, ortalama direnç kuvvetleri arasındaki fark  $L/D = 0,5$  için ön silindirde 0,005, arka silindirde 0,001'dir.  $L/D = 7$  için ise ön ve arka silindirde 0,003'dür. Benzer şekilde Nusselt sayılarındaki farklar  $L/D = 0,5$  için ön silindirde 0 arka silindirde 0,004 iken  $L/D = 7$  için bu farklar ön silindir için 0,004 arka silindir için ise 0,002 dir. Bundan dolayı kısa sürede doğru sonuçlar elde etmek için B ağ yapısı hesaplamalarda kullanılmıştır.

Tablo 2.1. Silindirlerin arka arkaya serbest akış alanına yerleştirilmesi durumundaki ağ testleri

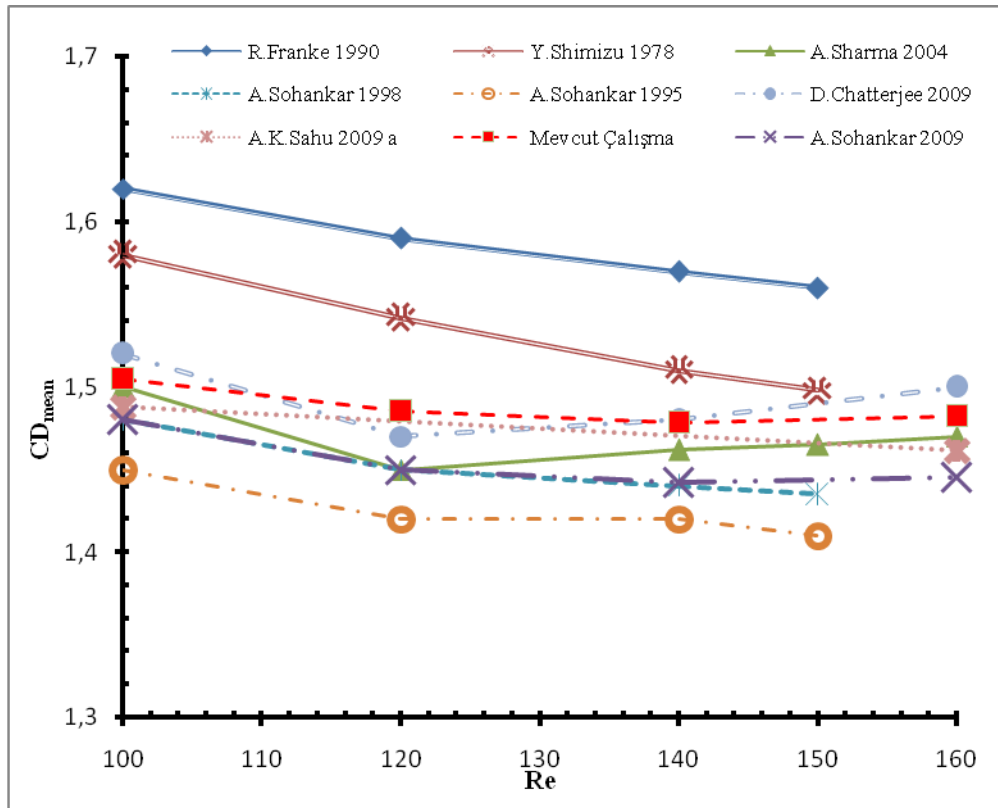
Ağ Yapısı	L/D	Minimum ağ genişliği	Ağ	CD <sub>1</sub> mean	CD <sub>2</sub> mean	CL <sub>1</sub> mean	CL <sub>2</sub> mean	Nu <sub>1</sub> mean	Nu <sub>2</sub> mean	St
A	0,5	0,020	235×153	1,382	-0,177	0,0239	-0,00040	4,139	1,831	0,152
B		0,010	340×205	1,375	-0,169	0,0196	-0,00016	4,151	1,837	0,154
C		0,008	486×265	1,380	-0,170	0,0174	-0,00021	4,151	1,833	0,153
A	7	0,020	309×153	1,467	0,957	0,0245	0,0184	4,776	4,463	0,158
B		0,010	426×205	1,463	0,931	0,0205	0,0166	4,790	4,409	0,162
C		0,008	582×265	1,466	0,928	0,0187	0,0154	4,794	4,407	0,159

### 3. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

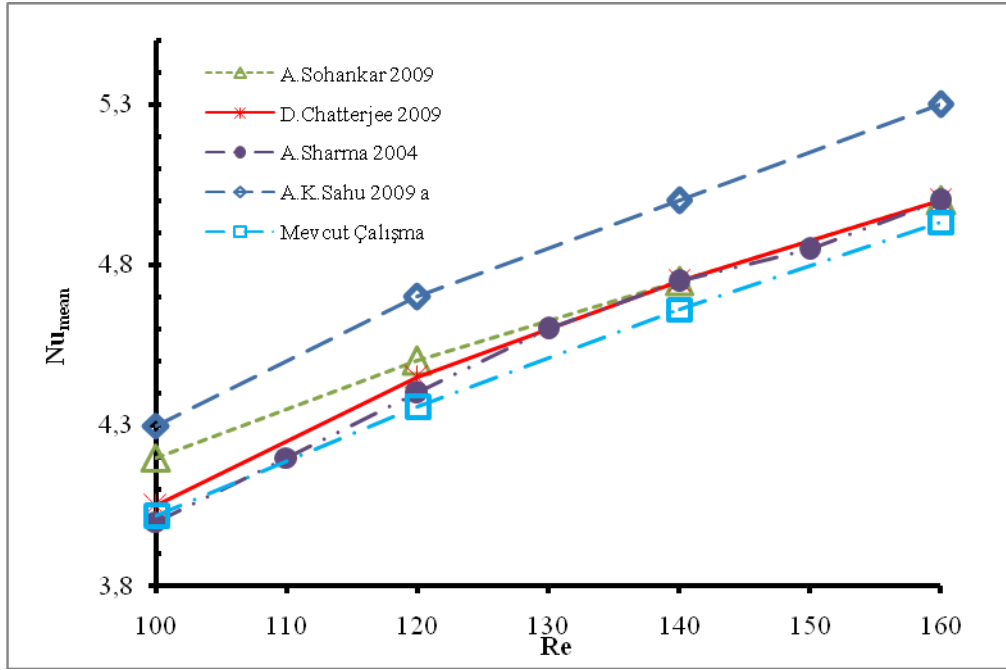
#### 3.1. Kare Kesitli Tek Silindir Etrafında Akış ve Isı Geçişi

Kare kesitli tek silindir sabit bir şekilde hesaplama alanı içerisinde girişten, alttan ve üst taraftan 7,5 D uzaklığa yerleştirilip Re sayıları değiştirilerek silindir etrafındaki akış ve ısı geçişi incelenmiştir. Çalışma sonuçlarımız ile literatürde ki diğer çalışmaları karşılaştırıp yazdığımız programın güvenilirliği incelenmiştir. Re sayıları 100, 120, 140 ve 160 alınmıştır.

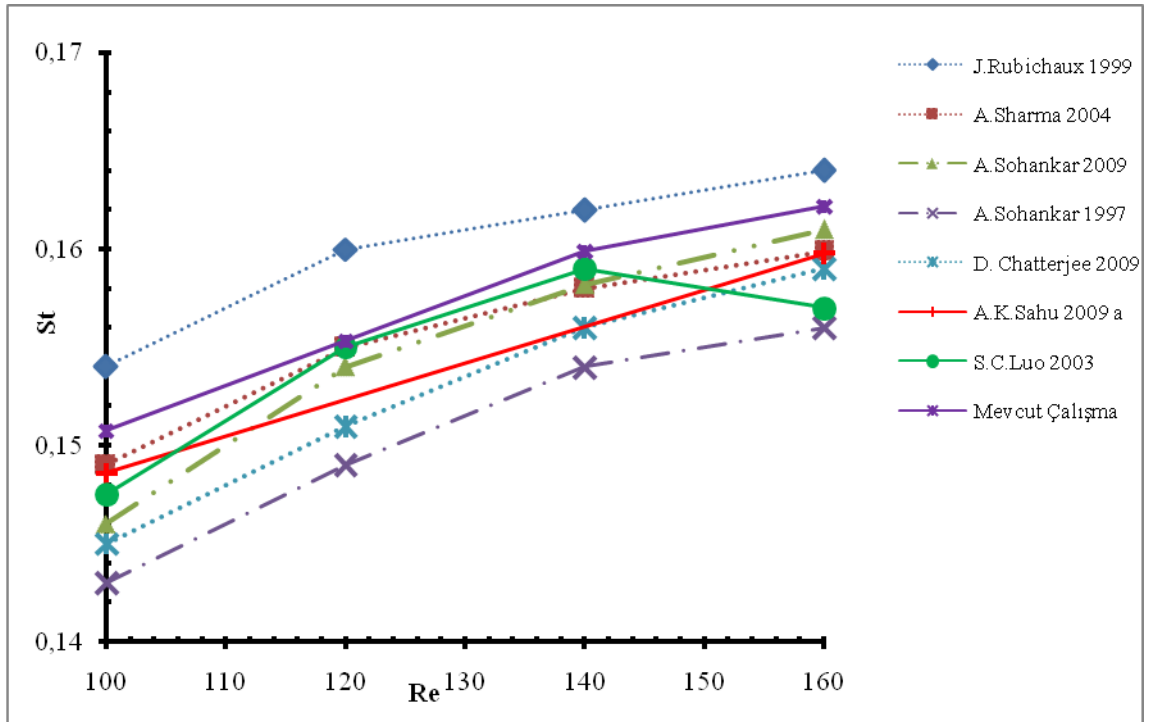
Farklı Re sayılarına göre  $CD_{mean}$ ,  $Nu_{mean}$  ve  $St$  sayılarının değişimi karşılaştırılmıştır (Şekil 3.1. - Şekil 3.3.).



Şekil 3.1. Kare kesitli tek silindir için  $CD_{mean}$  katsayısının Re sayısı ile değişimi

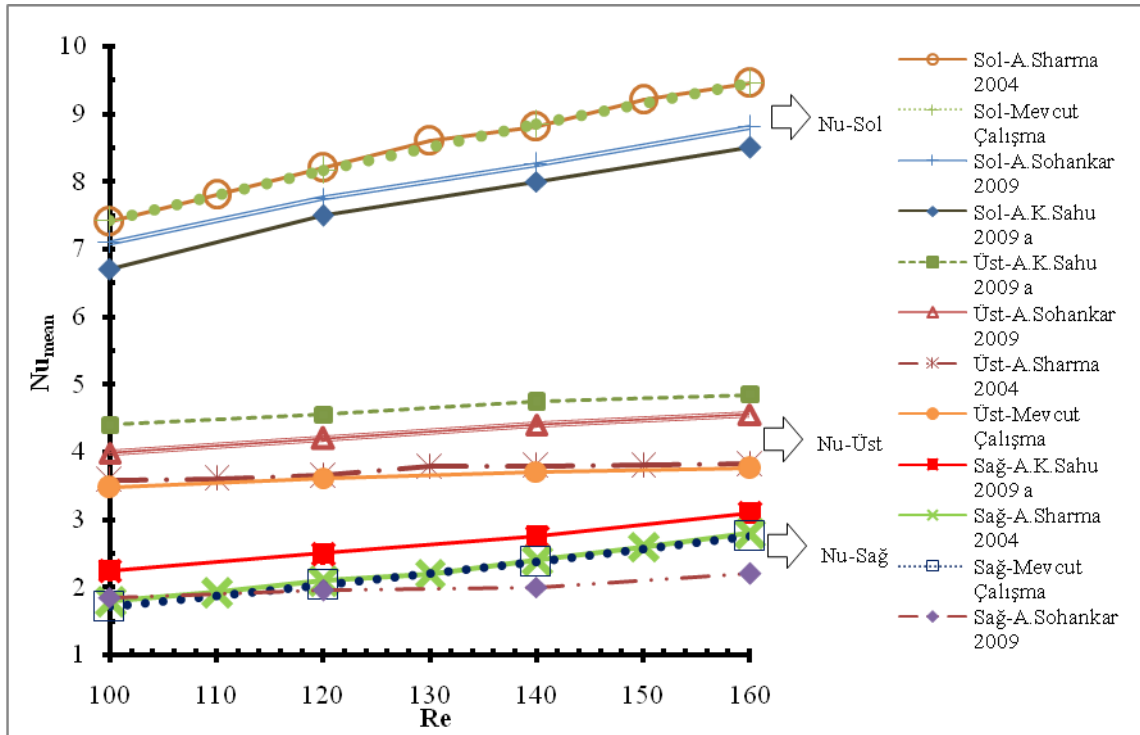


Şekil 3.2. Kare kesitli tek silindir için  $Nu_{mean}$  sayısının  $Re$  sayısı ile değişimi



Şekil 3.3. Kare kesitli tek silindir için  $St$  sayısının  $Re$  sayısı ile değişimi

Görüldüğü gibi, kendi çalışmamız ile literatürde var olan çalışmalar arasında büyük benzerlik olup küçük sapmalar meydana gelmiştir. Şekil 3.4.'de kare kesitli tek silindirin farklı yönleri için  $Nu_{mean}$  sayılarının karşılaştırılması yapılmıştır. Silindirin üst ve alt kısmındaki  $Nu_{mean}$  sayıları birbirine çok yakın çıktığı için alt bölgedeki  $Nu_{mean}$  sayıları grafikte gösterilmemiştir.



Şekil 3.4. Kare kesitli tek silindir için  $Nu_{Sol}$ ,  $Nu_{Üst}$  ve  $Nu_{Sağ}$  sayılarının  $Re$  sayısı ile değişimi

Genel olarak kare kesitli tek silindir etrafında akış ve ısı geçişi incelenip diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir sapmalar olduğundan yapılan çalışmamızın güvenilir sonuçlar verdiği açıktır.

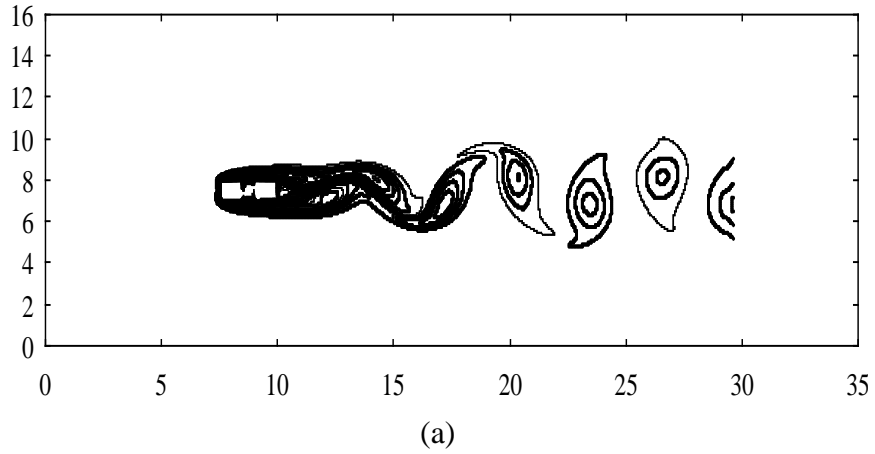
### 3.2. Kare Kesitli İki Silindir Etrafında Akış ve Isı Geçişi

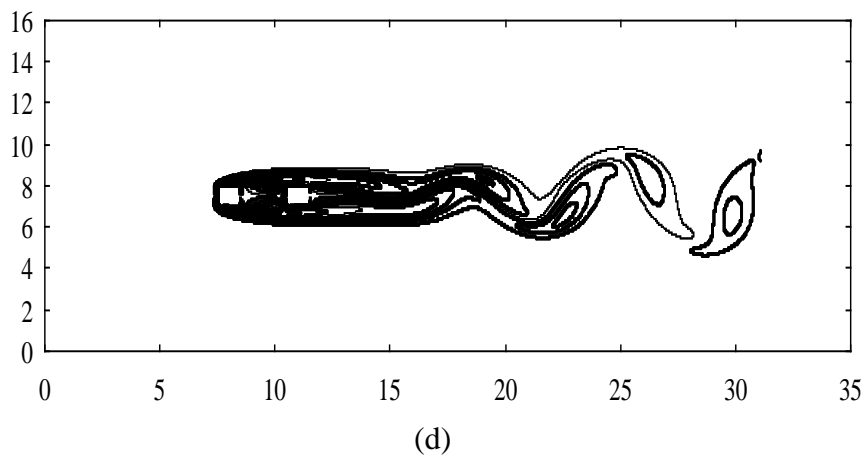
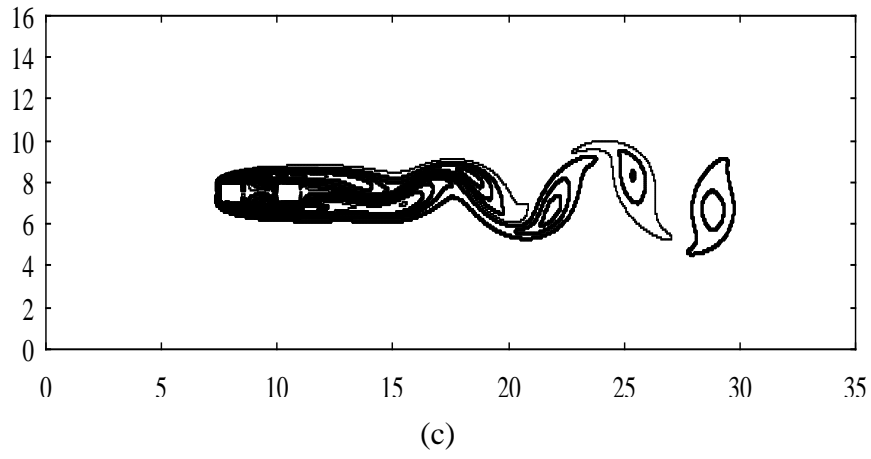
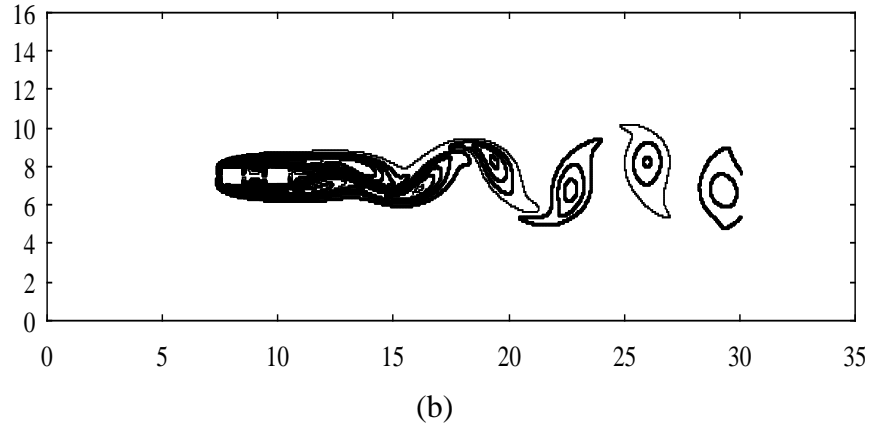
#### 3.2.1. Duvar yokken kare kesitli art arda iki silindir etrafında akış ve ısı geçişi

Silindirler arasındaki ve iz bölgesindeki akış iki silindir arasındaki mesafeye bağlı olarak değişir. Duvarın olmaması durumunda silindirler arasındaki mesafe  $0,5D$ 'den  $7D$ 'ye kadar değiştirilerek akış incelenmiştir.

##### 3.2.1.1. Girdap eğrileri

Silindirler arasındaki mesafenin silindir boyutuna oranının ( $L/D$ ) küçük olması durumunda silindirler arasında vorteks oluşmamaktadır (Şekil 3.5. (a) – (d) ). Ön silindirden ayrılan sınır tabaka arka silindirin iz bölgesinde vorteks caddesi oluşturmaktadır.

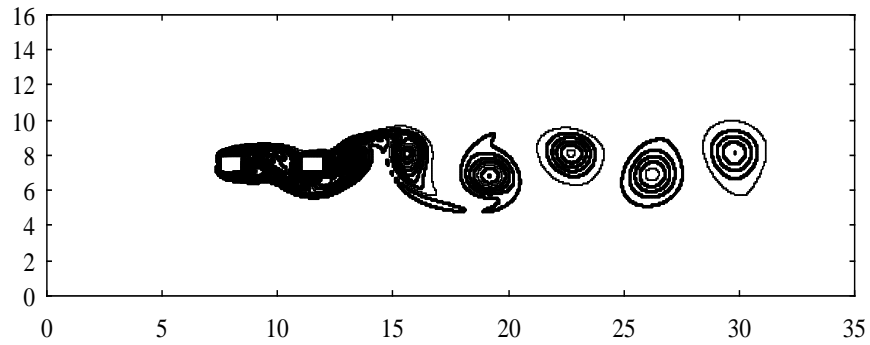




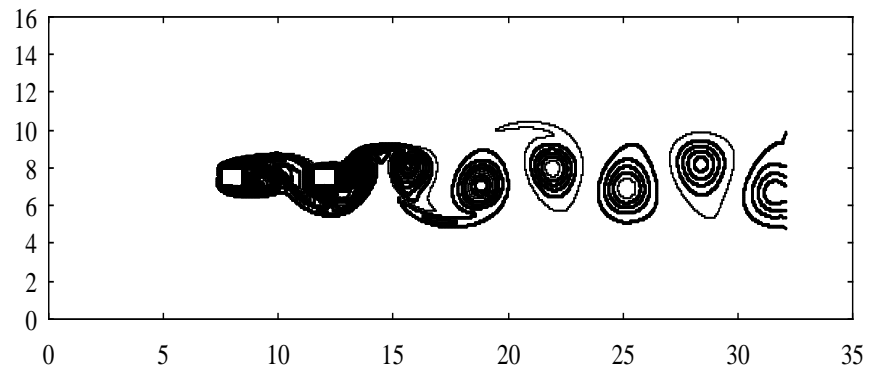
Şekil 3.5. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesindeki girdap eğrileri:  
a)  $L/D=0,5$ , b)  $L/D=1$ , c)  $L/D=1,5$ , d)  $L/D=2$ .



Silindirler arasındaki mesafe arttıkça Şekil 3.6. (a) - (b) 'de görüldüğü gibi ön silindirden ayrılan sınır tabakanın çok az bir miktarı arka silindire temas ettikten sonra silindirler arasındaki boşluğa dönmekte diğer kısmı ise arka silindirlerin arkasında vorteks caddesi oluşturmaktadır. Şekil 3.7. (a) - (e) 'den görüldüğü gibi silindirler arası mesafe  $\geq 3,5 D$  olmaya başladığında ön silindirden ayrılan sınır tabaka arka silindire temas etmeden silindirler arasında vorteks oluşmaya başlamıştır. Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'den görüldüğü gibi  $L/D$  oranının 2'den büyük değerlerinde silindirlerin yakınında iz bölgesinde vorteksler oluşmaya başlamıştır.  $L/D = 3,5$ 'da, iz bölgesinde tek sıra vorteks,  $L/D = 4$  değerinde ise çift sıra vorteks oluşmuştur.  $L/D \geq 5$  değerinde ise ileri akış bölgesinde çift sıra vorteksler birleşerek tek vortekse dönüşmektedir.

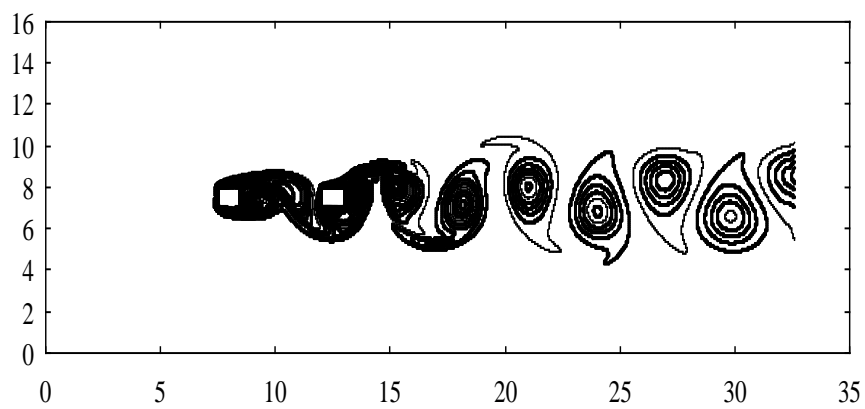


(a)

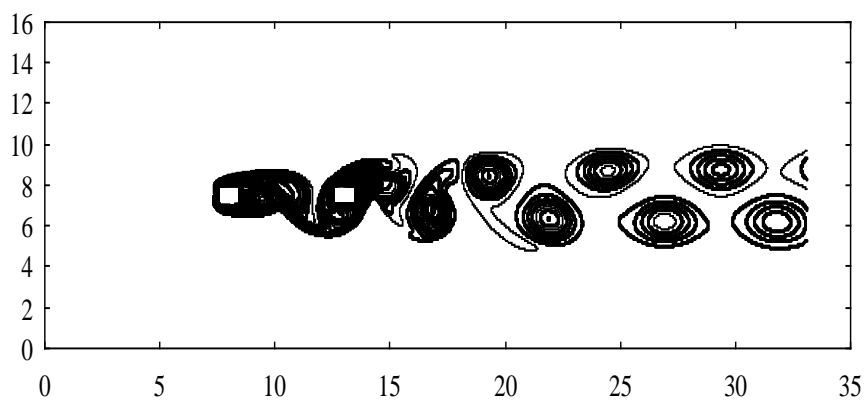


(b)

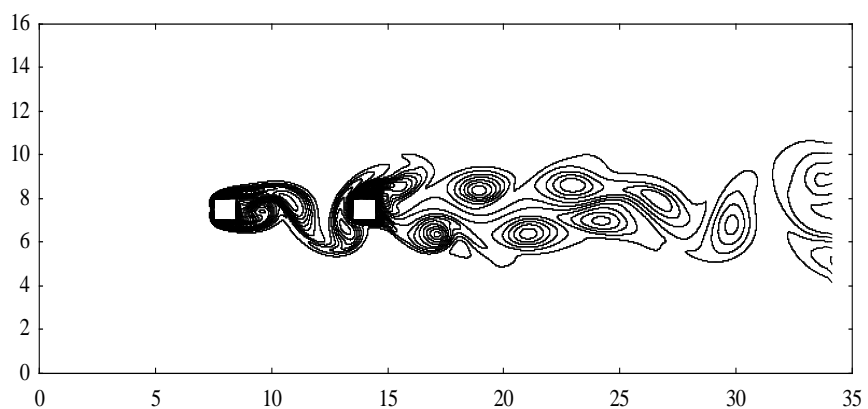
Şekil 3.6. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesinde girdap eğrileri:  
a)  $L/D=2,5$ , b)  $L/D=3$ .



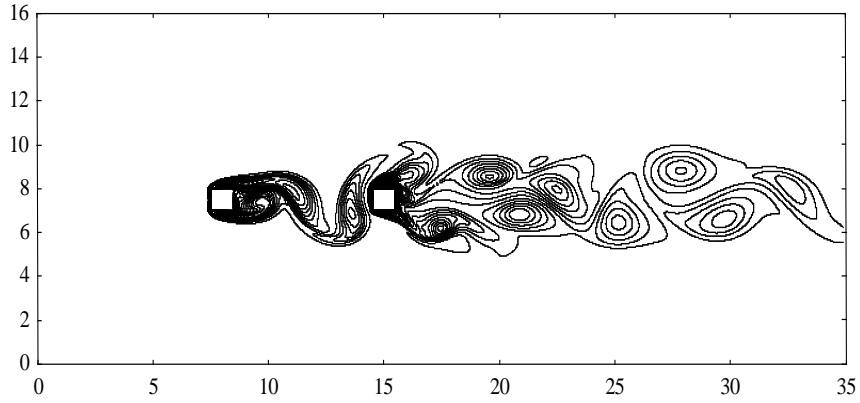
(a)



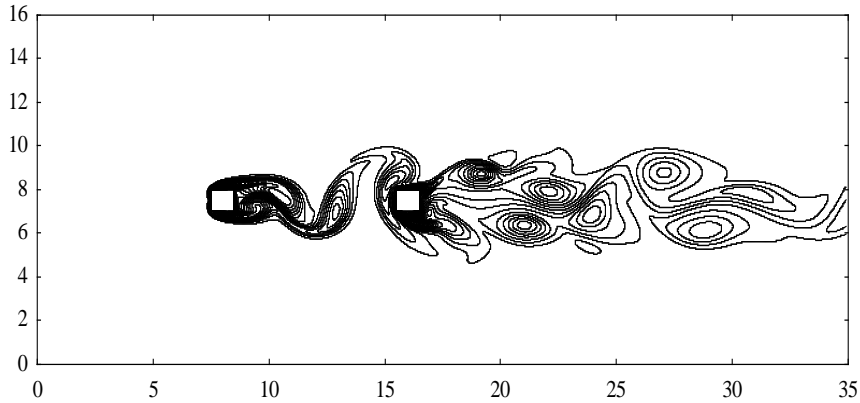
(b)



(c)



(d)



(e)

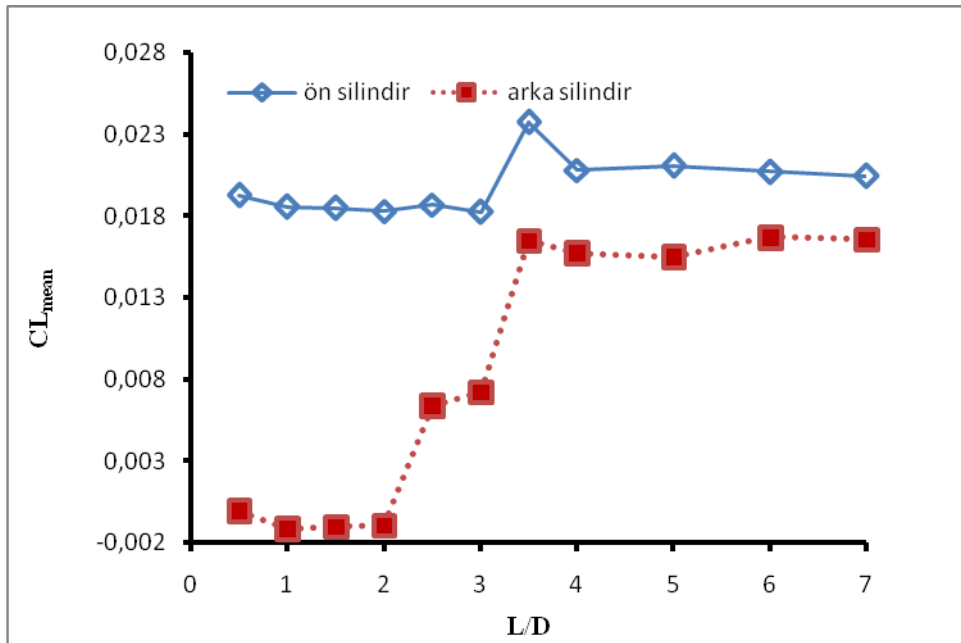
Şekil 3.7. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesinde girdap eğrileri:  
a)  $L/D=3,5$ , b)  $L/D=4$ , c)  $L/D=5$ , d)  $L/D=6$ , e)  $L/D=7$ .

### 3.2.1.2. Kaldırma kuvvetinin değişimi

Her iki silindir üzerindeki ortalama kaldırma kuvvet katsayısı ( $CL_{1mean}$ ,  $CL_{2mean}$ ) ve kaldırma kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değerinin ( $CL_{1rms}$ ,  $CL_{2rms}$ )  $L/D$  oranı ile değişimi Şekil 3.8. ve Şekil 3.9.'da verilmiştir.

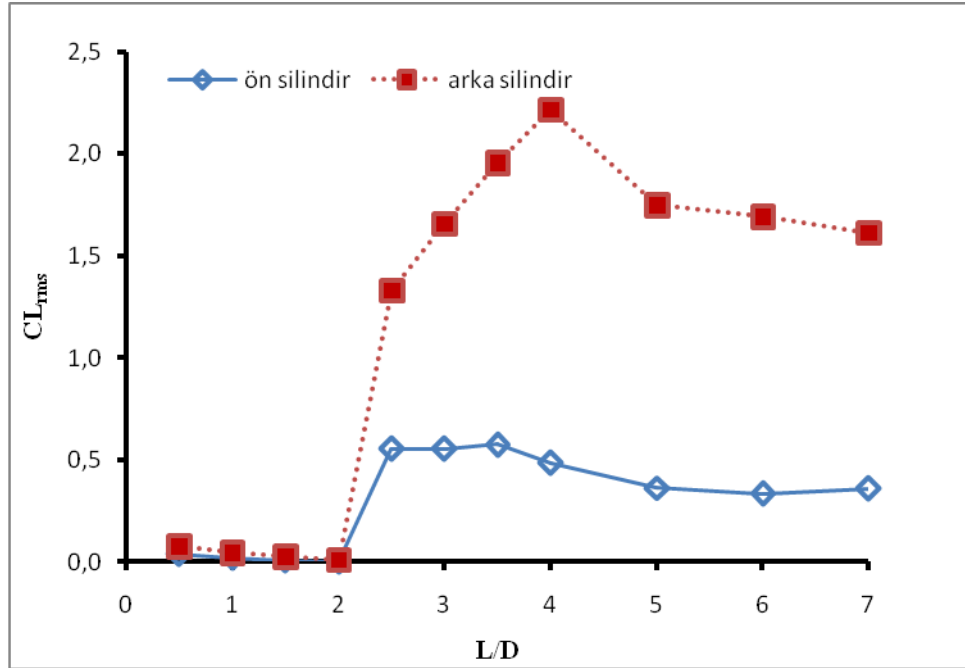
$L/D \leq 2$  olması durumunda ön ve arka silindirdeki  $CL_{mean}$  değeri küçük olmakla beraber arka silindirdeki değerler ön silindirdeki değerlere göre daha küçük ve aynı

zamanda sıfırın altında bulunmuştur.  $L/D = 2,5$  olduğunda arka silindir için  $CL_{mean}$  ve  $CL_{rms}$  değerinde artış gözlenmiştir çünkü silindirler arasında vorteksler oluşmaya başlamıştır.  $L/D = 3,5$  olduğunda ön silindirden ayrılan sınır tabaka ikinci silindire temas etmeden silindirler arasında vorteks oluşturmaya başladığından her iki silindir içinde en yüksek  $CL_{mean}$  değerine ulaşılmıştır.  $L/D$  değeri daha da arttırıldığında Şekil 3.7.'den de görüldüğü gibi arka silindire çarpan vortekslerin şiddeti azaldığından  $CL_{mean}$  değerinde tekrar bir düşüş oluşmuştur.



Şekil 3.8. Ortalama kaldırma kuvvet katsayısının  $L/D$  oranı ile değişimi

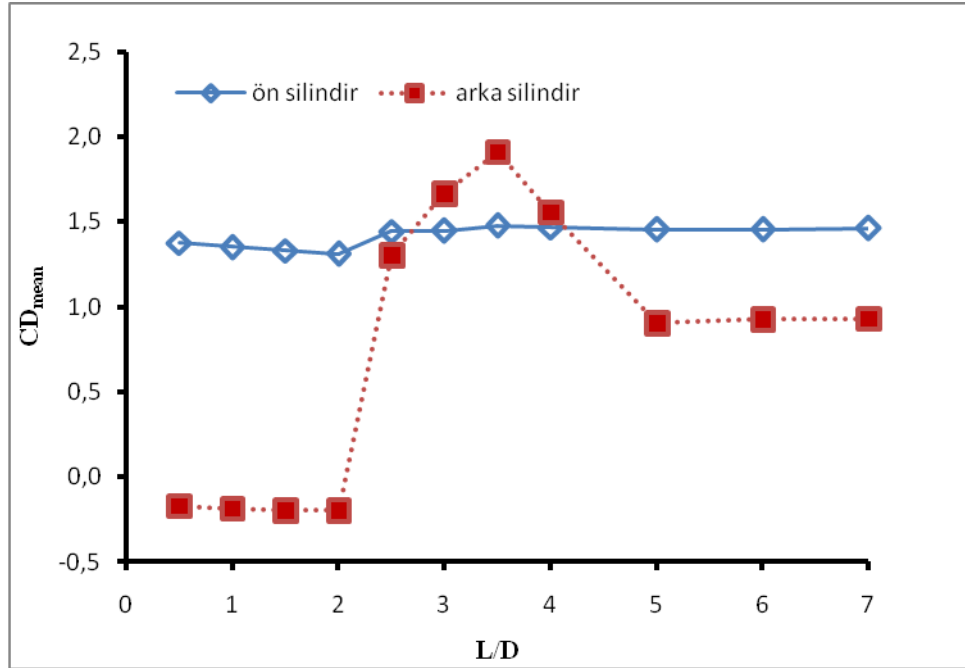
$L/D = 3,5$  olduğunda arka silindir üzerindeki ortalama kaldırma kuvveti katsayısı en yüksek değerini almasına rağmen, ön silindirdekenden küçük değerde kalmaktadır. Kare ortalama karekök değerleri  $L/D \leq 2$  için her iki silindirde yaklaşık olarak aynı kalmasına rağmen,  $L/D > 2$  için arka silindirde daha büyük değerlerdedir.



Şekil 3.9. Kaldırma kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değerinin L/D oranıyla değişimi

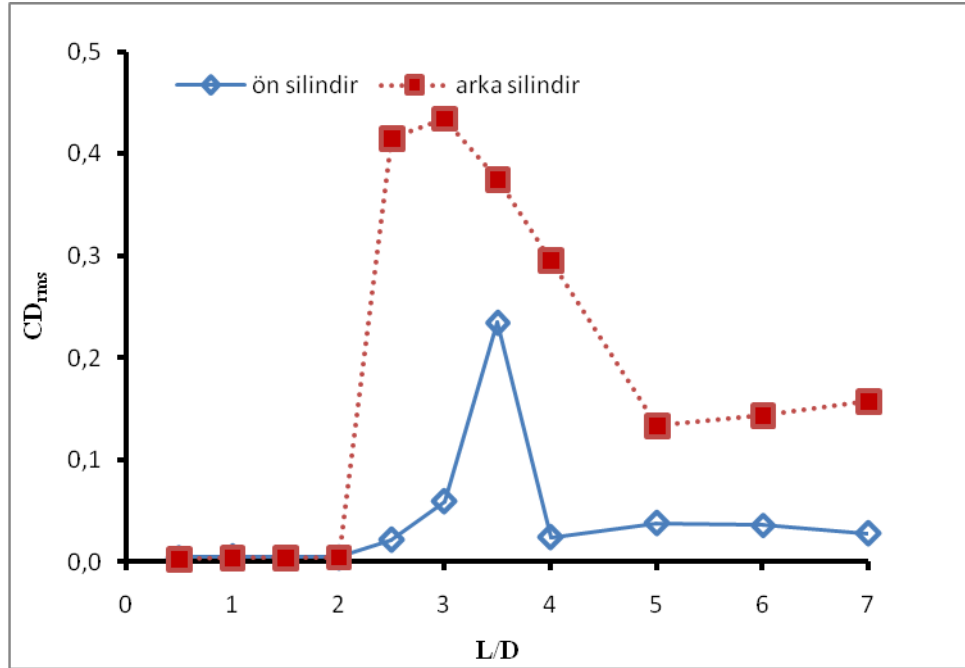
### 3.2.1.3. Direnç kuvvetinin değişimi

Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi  $L/D \leq 2$  olması durumunda arka silindir üzerinde çok küçük değerlerde direnç kuvveti ( $CD_{mean}$ ) meydana gelmektedir. Aynı zamanda bu değerler negatif olarak bulunmuştur.  $L/D = 2,5$  değerine geldiğinde arka silindir direnç kuvvet katsayısı ani olarak yükselirken ön silindirdeki direnç kuvvet katsayısı hafif bir artış göstermiştir. En yüksek direnç kuvvet katsayısına ön ve arka silindir için  $L/D = 3,5$  değerinde ulaşılmıştır.  $L/D = 2,5$  ve 3 değerlerinde ön silindirden ayrılan sınır tabaka arka silindir ön yüzeyine temas edip bir kısmının arka silindir arkasına gittiği için arka silindir üzerindeki direnç kuvvetinde artma meydana gelir.



Şekil 3.10. Ortalama direnç kuvvet katsayısının L/D oranı ile değişimi

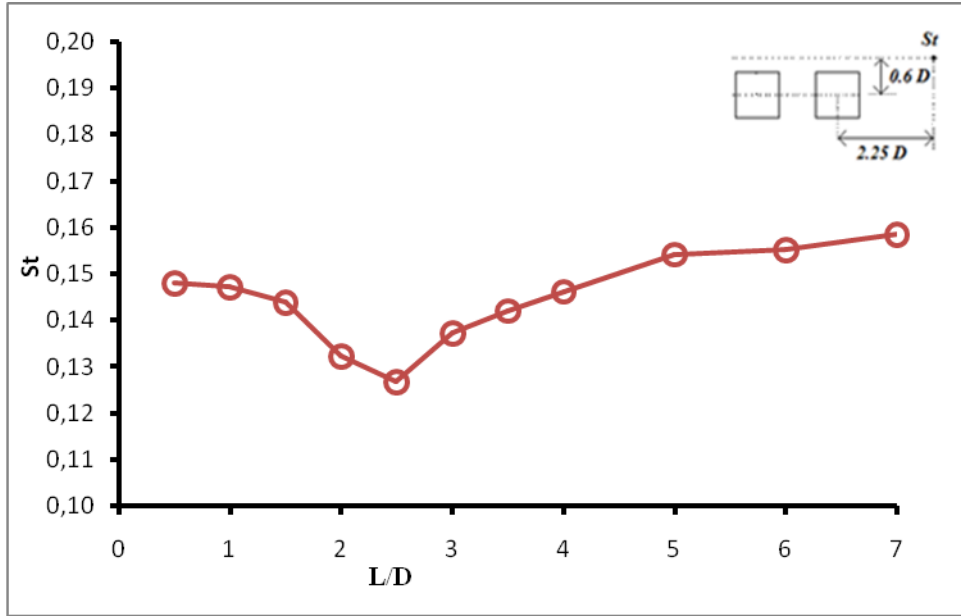
Şekil 3.11.'de görüldüğü gibi direnç kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değeri ( $CD_{rms}$ )  $L/D \leq 2$ 'ye kadar ön ve arka silindir için yaklaşık sabit değerlerdedir.  $L/D = 2,5$  değerini aldığı anda arka silindir ve ön silindirde bir artış olup arka silindirdeki artış ön silindirdekenden daha büyük değerdedir. Arka silindirde en yüksek  $CD_{rms}$  değerini  $L/D = 3$ 'de alırken ön silindirde  $L/D = 3,5$ 'da almıştır.



Şekil 3.11. Direnç kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değerinin L/D oranıyla değişimi

#### 3.2.1.4. Strouhal sayılarının değişimi

2. silindirin merkezinden x yönünde 2,25 D, y yönünden 0,6 D uzaklıktaki noktada ölçülen hız değerlerinden elde edilen Strouhal sayısının, L/D oranıyla değişimi Şekil 3.12.'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi L/D oranının küçük değerlerinde silindirler arasında vorteks oluşmadığı durumda St sayıları düşük değerlerdedir. En düşük değerini vortekslerin yeni yeni oluşmaya başladığı L/D = 2,5 oranında almıştır daha sonra St sayısı da tekrar artışa geçmiştir.



Şekil 3.12. St sayısının L/D oranıyla değişimi

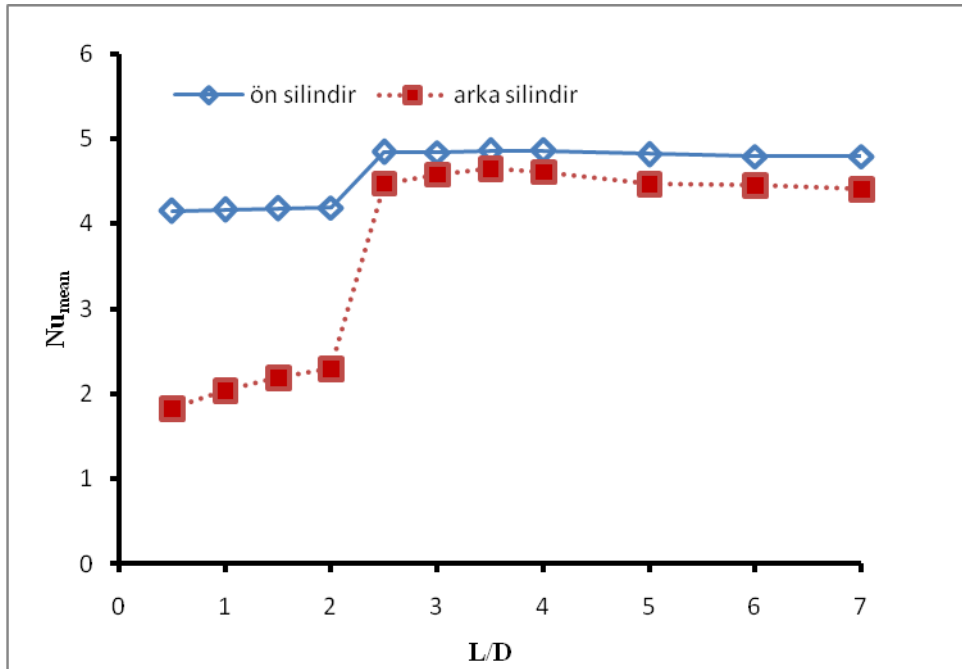
### 3.2.1.5. Nusselt sayılarının değişimi

Her iki silindir içinde ortalama Nu sayısı ( $Nu_{mean}$ ) ve Nu sayısının kare ortalama karekök değerinin ( $Nu_{rms}$ ) değişimi Şekil 3.13 ve Şekil 3.14.'de verilmiştir.  $L/D \leq 2$ 'ye kadar Nu değeri küçükken  $L/D = 2,5$  değerinde ani bir artış gösterip en yüksek değerini  $L/D = 3,5$  'da almıştır.  $L/D \geq 2,5$  değerinden sonra her iki silindir üzerindeki  $Nu_{mean}$  sayıları bir birine yaklaşmasına rağmen arka silindir üzerindeki daha küçük değerlerdedir.

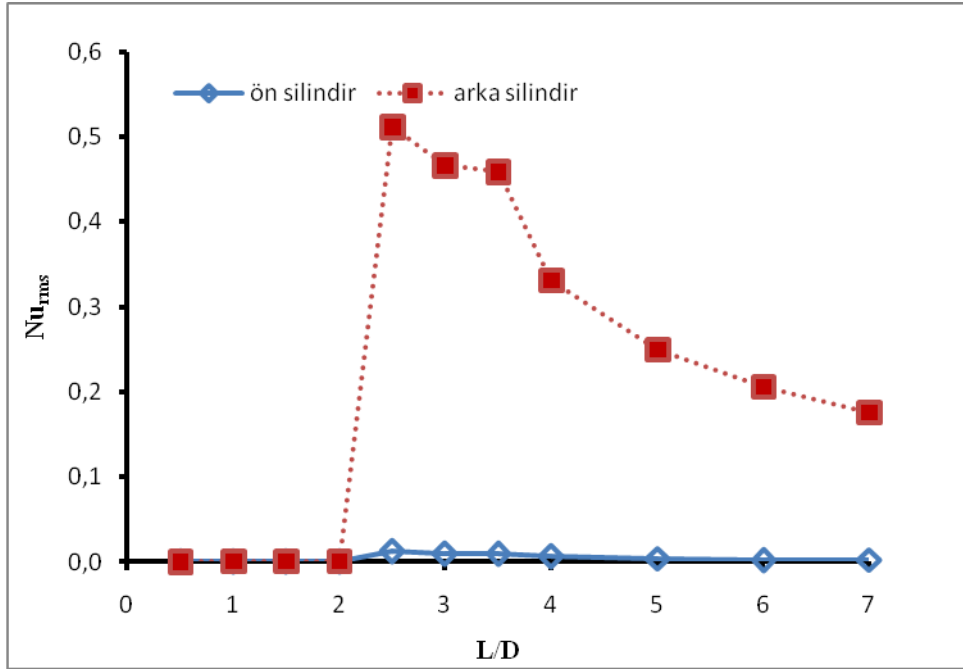
Şekil 3.14'e göre  $Nu_{rms}$  değeri her iki silindir içinde  $L/D \leq 2$ 'ye kadar yaklaşık sıfır değerini almıştır.  $L/D = 2,5$ 'da arka silindir üzerinde hızlı bir artış olurken ön silindir üzerinde çok az bir artış olmuştur. Ön silindirdeki  $Nu_{rms}$  değeri  $L/D$  arttıkça tekrar sıfıra yaklaşır. Arka silindir üzerindeki değerde ise hızlı bir azalma olmasına rağmen ön silindirdekine göre daha yüksek değerlerde kalmıştır.



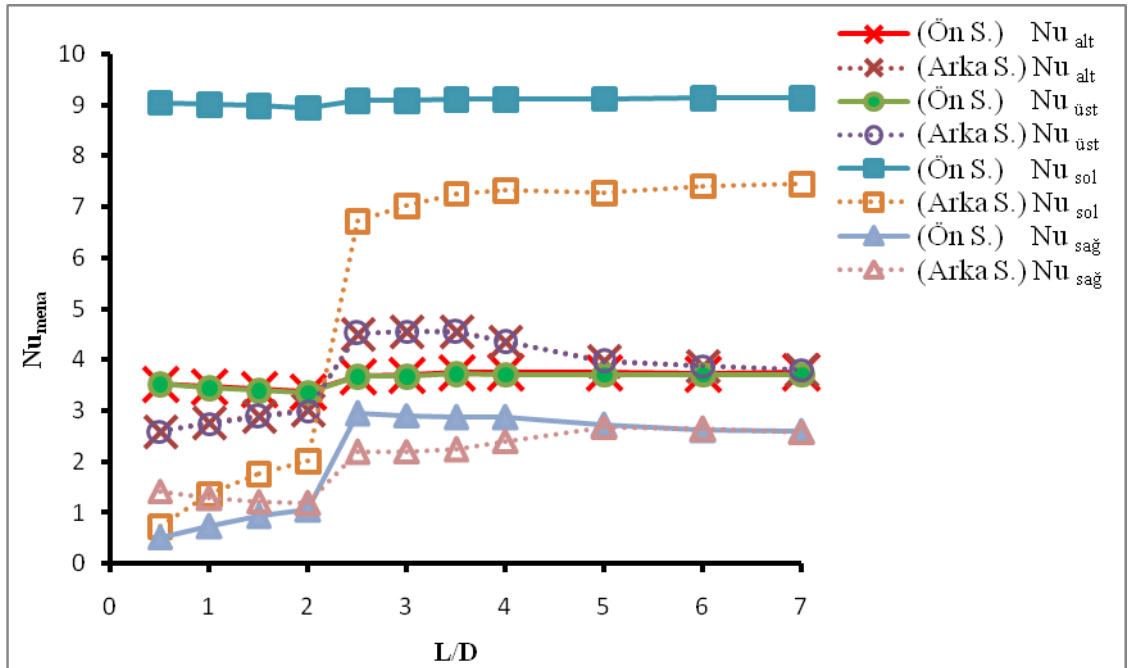
Şekil 3.15. ve Şekil 3.16.'da her iki silindirin üst, alt, sağ ve sol taraflarındaki  $Nu_{mean}$  ve  $Nu_{rms}$  değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.15.'e göre ön silindirin  $Nu$  sol ve arka silindirin  $Nu$  sol değerleri en yüksek çıkarken, ön silindirin  $Nu$  sağ ve arka silindirin  $Nu$  sağ değerleri en düşük çıkmıştır. Ön silindirin  $Nu$  üst ile  $Nu$  alt ve arka silindirin  $Nu$  üst ile  $Nu$  alt değerleri de birbirine eşit çıkmıştır. Arka silindirin  $Nu$  üst ve  $Nu$  alt değerleri ön silindirin  $Nu$  üst ve  $Nu$  alt değerlerinden büyük çıkmıştır. Ön silindirin  $Nu$  sol değeri  $L/D$  nin artışından çok az etkilenmiştir. Tüm  $Nu$  değerleri  $L/D \leq 2$ 'ye kadar küçük değerlerde iken  $L/D = 2,5$  değerinde artış göstermiştir.



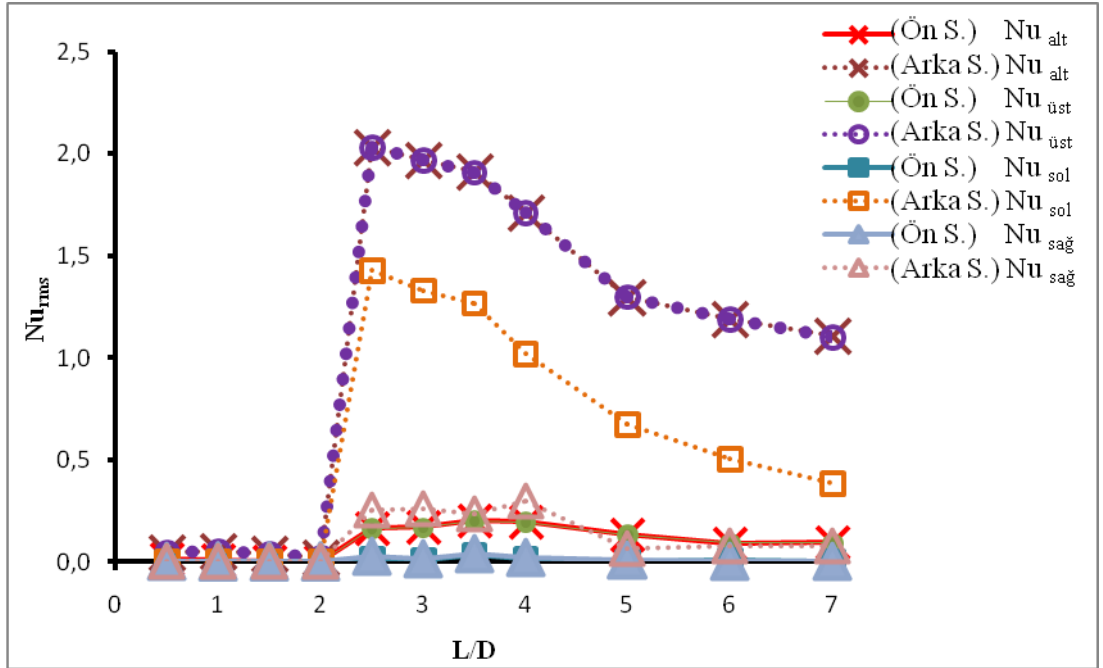
Şekil 3.13. Ortalama nusselt sayısının  $L/D$  oranıyla değişimi



Şekil 3.14.  $Nu_{rms}$  değerinin  $L/D$  oranıyla değişimi



Şekil 3.15. Silindirlerin alt, üst, sol ve sağ taraflarındaki  $Nu$  sayılarının  $L/D$  oranıyla değişimi



Şekil 3.16. Silindirlerin alt, üst, sol ve sağ taraflarındaki  $Nu_{rms}$  sayılarının  $L/D$  oranıyla değişim

Şekil 3.16.'da görüldüğü gibi tüm  $Nu$  sayılarının kare ortalama karekök değerleri  $L/D \leq 2$ 'ye kadar ön ve arka silindir için yaklaşık sabit ve sıfır değerindedir. En büyük değerlerini  $L/D = 2,5$ 'da arka silindirin üst ve alt yüzeylerinde almıştır. Arka silindirin sol yüzeyinde de  $Nu$  sayılarının kare ortalama karekök değerlerinin yüksek oldukları görülmektedir. Ön silindirde ise bu değerler bütün  $L/D$  oranlarında oldukça küçük değerlerdedir.

### 3.2.2. Duvar varken kare kesitli art arda iki silindir etrafında akış ve ısı geçişi

Bu bölümde alt tarafta duvar varken silindirler arasındaki mesafe ve silindirin alt duvara olan uzaklığı değiştirilerek blok etkisinin ve silindir-duvar uzaklığının akış karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Simülasyonlarda Reynolds sayısı 150 seçilmiştir. Silindirler arasındaki mesafe  $L$ , yükseklik ve genişliği  $D$ , duvara uzaklığı  $G$  olan art arda yerleştirilmiş kare kesitli iki silindir arasında ve iz bölgesindeki akış

sayısal olarak incelenmiştir. Silindirler arasındaki akışı incelemek için  $L$ ,  $1,5 D$ ,  $2,5 D$  ve  $4 D$  alınırken, silindirlerin duvara olan uzaklıklarının silindir genişliğine oranı ( $G/D$ )  $0,7$ 'den  $6$ 'ya kadar değiştirilmiştir.

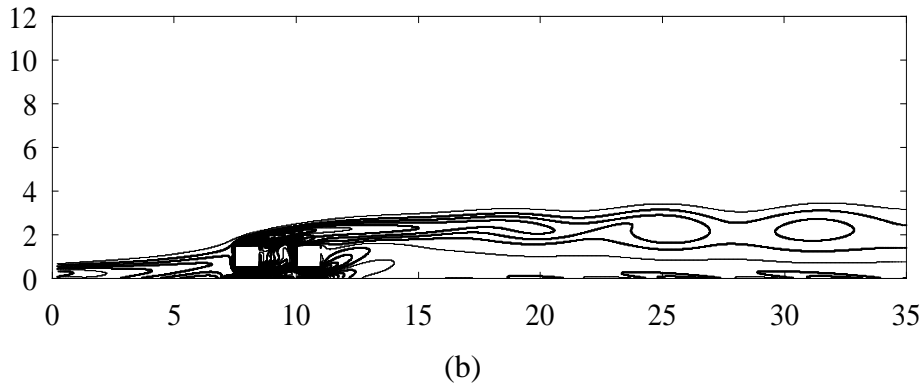
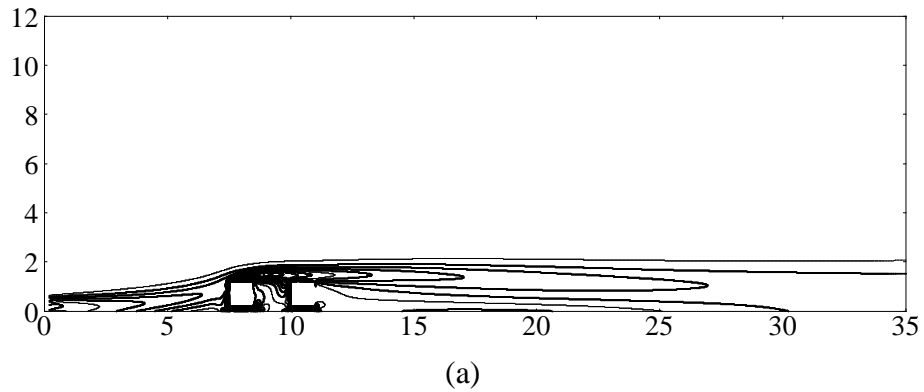
### 3.2.2.1. Girdap eğrileri

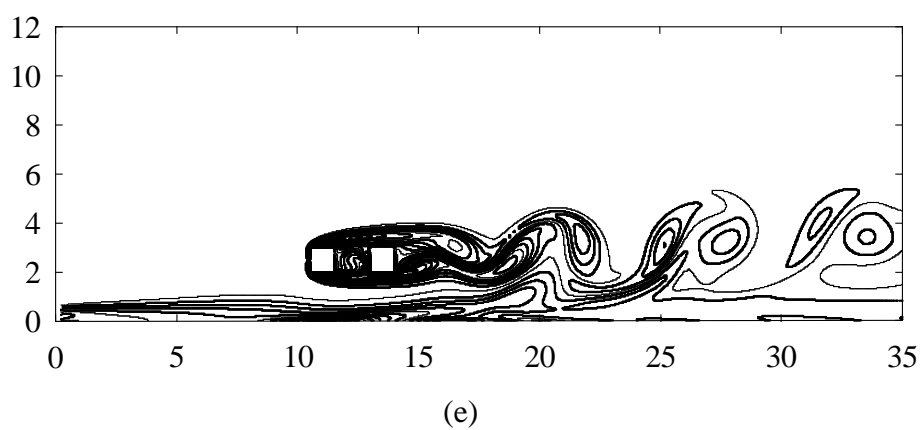
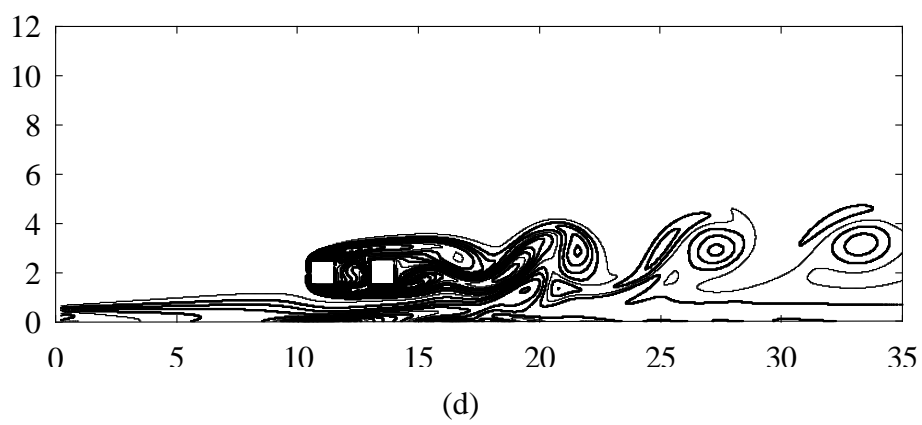
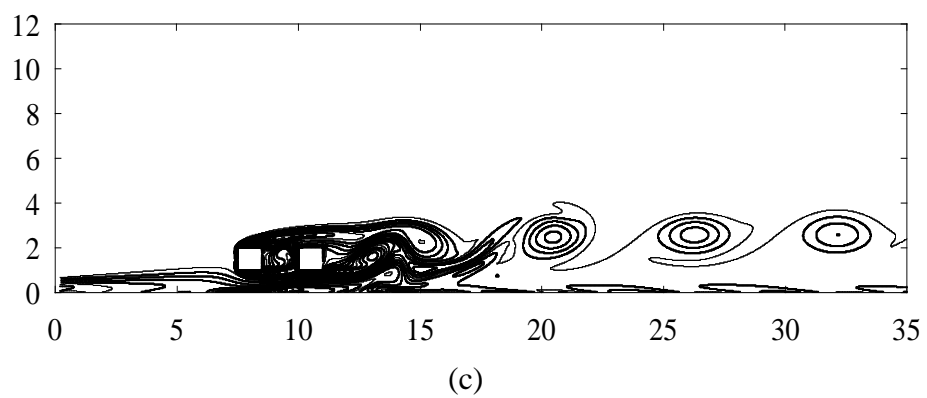
Silindirler arasındaki ve iz bölgesindeki akış iki silindir arasındaki mesafe ve silindir alt duvara uzaklığına bağlı olarak değişir. Şekil 3.17'de silindirler arasındaki mesafe  $1,5 D$ , Şekil 3.18.'de silindirler arasındaki mesafe  $2,5 D$  ve Şekil 3.19.'da silindirler arasındaki mesafe  $4 D$  iken iz bölgesinde oluşan girdap eğrileri gösterilmiştir.

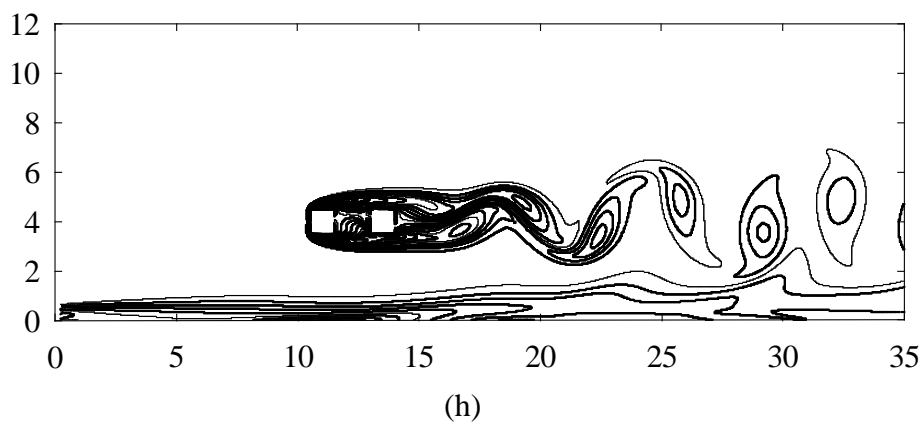
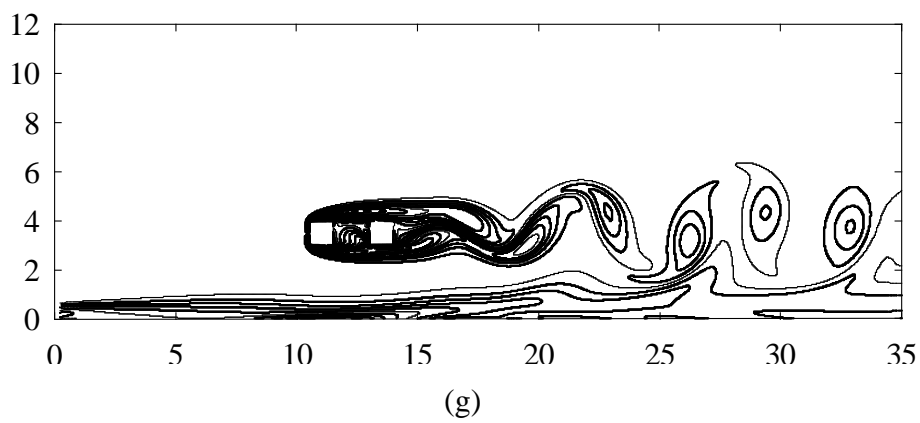
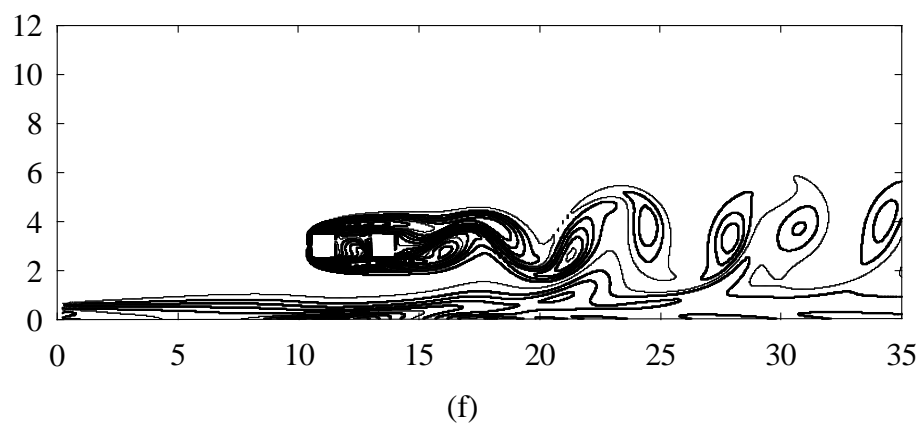
Silindirler arasındaki mesafe  $1,5 D$ ,  $2,5 D$  ve  $4 D$  durumlarında (Şekil 3.17. - 3.19. ):

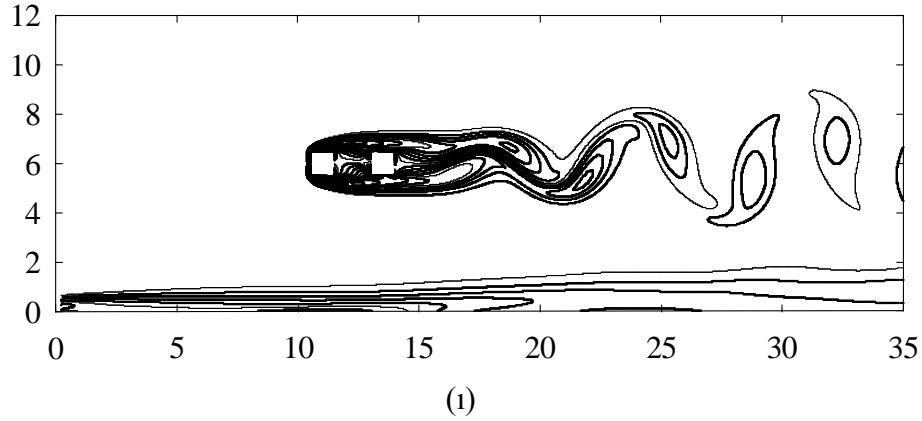
- $G/D$  oranı  $0,7$  ve  $1$ 'de silindirler arasındaki mesafe farklı olsa bile akışlar birbirleriyle çok benzer oluşmaktadır.
- $G/D$  oranı  $0,7$  ve  $1$ 'de silindirlerin üst yüzeyinden ayrılan sınır tabaka düz bir şekilde iz bölgesine yayıldığı görülmektedir.
- $G/D$  oranının  $1,5$ 'dan küçük değerlerinde silindirler, plakanın ön tarafında oluşan sınır tabakanın içinde kalmaktadır.  $1,5$  ve üzerinde ise sınır tabakanın dışındadır.
- $G/D > 2$  değerlerinde alt duvardan oluşan sınır tabaka silindirler arasındaki vorteks ile çok zayıf etkileşimde bulunuyor.
- $G/D > 2$  değerlerinde arka silindir iz bölgesinde daha kuvvetli vortekslerin oluştuğu görülmektedir.
- $G/D$  oranı  $6$ 'da silindirlerin aşağı iz bölgesinde alt duvardan oluşan sınır tabaka silindirden ayrılan sınır tabaka ile birleşmemektedir.

Şekil 3.17’de silindirler arası uzaklığın  $1,5 D$  olması durumunda silindir ile duvar etkileşimi sonucu silindirlerin arasındaki ve arka akış bölgesindeki vorteks yapısı gösterilmektedir.  $G/D = 0,7$  durumunda vorteks oluşmamaktadır.  $G/D = 1$  durumunda ön silindirin alt kenarından ayrılan sınır tabaka iki silindir arasında çok az bir kıvrım yapmaktadır.  $G/D = 1,5$  durumunda ön silindirin alt kenarından ayrılan sınır tabaka ön silindire değdikten sonra silindirler arasında kıvrılmakta ve arka silindirin arkasında vorteks oluşturmaya başlamaktadır.  $G/D > 2$  durumunda plakadan ayrılan sınır tabaka silindirler arasındaki etkileşime katılmayıp arka silindirin arkasında silindirlerden ayrılan sınır tabaka ile etkileşimde bulunmaktadır. Silindir duvar aralığının artması ile bu etkileşim azalmaktadır. Genel olarak ise silindirler arası mesafenin küçük olmasından dolayı ön silindirden ayrılan sınır tabakanın çok az bir kısmı silindirler arasında kıvrılmakta, çoğu ise arka silindirin arkasındaki vortekslere katılmaktadır.





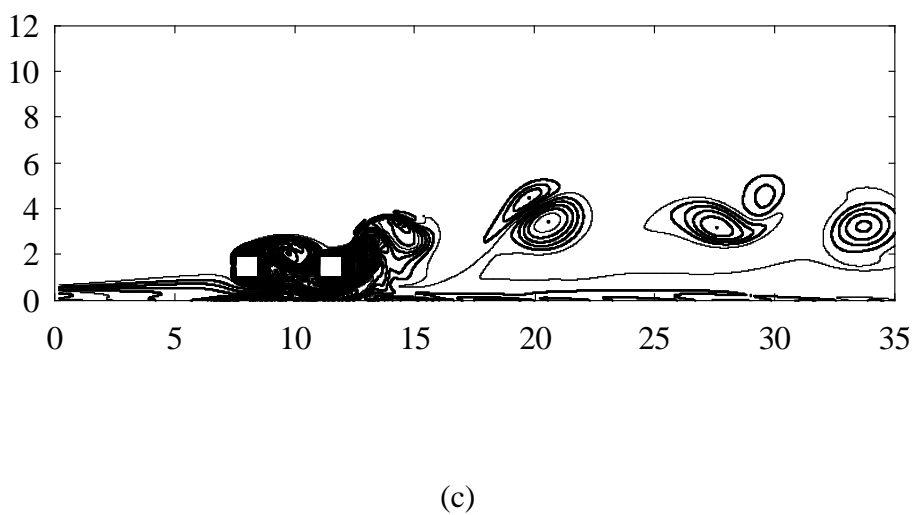
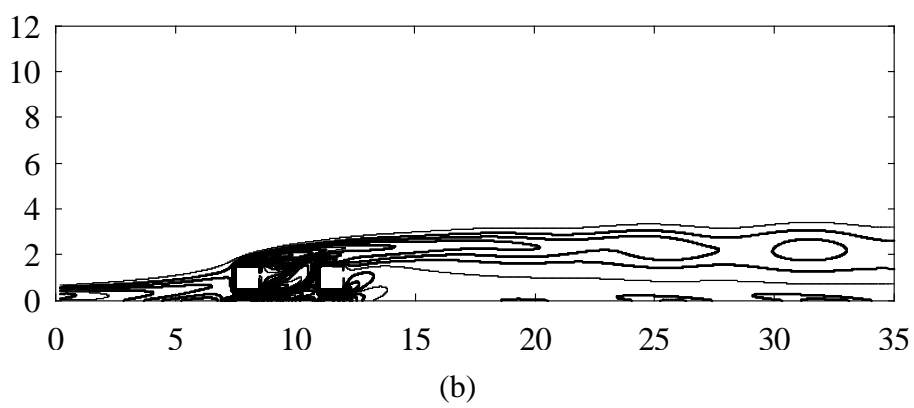
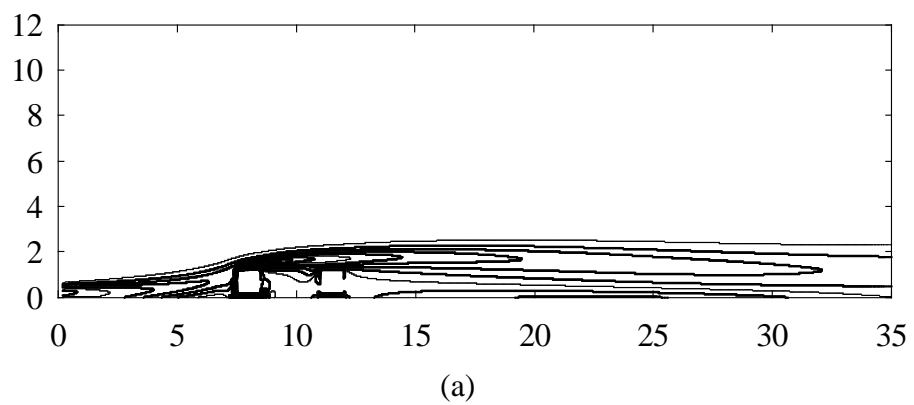


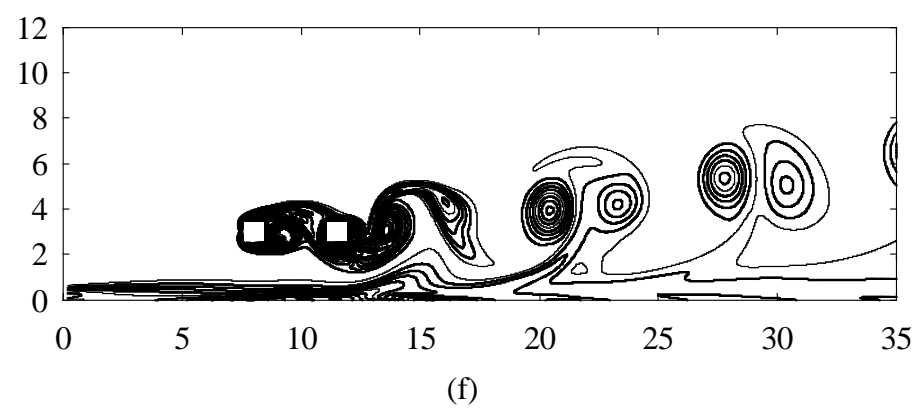
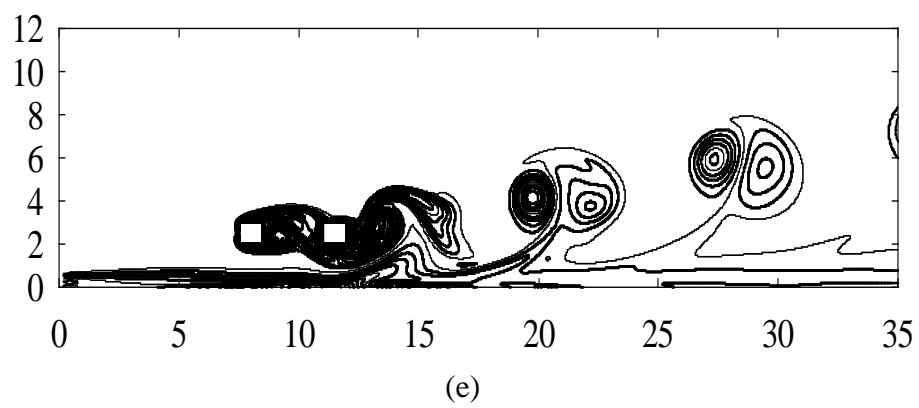
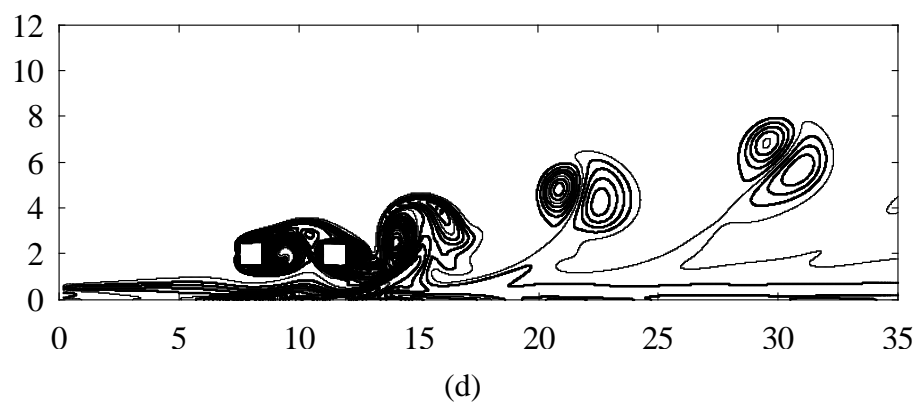


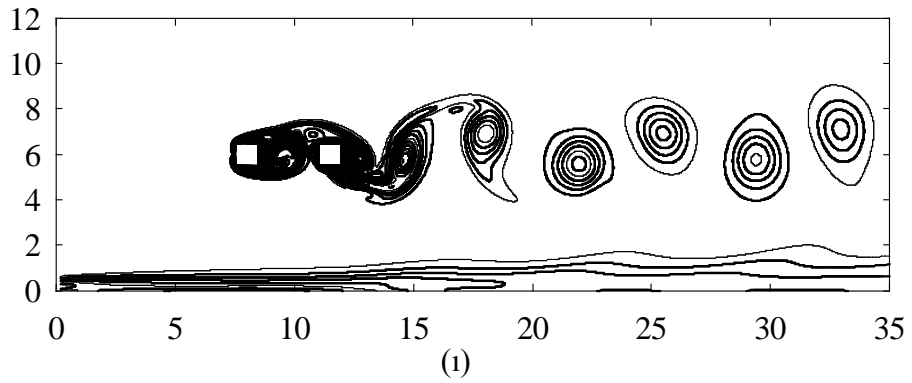
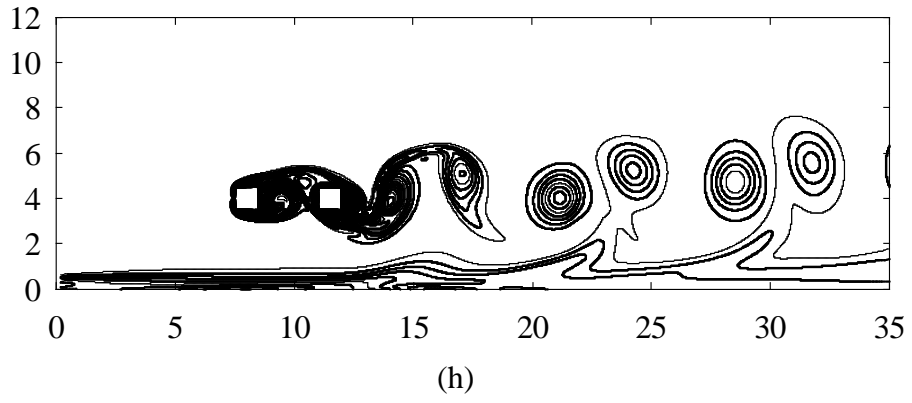
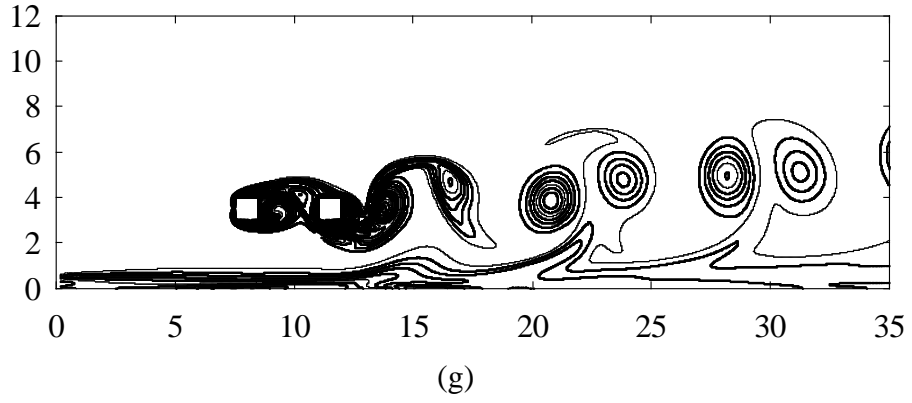
Şekil 3.17. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesindeki girdap eğrileri ( $L=1,5 D$ ): a)  $G/D=0,7$ , b)  $G/D=1$ , c)  $G/D=1,5$ , d)  $G/D=2$ , e)  $G/D=2,5$ , f)  $G/D=3$ , g)  $G/D=3,5$ , h)  $G/D=4$ , ı)  $G/D=6$ .

Şekil 3.18. 'de ise silindirlerin arasındaki mesafenin  $2,5 D$  olması durumunda silindirlerin arasındaki ve arka akış bölgesindeki vorteks yapısını göstermektedir.  $G/D$   $0,7$  durumunda, vorteks oluşmamaktadır.  $G/D = 1$  durumunda ön silindirin alt kenarından ayrılan sınır tabaka iki silindir arasında kıvrılmaktadır.  $G/D = 1,5$  durumunda, ön silindirin kenarlarından ayrılan sınır tabaka arka silindire değdikten sonra silindirler arasında kıvrılmakta, arka silindirin arkasında ise vorteks çifti oluşturmaktadır. Silindir ile duvar arasındaki boşluğun  $2 - 2,5$  olması durumunda silindirler arasında ön silindirden ayrılan sınır tabaka kıvrılmakta, alt duvarın üzerindeki sınır tabaka ise hemen arka silindirin arkasında, bu silindirden ayrılan sınır tabakaya katılmaktadır.  $G/D = 3$  ve  $3,5$  olması durumlarında alt duvardan ayrılan sınır tabaka daha ileri akış bölgesinde silindirlerden ayrılan sınır tabaka ile etkileşimde bulunmaktadır. Silindir duvar aralığının artması ile bu etkileşim azalmaktadır.



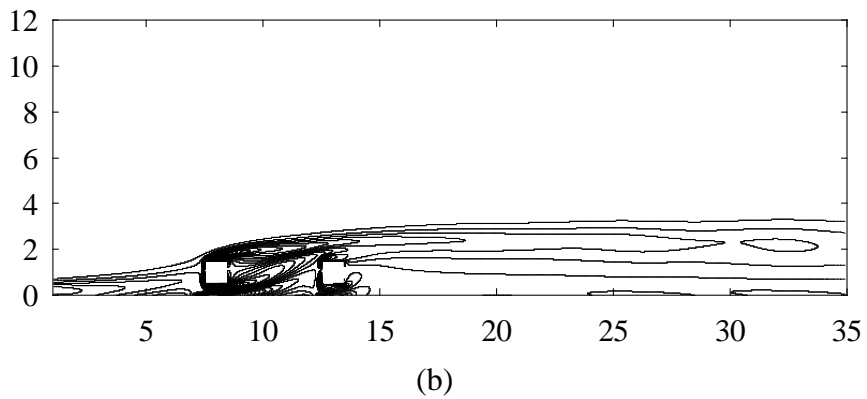
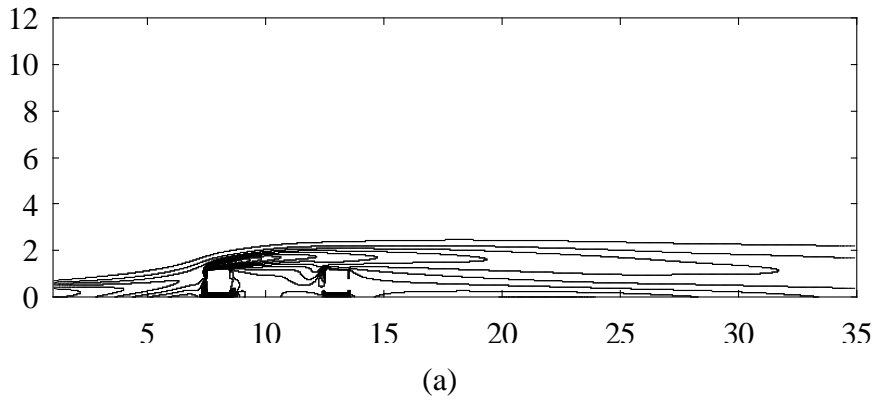


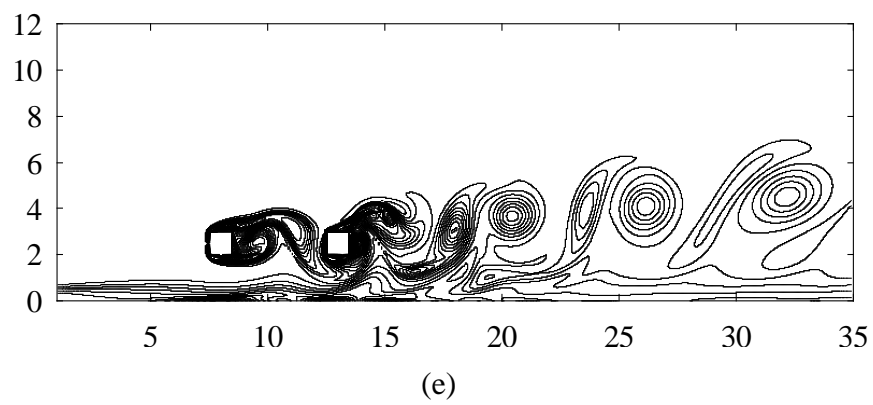
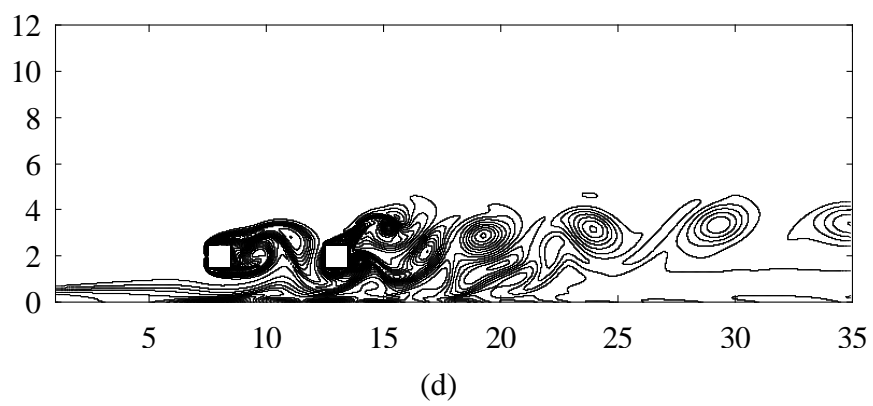
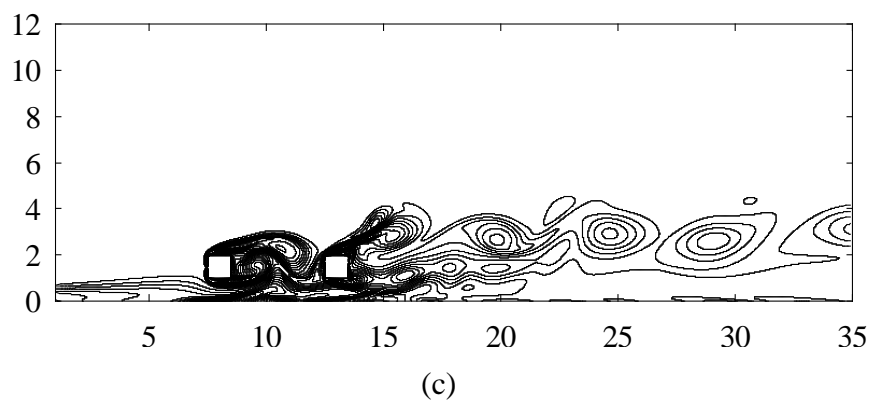


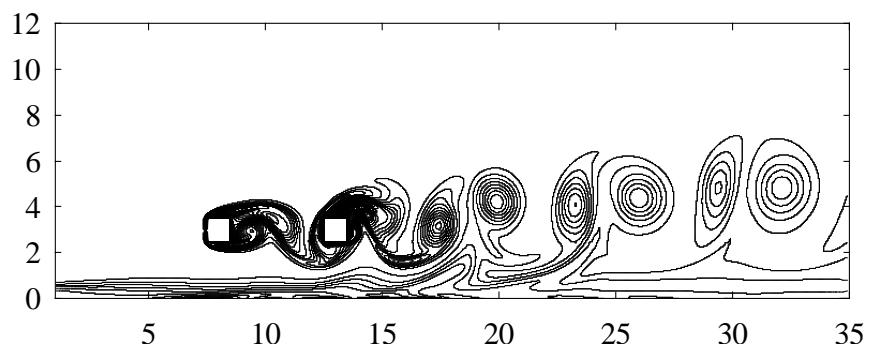


Şekil 3.18. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesindeki girdap eğrileri ( $L=2,5 D$ ): a)  $G/D=0,7$ , b)  $G/D=1$ , c)  $G/D=1,5$ , d)  $G/D=2$ , e)  $G/D=2,5$ , f)  $G/D=3$ , g)  $G/D=3,5$ , h)  $G/D=4$ , i)  $G/D=6$ .

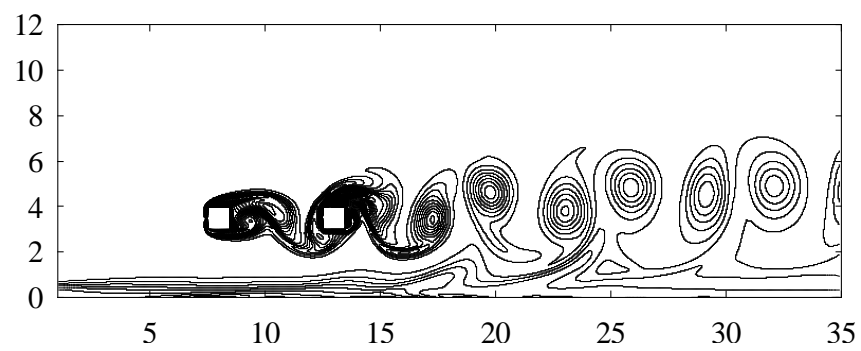
Şekil 3.19. silindirler arası uzaklığın 4 D olması durumunda silindir ile duvarın etkileşimini göstermektedir. Burada  $L/D = 2,5$  olması durumuna benzer olarak  $G/D = 0,7$  ve 1 için silindirler arasında ve aşağı akış bölgesinde vorteks oluşmamaktadır.  $G/D = 1,5$  durumunda ön silindirden ayrılan sınır tabaka silindirler arasında kıvrıldıktan sonra arka silindire çarpmaktadır. Duvar üzerindeki sınır tabaka ile silindirden ayrılan sınır tabakalar hemen arka silindirin arkasında karmaşık bir vorteks yapısı oluşturmaktadır. İleri akış bölgesinde düzenli vorteksler görülmektedir. Daha büyük duvar silindir aralıklarında ( $G/D > 2$ ) her iki silindir arasında da vorteks oluştuğu görülmektedir.  $L/D = 2,5$  haline benzer şekilde silindir duvar aralığı arttıkça ( $2,5 \leq G/D \leq 4$ ) duvardan ayrılan sınır tabaka ile silindirden oluşan vorteks etkileşimi daha ileri akış bölgesine doğru kaymakta ve duvardan ayrılan sınır tabakanın diğer vortekslere katılımı zayıflamaktadır.  $G/D = 6$  halinde aşağı akış bölgesinde vortekslerin iki sıra haline geldiği görülmektedir.



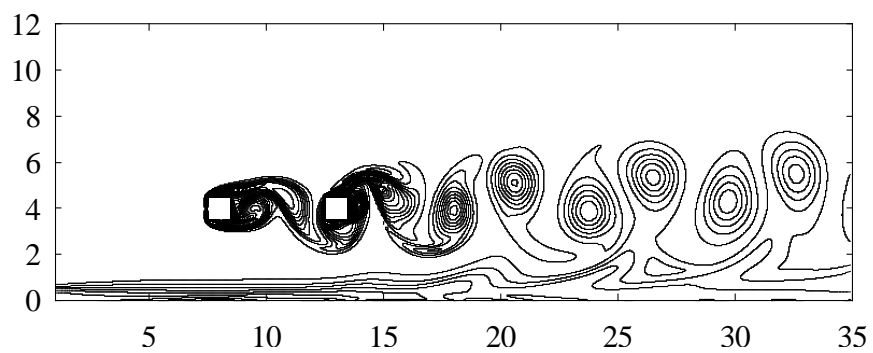




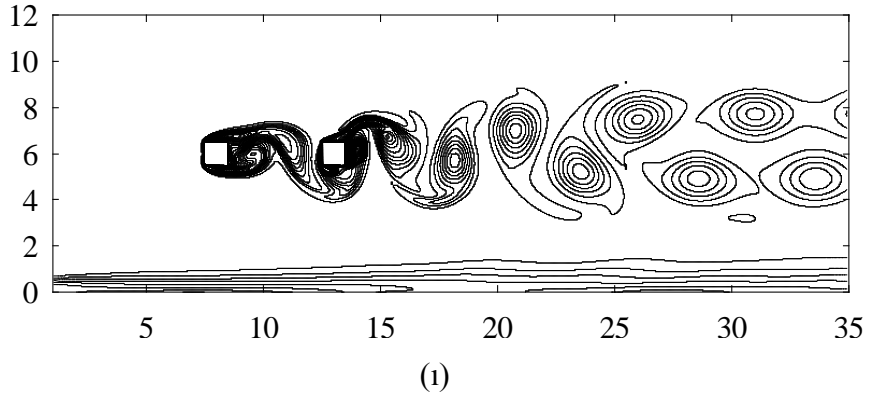
(f)



(g)



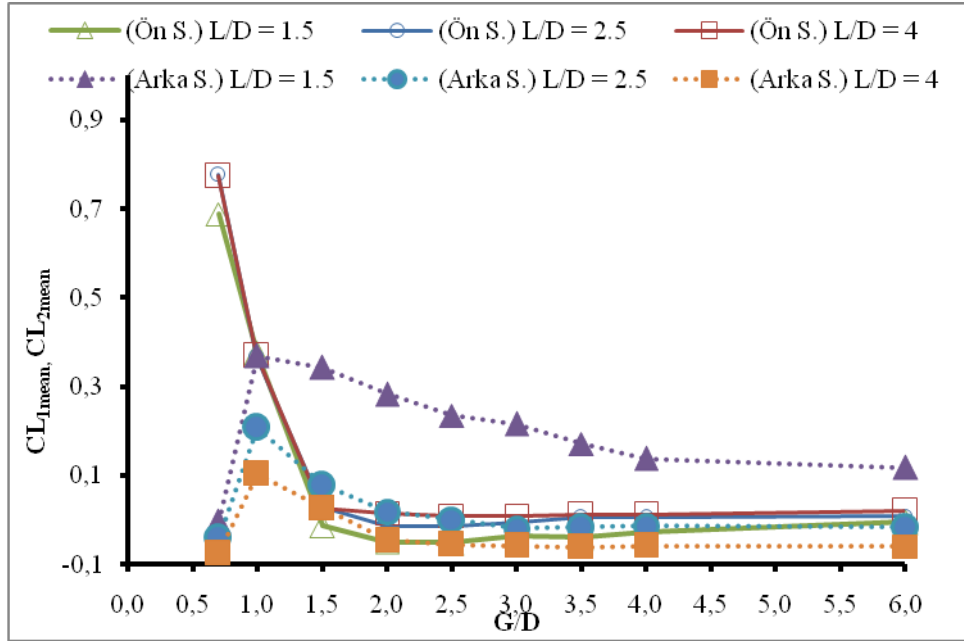
(h)



Şekil 3.19. Art arda yerleştirilmiş iki silindirin iz bölgesindeki girdap eğrileri ( $L=4 D$ ): a)  $G/D=0,7$ , b)  $G/D=1$ , c)  $G/D=1,5$ , d)  $G/D=2$ , e)  $G/D=2,5$ , f)  $G/D=3$ , g)  $G/D=3,5$ , h)  $G/D=4$ , ı)  $G/D=6$ .

### 3.2.2.2. Kaldırma kuvvetinin değişimi

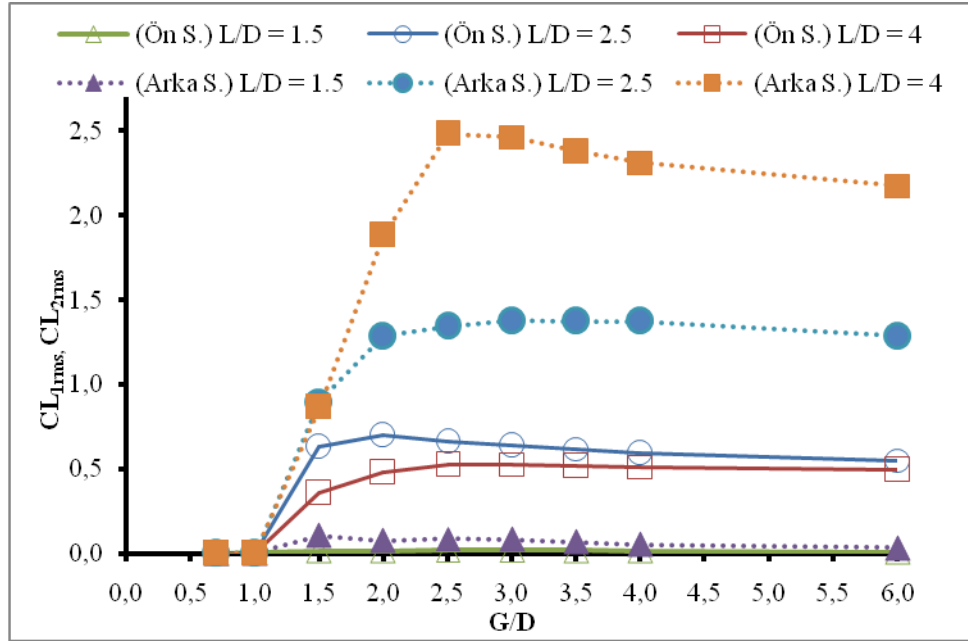
Şekil 3.20.'de silindirler arası mesafe  $1,5 D$ ,  $2,5 D$  ve  $4 D$  olması durumunda farklı  $G/D$  oranlarında  $CL_{1mean}$  ve  $CL_{2mean}$  değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi ön silindirler en yüksek  $CL_{1mean}$  değerlerini  $G/D = 0,7$  de alırken  $G/D$ ' nin artmasıyla aldıkları değer hızla düşmektedir.  $G/D = 1,5$  değerinden sonra silindirler arası mesafe  $L/D = 4$  olması durumunda  $CL_{1mean}$  değeri yaklaşık olarak sabit kalmakta, diğer silindirler arası uzaklıklarda ise hafif değişmektedir. Arka silindir üzerindeki  $CL_{2mean}$  değeri ise  $G/D = 1$ 'de maksimum değerini almakta sonra  $G/D$  nin artmasıyla  $G/D \leq 2,5$  değerine kadar hızlı bir şekilde azalmaktadır.  $G/D \geq 3$  den sonra  $L/D = 1,5$  da azalmaya devam etmesine rağmen büyük silindir aralıklarında ( $L/D = 2,5$  ve  $4$ ) yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



Şekil 3.20. Ön ve arka silindirlere gelen kaldırma kuvvet katsayısının G/D oranıyla değişimi

Şekil 3.21.'de silindirler arası mesafe 1,5 D, 2,5 D ve 4 D olması durumunda farklı G/D oranlarında ön ve arka silindirlere gelen kaldırma kuvvet katsayılarının kare ortalama karekök değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Her iki silindirde de silindirler arası mesafenin 1,5 D olması durumunda kaldırma kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değerinin çok küçük değerlerde olduğu görülmektedir. L/D' nin artması ile bu katsayıda artmaktadır. G/D' nin küçük değerlerinde  $CL_{rms}$  katsayısının artışı büyük olmasına rağmen G/D' nin büyük değerlerinde yavaş olarak azalma eğilimindedir. En büyük değerler L/D = 4 durumunda arka silindir üzerinde gözlemlenmektedir.



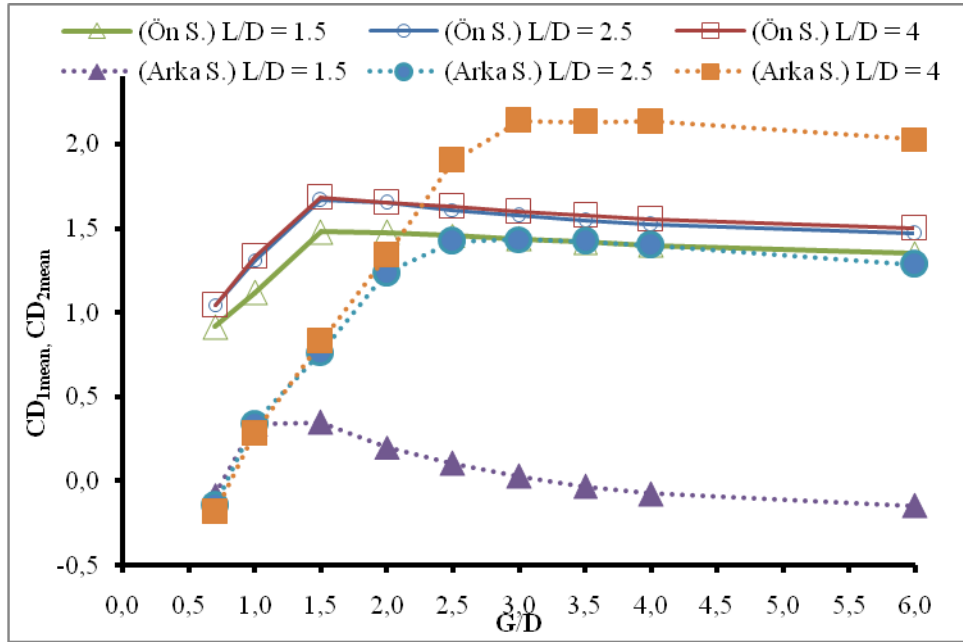


Şekil 3.21. Ön ve arka silindirlerdeki ortalama kaldırma kuvvet katsayısının G/D oranıyla değişimi

### 3.2.2.3. Direnç kuvvetinin değişimi

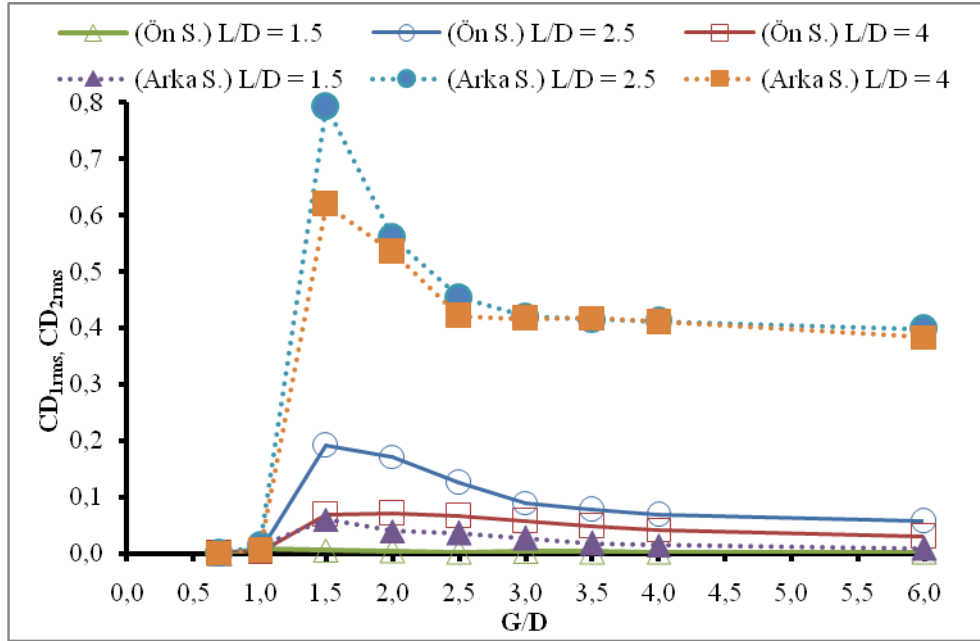
Silindirlerin değişik duvar uzaklıklarında elde edilen  $CD_{mean}$  ve  $CD_{rms}$  değerleri Şekil 3.22. ve Şekil 3.23.'de verilmiştir. Şekil 3.22.'den de görüldüğü gibi  $G/D \leq 1,5$  olana kadar ön silindir üzerinde meydana gelen ortalama direnç kuvvet katsayısı ( $CD_{1mean}$ ) değeri artarken  $G/D = 2$  olduktan sonra azalmaya başlamıştır. Çünkü  $G/D = 1,5$  değerinde vorteksler oluşmaya başlamış ve  $G/D \geq 2$  olduğunda duvardan oluşan sınır tabaka ön silindire değmeden arka silindirin iz bölgesinde geçmeye başladığı içinde tekrar düşüş meydana gelmiştir. Arka silindir üzerindeki ortalama direnç kuvvet katsayısı ( $CD_{2mean}$ ) değeri, silindirler arası mesafenin  $1,5 D$  olması durumunda en yüksek değerini  $G/D = 1,5$  da alırken silindirler arası mesafenin  $2,5 D$  ve  $4 D$  olması durumunda  $G/D = 3$  iken en yüksek değerini almıştır çünkü belirtilen  $G/D$  oranlarından sonra duvardan oluşan sınır tabaka ikinci silindir arkasındaki vortekslere katılmadan yoluna devam etmiştir. Silindirler arası mesafe  $4 D$  durumunda, en yüksek  $CD_{2mean}$

değerini arka silindir üzerinde olmasının diğer bir nedeni de silindirler arasında vorteks oluşumudur.



Şekil 3.22. Ön ve arka silindirlerin ortalama direnç kuvvet katsayısının G/D oranı ile değişimi

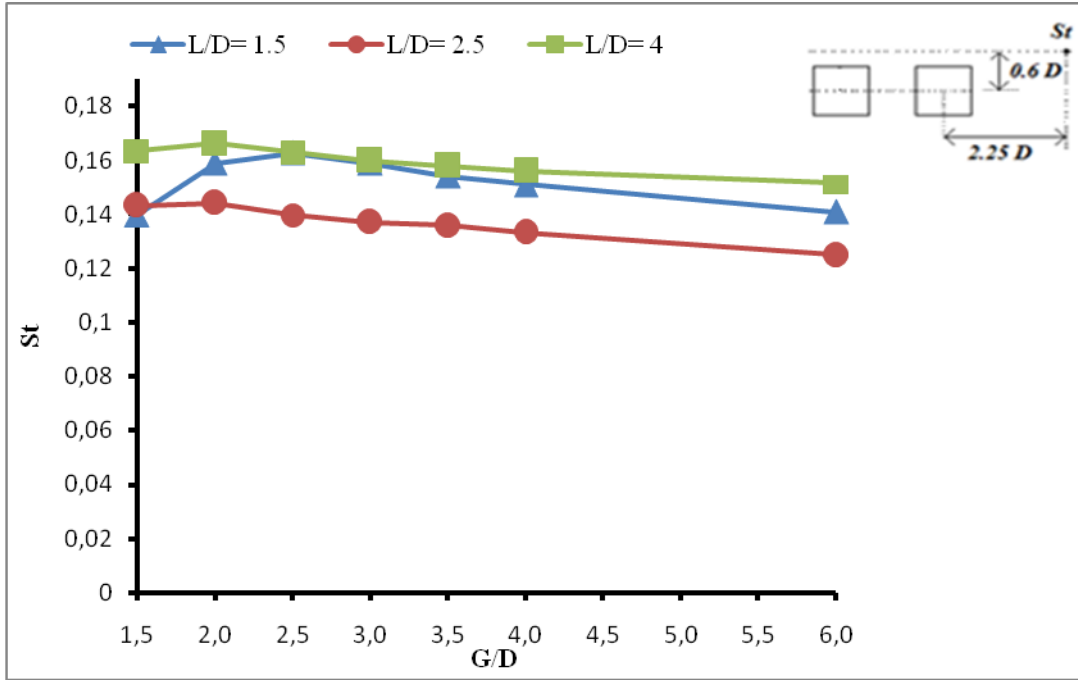
Şekil 3.23.' de silindirler arası mesafe 1,5 D, 2,5 D ve 4 D olması durumunda farklı G/D oranlarında ön ve arka silindirlere gelen direnç kuvvet katsayılarının kare ortalama karekök değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. G/D = 0,7 ve 1'de her iki silindirin tüm silindir aralıklarındaki  $CD_{rms}$  değerleri yaklaşık olarak sıfırdır. Her iki silindirde de silindirler arası mesafenin 1,5D olması durumunda  $CD_{rms}$  değerinin çok küçük değerlerde olduğu görülmektedir. L/D' nin artması ile bu katsayıda artmaktadır. En büyük değerleri L/D = 2,5 ve 4 oranında arka silindirler almışlardır. Bu değerleri L/D = 2,5 ve 4 oranındaki ön silindirler takip etmiştir. G/D' nin küçük değerlerinde  $CD_{rms}$  katsayısının artışı büyük olmasına rağmen G/D' nin büyük değerlerinde yavaş olarak azalma eğilimindedir.



Şekil 3.23. Ön ve arka silindirlerin ortalama direnç kuvvet katsayısının kare ortalama karekök değerinin  $G/D$  oranıyla değişimi

#### 3.2.2.4. Strouhal sayılarının değişimi

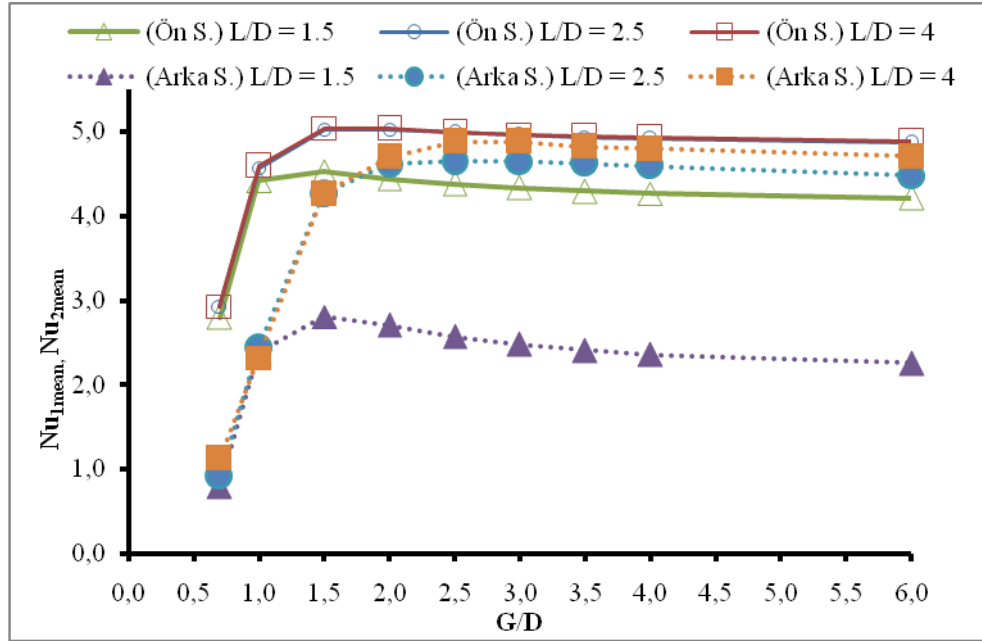
Silindirler arası mesafe  $1.5 D$ ,  $2.5 D$  ve  $4 D$  olması durumlarında 2. silindirin merkezinden  $x$  yönünde  $2.25 D$ ,  $y$  yönünden  $0.6 D$  uzaklığındaki noktadan ölçülen hız değerinden elde edilen Strouhal sayısının  $G/D$  oranıyla değişimi Şekil 3.24' de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi  $2 \leq G/D \leq 2.5$  arasında en yüksek değerlerini alırken silindirin duvara olan uzaklığı arttıkça tekrar düşüşe geçmiştir. Strouhal sayılarının en büyük değerleri  $L/D = 4$  olması durumunda gözlemlenmiştir.



Şekil 3.24. Farklı silindirler arası mesafeler için Strouhal sayısının G/D oranıyla değişimi

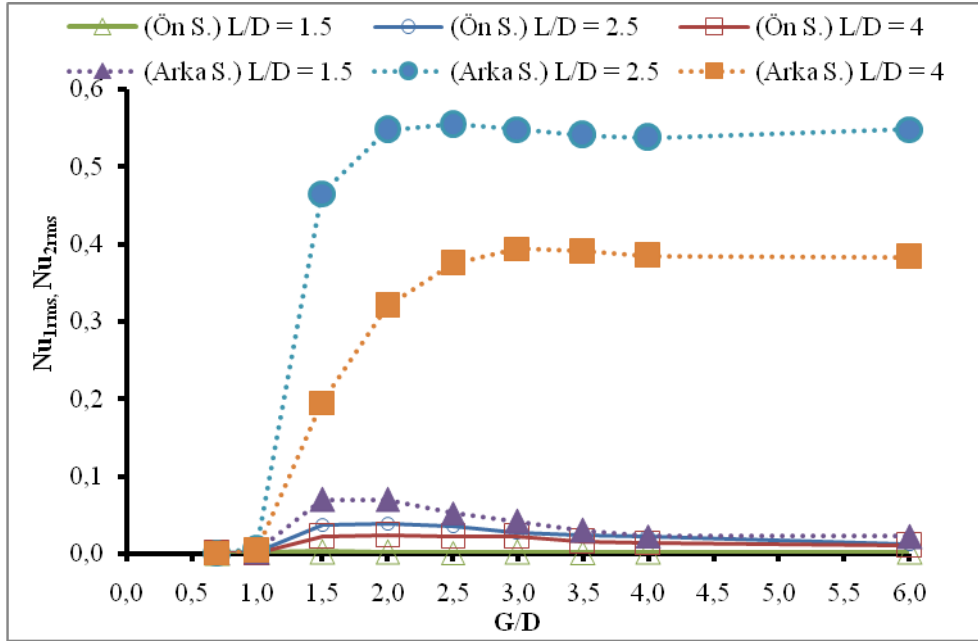
### 3.2.2.5. Nusselt sayılarının değişimi

Silindirlerin değişik duvar uzaklıklarında elde edilen  $Nu_{mean}$  ve  $Nu_{rms}$  değerleri Şekil 3.25. ve Şekil 3.26.'da verilmiştir. Şekil 3.25.'den de görüldüğü gibi  $G/D = 1,5$  olana kadar ön silindir üzerinde meydana gelen ortalama Nusselt sayısı ( $Nu_{1mean}$ ) artarken  $G/D = 2$  olduktan sonra azalmaya başlamıştır. Çünkü  $G/D = 1,5$  değerinde vorteksler oluşmaya başlamıştır ayrıca ön silindirde  $L/D = 2,5$  ve 4 için Nusselt sayılarının G/D ile değişimlerinin aynı olduğu görülmüştür.  $Nu_{2mean}$  değeri, silindirler arası mesafenin  $1,5D$  olması durumunda en yüksek değerini  $G/D = 1,5$  da alırken silindirler arası mesafenin  $2,5D$  ve  $4D$  olması durumunda  $G/D = 3$  de en yüksek değerini almıştır. Bu durum belirtilen G/D oranından sonra duvardan oluşan sınır tabaka ikinci silindir arkasındaki vortekslere katılmamasındandır.



Şekil 3.25. Ön ve arka silindirlere ait ortalama Nu sayısının G/D oranıyla değişimi

Şekil 3.26. 'da silindirler arası mesafe 1,5 D, 2,5 D ve 4 D olması durumunda farklı G/D oranlarında ön ve arka silindirdeki Nu sayılarının kare ortalama karekök değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Nu sayılarının en büyük kare ortalama karekök değerleri L/D = 2,5 durumunda arka silindir üzerinde görülmüştür. Ön silindir üzerindeki  $Nu_{rms}$  değerleri oldukça küçüktür. Küçük duvar - silindir uzaklıklarında arka silindir üzerindeki  $Nu_{rms}$  değerleri büyük bir artış göstermiş  $2 \leq G/D \leq 2,5$  değerlerinden sonra hafif bir düşüş göstermiştir.

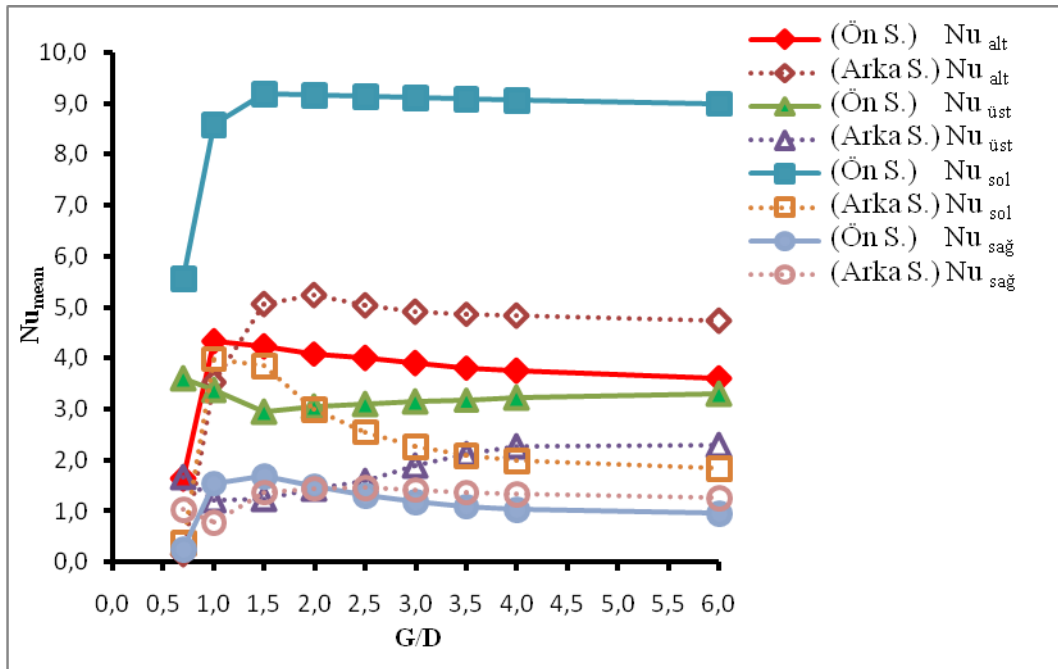


Şekil 3.26. Ön ve arka silindirlerdeki ortalama Nu sayısının kare ortalama karekök değerinin G/D oranıyla değişimi

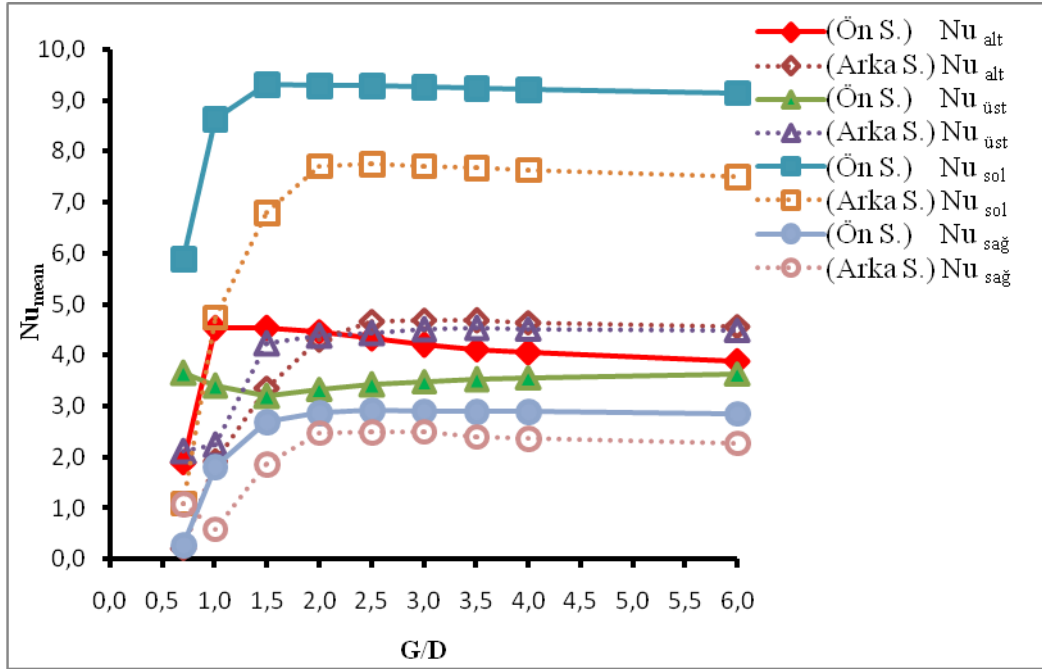
Şekil 3.27’de silindirler arası uzaklık  $L/D = 1,5$  olması durumunda ön ve arka silindirlerin yüzeyindeki Nu sayılarının G/D oranıyla değişimi gösterilmiştir. Nu sayıları en büyük değerlerini silindirlerin ön yüzeylerinde almaktadırlar. En düşük Nu değerlerini de arka yüzeylerinde alırlar. Akışın silindirin üst ve alt yüzeylerinde simetrik olması durumunda Nu sayılarının yaklaşık olarak aynı çıkması beklenen bir durumdur. Burada silindirlerin alt tarafında plaka bulunmasından dolayı akış simetrik değildir. Bu yüzden üst ve alt yüzeylerdeki Nu sayıları arasında farklılıklar oluşmaktadır. Ön silindirin üst ve alt yüzeyleri arasındaki fark duvar-silindir aralığının küçük olduğu durumlarda daha büyüktür. Bu oran arttıkça bu değerlerin bir birine yaklaştıkları görülmektedir. Silindirler arasındaki akıştan dolayı ön ve arka silindir üzerindeki Nu sayıları arasındaki fark arka silindir üzerinde daha büyük değerlerdedir. Ön ve arka silindir yüzeylerindeki Nu sayılarını karşılaştırdığımızda ön silindirin sol yüzeyinde Nu sayıları büyük değerlerde olmasına rağmen arka silindirin sol yüzeyinde küçük değerlerdedirler. Bunun nedeni akışın ön silindirin sol yüzeyine gelmesi ve silindirler arasında ise vorteks oluşmamasından dolayıdır. Arka silindirin alt yüzeyinde

Nu sayıları ön silindirdekine göre daha büyük değerdedir. Ön silindirin üst yüzeyindeki Nu sayıları arka silindirden daha büyük değerdedir.

Şekil 3.28.'de silindirler arasındaki mesafenin büyük olması durumunda ( $L/D = 4$ ) ön ve arka silindir yüzeylerindeki Nu sayılarının değişimi görülmektedir. Burada silindirler arasında vorteks oluştuğundan arka silindirin sol yüzeyinde de Nu sayısı büyük değer almaktadır. Ön silindirin alt yüzeyinde Nu sayıları üst yüzeyine göre biraz daha büyük değerlerdedir. Duvardan uzaklık arttıkça bu değerler birbirine yaklaşır. Arka silindirin üst ve alt yüzeylerinde ise Nu değerleri birbirine çok yakındır. En düşük Nu sayıların silindirlerin sağ yüzeylerinde meydana gelir.



Şekil 3.27. Silindirlerin alt, üst, sol ve sağ taraflarındaki Nu sayılarının G/D oranıyla değişimi ( $L=1,5 D$ )



Şekil 3.28. Silindirlerin alt, üst, sol ve sağ taraflarındaki Nu sayılarının  $G/D$  oranıyla değişimi ( $L=4 D$ )



#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada art arda yerleştirilmiş kare kesitli iki silindir arasındaki akış ve ısı geçişi incelenmiştir. İlk önce silindirler serbest akış alanına yerleştirilmiş, ikinci durumda ise silindirler bir duvar yakınına yerleştirilmiştir.

Duvar olmaması durumunda silindirler arası mesafe küçük iken ( $L/D \leq 2$ ) silindirler arasında vorteks oluşmamaktadır. İkinci silindirin uzağındaki akış bölgesinde vorteks oluşmaktadır. Buna bağlı olarak her iki silindir üzerindeki  $CD_{mean}$ ,  $CL_{mean}$  ve  $Nu_{mean}$  sayıları küçük değerler alır. Silindirler arasındaki uzaklığın artması ile ( $L/D = 2,5$ ) ön silindirden ayrılan sınır tabaka silindirler arasında kıvrılmaya başlar ve silindirler üzerindeki  $CD_{mean}$ ,  $CL_{mean}$  ve  $Nu_{mean}$  değerlerinde artışlar meydana gelir.  $L/D = 3,5$  olduğunda silindirler arasında vorteks tamamıyla oluşur ve her iki silindir üzerinde en yüksek  $CD_{mean}$ ,  $CL_{mean}$  ve  $Nu_{mean}$  değerleri gözlemlenir. Silindirler arasındaki uzaklığın artması ile silindirlerin arkasındaki vorteks oluşumları tek bir silindir haline doğru bir değişim gösterir ve bu değerlerde de uzaklığın artması ile birlikte düşüş gözlenir.

Silindirlerin duvar yakınına yerleştirilmesi durumunda ise duvardan uzaklığı  $0,7D$  ve  $1D$  olması durumunda bütün silindir aralıkları için ( $L/D = 1,5, 2,5, 4$ ) silindirler arasında ve aşağı akış bölgesinde vorteks oluşmamaktadır. Duvardan uzaklığın  $1,5D$  olması durumunda aşağı akış bölgesinde vorteksler oluşmaktadır.  $CL_{mean}$  en büyük değerini ön silindir üzerinde aşağı akış bölgesinde vorteks oluşmaması durumunda almaktadır. Vorteks oluşması ile birlikte bu değer düşmektedir.  $CL_{rms}$  değeri ise başlangıçta silindirler arası uzaklığın artması ile hızla artma eğilimi göstermekte, en büyük değerlerini ise arka silindir üzerinde  $L/D = 4$  olması durumunda almaktadır. Ön silindir üzerindeki  $CD_{mean}$  değeri  $L/D = 2,5$  ve  $4$  olması durumlarında aynı kalmakta,  $L/D$ 'nin  $1,5$  olması durumunda ise biraz daha düşük değerler almaktadır. Arka silindir üzerindeki  $CD_{mean}$  değeri silindirler arasındaki uzaklıktan dolayısıyla silindirler arası akıştan önemli ölçüde etkilenmekte, en büyük değerini  $L/D = 4$  ve  $G/D = 3$ 'de iki silindirinde arkasında vortekslerin oluştuğu durumda meydana gelmektedir.  $CD_{rms}$ 'nin

en büyük değerlerini arka silindir üzerinde  $L/D = 2,5$  ve  $G/D = 1,5$  durumunda almaktadır. Nu sayıları da en büyük değerlerini ön silindir üzerinde  $L/D = 2,5$  ve 4 olması durumunda almaktadır. Arka silindir üzerindeki Nu sayılarının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Her üç silindir aralığında da ( $L/D = 1,5, 2,5$  ve 4) en büyük Nu sayıları ön silindirin sol yüzeyinde görölmüştür.  $L/D = 2,5$  ve 4 için arka yüzey üzerindeki Nu sayıları, ön yüzeyden sonra büyük değerler almasına rağmen silindirler arasında vortekslerin oluşmadığı  $L/D = 1,5$  durumunda, arka silindirin sol yüzeyinde Nu sayıları düşük değerlerdedir.

Çalışmada kare kesitli çift silindir, arka arkaya yerleştirilerek laminar ve iki boyutlu akış içerisinde incelenmiştir. Bir sonraki adımda akış türbülanslı veya üç boyutlu olması durumunda silindirler arasındaki ve iz bölgesindeki akış incelenebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Chatterjee, D. and Amiroudine, S., 2010, Two-dimensional mixed convection heat transfer from confined tandem square cylinders in cross-flow at low Reynolds numbers, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 7-16.
- Chatterjee, D., Biswas, G. and Amiroudine, S., 2009, Numerical investigation of forced convection heat transfer in unsteady flow past a row of square cylinders, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 1114-1128.
- Chatterjee, D., and Mondal, B., 2012, Forced convection heat transfer from tandem square cylinders for various spacing ratios, *Numerical Heat Transfer*, 61, 381-400.
- Franke, R., Rodi, W. and Schönung B., 1990, Numerical calculation of laminar vortex-shedding flow past cylinders, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 35, 237-257.
- Gegez, H., 2010, Kanal içerisindeki kare kesitli silindir etrafında türbülanslı akış, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- Harichandan, A.B., and Roy, A., 2012, Numerical investigation of flow past single and tandem cylindrical bodies in the vicinity of a plane wall, *Journal of Fluids and Structures*, 33, 19-43.
- Luo, S.C., Chew, Y.T. and Ng, Y.T., 2003, Hysteresis phenomenon in the galloping ascillation of a square cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, 18, 103-118.
- Mahir, N., 2009, Tree-dimensional flow around q square cylinder near a wall, *Ocean Engineering*, 36, 357-367.
- Malekzadeh, S., and Sohankar, A., 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.
- Robichaux, J., Balachandar, S., Vanka, S.P., 1999, Three-dimensional Floquet instability of the wake of square cylinder, *Physics of Fluids* 11, 560–578.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Sahu, A.K., Chhabra, R.P. and Eswaran, V., 2009 a, Effects of Reynolds and Prandtl number on heat transfer from a square cylinder in the unsteady flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 839-850.
- Sahu, A.K., Chhabra, R.P. and Eswaran, V., 2009 b, Two-dimensional unsteady laminar flow of a power law fluid across a square cylinder, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 160, 157-167.
- Schlichting, H., 1979, *Boundary layer theory*, Seventy ed. Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Sharma, A. and Eswaran, V., 2004, Heat and fluid flow across a square cylinder in the two-dimensional laminar flow regime, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, 45, 247-269.
- Shimizu, Y. and Tanida, Y., 1978, Fluid forces acting on cylinders of rectangular cross section, *Transc JSME B* 44, 2699-2706.
- Sohankar, A., Davidson, L. and Norberg, C., 1995, Numerical simulation of unsteady flow around a square two-dimensional cylinder, *Twelfth Australasian Fluid Mechanics Conference*, The University of Sydney, Australia.
- Sohankar, A. and Etminan, A., 2009, Forced-convection heat transfer from tandem square cylinders in cross flow at low Reynolds numbers, *International Journal For Numerical Methods in Fluids*, 60, 733-751.
- Sohankar, A., Norberg, C. and Davidson, L., 1997, Numerical simulation of unsteady low-Reynolds number flow around rectangular cylinders at incidence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 69, 189-201.
- Sohankar, A., Norberg, C. and Davidson, L., 1998, Low-Reynolds number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition, *International Journal For Numerical in Fluids*, 26, 39-56.