

Kanal İçerisindeki Kare Kesitli Silindir Etrafında Türbülanslı Akış

Hakki Gegez

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2010

Turbulent Flow around a Square Cylinder Placed in a Channel

Hakki Gegez

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Mechanical Engineering

January 2010

Kanal İçerisindeki Kare Kesitli Silindir Etrafında Türbülanslı Akış

Hakki Gegez

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

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Necati Mahir

Ocak 2010

## ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hakki Gegez'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Kanal İçerisindeki Kare Kesitli Silindir Etrafında Türbülanslı Akış" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

**Danışman** : Yrd. Doç. Dr. Necati Mahir

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

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Necati Mahir

**Üye** : Prof. Dr. Tahir Karasu

**Üye** : Doç. 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 iki paralel plaka arasına yerleştirilmiş kare kesitli silindir etrafında akışa blok etkisi ve silindir-duvar uzaklığının etkisi incelenmiştir. Simulasyonda silindir genişliğine göre tanımlanmış Reynolds sayısı 20000 değerinde sabit tutulmuş, plakalar arasındaki uzaklık, blok oranları 0.1, 0.2 ve 0.05 olacak şekilde belirlenmiştir. Silindirlerin duvara olan uzaklıkları da 0.2D, 0.5D, 1D, 1.5D ve 2D olarak değiştirilmiştir. Simulasyonda düşük Reynolds sayısı iki-tabaka k-ε modeli kullanılmıştır. Momentum denklemlerinin ayrıştırılmasında kısmi adımlar metodu uygulanmış elde edilen denklemler bir imlisit metot ile çözülmüştür. Simulasyon sonuçları; blok etkisinin artması ile plakalardan eşit uzaklıkta yerleştirilmiş silindirlerin aşağı akış bölgesindeki hız değerlerinin silindire daha yakın bölgede girişteki hız değerlerine yaklaştığını göstermiştir. Büyük blok oranlarında ve silindirin plakalar arasında simetrik olmayan yerleşiminde, aşağı akış bölgesinde v-hız bileşeninin zaman ortalaması salınım yapan bir dağılım göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kare Kesitli Silindir, Türbülanslı Akış, Blok Etkisi, Duvar Etkisi

## SUMMARY

In this thesis, the effects of the cylinder-wall distance and blockage of the walls on the flow around a cylinder has been investigated. At the simulations, Reynolds number based on the cylinder height has been kept constant as 20000 and the distance between the parallel plates was adjusted so that the blockage ratios were 0.1, 0.2 and 0.05. The distance between the cylinder and lower wall was changed as 0.2D, 0.5D, 1D, 1.5D and 2D. The simulations were performed by applying two layer law Reynolds number  $k-\varepsilon$  model. The discretized momentum equations have been solved by employing a fractional step method. The simulation results reveal that while the block effect of the plates increase, the velocities at the downstream of the cylinder, which is placed symmetrically between plates, approximate their inflow values close to the cylinder. At the high block ratios and asymmetric placement of the cylinder to the plates, the  $v$ -components of the velocity present oscillating distribution along  $y$  axis.

**Keywords:** Square Cylinder, Turbulent Flow, Blockage effect, Wall Effect

## TEŞEKKÜR

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

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|  |            |
|--|------------|
| <b>ÖZET.....</b>   | <b>v</b>   |
| <b>SUMMARY.....</b>  | <b>vi</b>  |
| <b>TEŞEKKÜR.....</b>   | <b>vii</b> |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>  | <b>ix</b>  |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>  | <b>xi</b>  |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....</b>                                   | <b>xii</b> |
| <br>   |            |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>   | <b>1</b>   |
| <br>   |            |
| <b>2. MATAMATİKSEL FORMULASYON.....</b>                                      | <b>5</b>   |
| 2.1 Sayısal Metod.....   | 7          |
| <br>   |            |
| <b>3. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR.....</b>                                     | <b>11</b>  |
| 3.1 Anlık Vorticity, Kinetik Enerji Ve Kinetik Enerji Kaybolma Eğrileri..... | 12         |
| 3.2 Silindir-Duvar Aralığının Etkisi.....                                    | 18         |
| 3.3 Ortalama Hız Dağılımları .....   | 21         |
| 3.4 Duvar-Silindir Aralığının Ortalama Hız Dağılımlarına Etkisi .....        | 24         |
| 3.5 Ortalama Akım Çizgileri.....   | 31         |
| 3.6 Blok Oranlarının Akış Parametrelerine Etkisi.....                        | 35         |
| 3.7 Silindir-Duvar Aralığının Akış Parametrelerine Etkisi.....               | 36         |
| <br>   |            |
| <b>4. GENEL SONUÇLAR.....</b>  | <b>38</b>  |
| <br>   |            |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>   | <b>40</b>  |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u> | <u>Sayfa</u>  |
|--------------|---|
| 2.1          | Blok etkisindeki silindir için hesaplama alanı.....9  |
| 2.2          | Kare kesitli silindir etrafında ve duvar yakınında ağ yapısı.....9  |
| 3.1          | Silindir arkasında anlık çevrinti eğrilerinin blok oranı (D/H) ile değişimi<br>(a) uniform hız alanında (b) D/H = 0.05, (c) D/H = 0.1, (d) D/H = 0.2.....14                   |
| 3.2          | Silindir arkasında anlık kinetik enerji eğrilerinin blok oranı (D/H) ile değişimi<br>(a) uniform hız alanında (b) D/H = 0.05, (c) D/H = 0.1, (d) D/H = 0.2.....15             |
| 3.3          | Silindir arkasında anlık kinetik enerji kaybolma eğrilerinin blok oranı<br>(D/H) ile değişimi (a) uniform hız alanında (b) D/H = 0.05, (c) D/H = 0.1,<br>(d) D/H = 0.2.....17 |
| 3.4          | Silindir arkasında ve duvar yakınındaki çevrinti eğrilerinin boşluk oranları ile<br>(G/D) değişimi sütun (a) D/H = 0.1, sütun (b) D/H = 0.2.....19                            |
| 3.5          | Silindir arkasında ve duvar yakınındaki eş kinetik enerji eğrilerinin boşluk<br>oranları ile (G/D) değişimi sütun (a) D/H = 0.1, sütun (b) D/H = 0.2.....20                   |
| 3.6          | Akış yönündeki hızın zaman ortalama profillerinin blok oranı (D/H) ile değişimi<br>(a) x=0, (b)x=1.0 ve (c) x=5.....23  |
| 3.7          | Akışa dik yöndeki hızın zaman ortalama profillerinin blok oranı (D/H) ile<br>değişimi (a) x=0 ve (b) x=5.....24   |
| 3.8          | Akış yönündeki hızın zaman ortalamasının merkez çizgi (y=0) üzerindeki<br>değerinin blok oranı (D/H) ile değişimi.....25  |
| 3.9          | D/H = 0.1 için akış yönündeki hızın zaman ortalama profillerinin boşluk oranı<br>(G/D) ile değişimi. (a) x = 0, (b) x = 1, (c) x = 5.....27                                   |
| 3.10         | D/H= 0.1 için akış yönündeki hızın zaman ortalamasının boşluk oranı<br>(G/D) ile değişimi.....28  |
| 3.11         | D/H =0.1 için akışa dik yöndeki hızın zaman ortalamasının merkez çizgi<br>üzerindeki değerinin (y = 0) boşluk oranı (G/D) ile değişimi<br>(a) x= 0, (b) x=5.....28            |
| 3.12         | D/H = 0.2 için akış yönündeki hızın zaman ortalama profillerinin<br>boşluk oranı (G/D) ile değişimi. (a) x = 0, (b) x = 1, (c) x = 5.....30                                   |

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam )**

| <b><u>Sekil</u></b>   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| 3.13 D/H = 0.2 için akış yönündeki hızın zaman ortalamasının boşluk oranı (G/D) ile değişimi.....   | 31                  |
| 3.14 D/H =0.2 için akışa dik yöndeki hızın zaman ortalamasının merkez çizgi üzerindeki değerinin (y = 0) boşluk oranı (G/D) ile değişimi (a) x= 0, (b) x=5..... | 31                  |
| 3.15 Değişik blok oranlarında ortalama akım çizgilerinin değişimi. (a) Uniform hız alanında (b) D/H = 0.05, (c) D/H = 0.1, (d) D/H = 0.2.....                   | 33                  |
| 3.16 Silindir yakınındaki zaman ortalama akım çizgilerinin boşluk oranı (G/D) ile değişimi, sütun (a) D/H = 0.1, sütun (b) D/H = 0.2.....                       | 34                  |

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

| <b><u>Çizelge</u></b> |   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------|---|---------------------|
| 3.1                   | Mevcut çalışmada hesaplanan akış parametrelerinin diğer sayısal ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması..... | 12                  |
| 3.2                   | Farklı blok oranları için silindir üzerindeki aerodinamik kuvvetler ve Strouhal sayısı.....                     | 36                  |
| 3.3                   | D/H = 0.1 ve 0.2 için akış parametrelerinin silindir-duvar aralığı (G/D) ile değişimi.....                      | 37                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <b><u>Simgeler</u></b> | <b><u>Açıklama</u></b>  |
|------------------------|---|
| $A^+$                  | Standart k-ε denklemlerinde kullanılan sabit                      |
| $A_\mu$                | Standart k-ε denklemlerinde kullanılan sabit                      |
| $C$                    | Taşınım terimi  |
| $C_{Dmean}$            | Silindir üzerindeki direnç kuvveti katsayısı                      |
| $C_{Dsqrt}$            | Silindir üzerindeki direnç kuvveti katsayısı karesinin karekökü   |
| $C_l$                  | Standart k-ε denklemlerinde kullanılan sabit                      |
| $C_{Lmean}$            | Silindir üzerindeki kaldırma kuvveti katsayısı                    |
| $C_{Lsqrt}$            | Silindir üzerindeki kaldırma kuvveti katsayısı karesinin karekökü |
| $C_{\epsilon 1}$       | Standart k-ε denklemlerinde katsayı                               |
| $C_{\epsilon 2}$       | Standart k-ε denklemlerinde katsayı                               |
| $C_\mu$                | Standart k-ε denklemlerinde katsayı                               |
| $D$                    | Silindir genişliği  |
| $F_D$                  | Silindir üzerindeki direnç kuvveti                                |
| $F_L$                  | Silindir üzerindeki kaldırma kuvveti                              |
| $f$                    | Vorteks oluşum frekansı   |
| $f_\mu$                | Uzunluk ölçekleri   |
| $G$                    | Silindir alt duvara mesafesi                                      |
| $Grad$                 | Gradient  |
| $H$                    | Duvarlar arası uzaklık  |
| $k$                    | Kinetik enerji  |
| $k_g$                  | Girişteki kinetik enerji  |
| $L$                    | Hesaplama alanı uzunluğu  |
| $l_\epsilon$           | Uzunluk ölçekleri   |
| $l_\mu$                | Uzunluk ölçekleri   |
| $n$                    | Zaman adımı   |
| $P$                    | Basınç  |
| $P_k$                  | Kinetik enerji üretim terimi                                      |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

| <u>Simgeler</u>     | <u>Açıklama</u>  |
|---------------------|--|
| Re                  | Reynold sayısı ( $UD/ \nu$ )                               |
| $r_{\mu}$           | Türbülans viskozitenin viskoz viskoziteye oranı            |
| St                  | Strouhal sayısı ( $fD/U$ )                                 |
| t                   | Boyutsuz zaman   |
| Tu                  | Girişteki türbülans seviyesi                               |
| U                   | Uniform hız  |
| u, v                | Akış doğrultusunda ve akışa dik doğrultuda hız bileşenleri |
| $\nu$               | Sıvının kinematik viskozitesi                              |
| $\nu_t$             | Eddy vizikositesi  |
| x, y                | Akış doğrultusunda ve akışa dik doğrultuda koordinatlar    |
| $\Delta t$          | Boyutsuz zaman aralığı                                     |
| $\sigma_k$          | Standart k- $\epsilon$ denklemlerinde katsayı              |
| $\sigma_{\epsilon}$ | Standart k- $\epsilon$ denklemlerinde katsayı              |
| $\epsilon$          | Enerji kaybolma miktarı                                    |
| $\rho$              | Akışkan yoğunluğu  |
| $\phi$              | Basınç veya orta hızlar                                    |
| $\mu$               | Sıvının dinamik viskozitesi                                |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Akış alanı içerisine yerleştirilen silindirlerin arkasındaki akışlar; ısı değiştirgeçleri, yüksek binalar, tüp blokları, fabrika bacaları gibi uygulama alanlarından dolayı önemlidir. Silindirlerin arkasında oluşan vorteksler bu yapılar üzerinde periyodik titreşimler meydana getirdikleri gibi ısı geçişini de etkilerler. Yüksek Reynolds, sayılarında silindirlerin arkasındaki akış şekilleri ve silindirler üzerinde zaman ile değişen kuvvetlerin belirlenmesi için yapılan çalışmaların çoğunluğu deneyseldir, sınırlı sayıda sayısal çalışma mevcuttur. Bu deneysel çalışmalardan biriside Lyn, et al., (1995) tarafından Reynolds sayısının 21400 değeri için kare kesitli bir silindirin iz bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Onlar araştırmalarında laser doppler anemometresi ile hızları ölçmüşler topoloji ve türbülans arasındaki bağıntıyı araştırmışlar sonuçlarını dairesel kesitli silindir ile karşılaştırmışlardır. Silindirin yakın arka bölgesini ayrıntılı olarak incelemişler, vorticity saddle noktalarının, sıfır-vorticity noktaları ve akım çizgisi saddle noktalarının vorteks oluşumu süresince önemli ölçüde değiştiğini belirlemişlerdir.

Diğer bir deneysel çalışmada Saha, et al., (2000) tarafından Reynolds sayısının 8700 ve 17625 değerleri için sıcak-tel hızölçer kullanılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Onlar hem hızın hem de hız salınımlarının iz bölgesi eksenini boyunca simetrik olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunlara ek olarak, gelen akışkanın türbülans seviyesinin zaman-ortalama hız profili üzerindeki etkisini incelemişler; türbülans seviyesinin yükselmesinin iz bölgesinde azalan hızın normal hale gelmesini yavaşlattığını belirlemişlerdir.

Silindir arkasındaki akışın bir simülasyonu da Bosch, et al., (1998) tarafından gerçekleştirilmiştir. Onlar  $Re = 22000$  için değişik türbülans modelleri kullanarak başlangıç şartlarının ve silindirin girişe olan uzaklığının sonuçlar üzerinde önemli etkisi olduğunu belirlemişlerdir.

Paralel plakalar arasına yerleştirilmiş kare kesitli silindir arkasındaki akışın sayısal simülasyonu Saha, et al., (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmalarında, standart  $k-\varepsilon$ , Kato-Laundier  $k-\varepsilon$ , ve RNG  $k-\varepsilon$  olmak üzere farklı üç türbülans modeli kullanmışlar, sonuçlarını sınırlı olmayan akış alanına yerleştirilmiş silindir hali ile karşılaştırmışlardır. Her üç model de yaklaşık Strouhal sayıları tahmin etmesine rağmen, kaldırma ve direnç katsayılarını RNG  $k-\varepsilon$ , modeli farklı bulmuştur.

Gerçekte cisimlerin arkasındaki türbülanslı akış üç boyutlu olmasına rağmen, yukarıda açıklanan sayısal çalışmalarda akış iki boyutlu kabul edilip akış karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kare kesitli silindirden geçen türbülanslı akışın üç boyutlu bir simülasyonu dinamik LES metodu kullanılarak Murakami, et al., (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir. Onlar Standart Smagorinsky, Dinamik Smagorinsky ve Lagrangian Dinamik Smagorinsky modellerinin performansını araştırmışlardır.

Song, et al., ' de (2009) kısmen ortalama Navier-Stokes (PANS) metodu kullanarak kare kesitli silindiri geçen akışı üç boyutlu olarak simule etmişler, ağ sisteminin sonuçlar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Les metoduna göre daha seyrek ağ yapısı kullanarak, sınır tabaka ayrılması olan akışlarda akış parametrelerini doğru olarak tahmin etmişlerdir.

Paralel plakalar arasına yerleştirilmiş silindirler üzerinde akışlar ile ilgili çalışmaların çoğunluğu düşük Reynolds sayılarında gerçekleştirilmiştir. Bunlardan biriside Mukhopadhyay, et al., 'ın (1992) çalışmasıdır. Onlar sayısal çalışmalarında blok oranını (D/H) 0.125, 0.25, 0.3125 ve 0.375 değerlerinde tutarak, Reynolds sayısını 60-800 arasında değerleri için Strouhal sayısının değişimini incelemişlerdir.

Blok etkisindeki silindirler arkasında akış ile ilgili mevcut elde edilebildiğimiz deneysel araştırmalar Davis, et al., (1984), Nakagawa, et al., (1999) ve Cigada, et al., ' nin (2006) çalışmalarıdır. Davis, et al., (1984), Reynolds sayısının 100 ve 1850 arasındaki değerlerinde D/H =1/4 ve 1/6 için Strouhal sayısının ve ortalama kaldırma kuvvet katsayısının değişimini incelemişlerdir.

Cigada, et al., (2006), Reynolds sayısının 6000-40000 arasındaki değerleri için farklı kesitlerdeki dikdörtgen silindirlerin üzerindeki kuvvetleri ölçmüşlerdir. Onlar, duvarın sistem dinamiğini etkilediğini ve silindir en-boy oranının da duvar etkisini yönettiğini belirlemişlerdir.

Nakagawa, et al., (1999), değişik en ve boy oranlarına sahip ( $b/h = 0.5, 1, 2$  ve  $3$ ) dikdörtgen kesitli silindir arkasındaki akışı laser doppler hız-ölçer kullanılarak incelemişlerdir. Onlar, silindir boyuna göre tanımladıkları Reynolds sayısını 3000 değerinde ve kanal blok etkisini (silindir boyu / kanal genişliği) 0.2 değerinde sabit tutarak yaptıkları hız ölçümlerinde, merkez çizgi üzerindeki türbülans yoğunluklarının maksimum değerlerinin resirkulasyonun arka durma noktasında olduğunu belirlemişlerdir.

Kim, et al., (2004), blok etkisindeki silindirler arkasındaki akışı LES metodu kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Silindir arkasında oluşan vorteksleri plakaların önemli ölçüde etkilediğini, ortalama direnç kuvveti ve kaldırma kuvveti çalkantılarının önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir.

Duvar yakınındaki bir silindir etrafında akış ve üzerindeki zaman ile değişen kuvvetler, duvar yakınındaki boru hatları, ısı değiştirgeçleri tüpleri gibi uygulamalarından dolayı araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Araştırmalarda, duvarın ve silindirin sonsuz bir ortamda oldukları dolayısı ile blok etkisi olmadığı göz önüne alınmıştır. Araştırmaların çoğu duvar yakınında dairesel kesitli silindirler ile ilgilidir (Taniguchi and Miyakoshi, 1990 ; Price, et al., 2002 ; Grass, et al., 1984 ; Lei, et al., 1999). Kare kesitli silindirler ile ilgili sınırlı sayıda çalışma vardır. Deneysel çalışmaların büyük çoğunluğu türbülanslı akışlarla ilgilidir. Bu çalışmalardan birisi de Bosch, et al., (1996) tarafından  $Re = 22000$  için gerçekleştirilmiştir. Onlar, silindir ile duvar arasındaki uzaklığın ( $G/D$ ) 0.35-0.5 değerleri için periyodik vorteks oluşumunun arttığını, 0.35 den küçük değerlerinde vorteks oluşumunun bastırıldığını belirlemişlerdir. Aralığın ( $G/D$ ) 0.5 den büyük değerlerinde düzenli vorteks oluştuğunu gözlemlemişlerdir.



Martinuzzi, et al., (2003), girişte sınır tabaka kalınlığını 0.5 D değerinde tutarak silindir üzerindeki basınç değişimlerini incelemişlerdir.

Bu çalışmada iki paralel duvar arasına yerleştirilmiş silindir etrafındaki akış, Düşük Reynolds sayısı iki-tabaka k- $\epsilon$  modeli (Norris and Reynolds, 1975 ; Rodi, 1991) kullanılarak incelenmiştir. Simulasyon da Reynolds sayısı 20000 değerinde sabit tutulmuştur. Duvarlar arasındaki uzaklık ve silindirin duvarlara olan uzaklığı değiştirilerek; silindir üzerindeki kuvvetlerin, Strouhal sayısının ve türbülans karakteristiklerinin değişimleri incelenmiştir. Sonuçlar Uniform akış alanına yerleştirilmiş silindir hali ile karşılaştırılmıştır.

## BÖLÜM 2

### MATEMATİKSEL FORMULASYON

Paralel plakalar arasındaki ve duvarlara değişik uzaklıklardaki kare kesitli bir silindir üzerinden geçen akışı incelemek için, akış iki boyutlu, sıkıştırılamaz kabul edilmiş ve aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( P + \frac{2}{3}k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

Türbülans kinetik enerji denklemi

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad (3)$$

Türbülans kinetik enerji kaybolma miktarı

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + (C_{\varepsilon_1} P_k - C_{\varepsilon_2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \quad (4)$$

Kinetik enerji ve türbülans kaybolma miktarı denklemlerindeki sabitler standart  $k - \varepsilon$  modelinde olduğu gibi kullanılmıştır.

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon_1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon_2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0 \quad \text{ve} \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Denklemlerde  $v_t$  eddy viskozitesini göstermektedir ve

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

olarak verilmiştir.

Denklem (3) de,  $P_k$  kinetik enerjinin üretim terimini göstermektedir ve standart  $k - \varepsilon$  modelinde bu ifade aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$P_k = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (6)$$

Küt cisimlerin arkasındaki akışlarda standart  $k - \varepsilon$  modeli kinetik enerjiyi daha büyük tahmin ettiğinden, Kato and Launder, (1993) tarafından üretim terimi olarak aşağıdaki bağıntı önerilmiştir :

$$P_k = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (7)$$

Bu çalışmada kullanılan ve detayları açıklanacak olan ayrıştırma metodunda ise Kato and Launder, (1993) düzeltmesinin kullanılması durumunda akış parametreleri (kaldırma kuvveti katsayısı, direnç kuvvet katsayısı ve Strouhal sayısı) literatürdeki değerlere göre daha büyük tahmin edilmiş, denklem (6) ise daha doğru sonuçlar vermiştir. Sınır tabaka ayrılmasının ve tekrar birleşmesinin olduğu akışlarda genelleştirilmiş log-yasası Reynolds sayısının değişimini göz önüne almamakta buna karşılık düşük Reynolds sayısı modelleri daha iyi sonuçlar vermektedirler (Shimada and Ishihara, 2002).

Bundan dolayı burada Düşük Reynolds sayısı iki-tabaka modeli (Norris and Reynolds, 1975 ; Rodi, 1991) kullanılmıştır.  $k$  kinetik enerji denklemi çözülmüş (denklem 3), fakat duvar yakınlarında  $\varepsilon$  enerji kaybolma denkleminin çözümlenmesi yerine,  $\varepsilon$  değeri uzunluk ölçeği  $l_\varepsilon$  ve  $k$  değerlerinden hesaplanmıştır.  $\varepsilon$  enerji kaybolma denkleminin çözümediği bölgede yine eddy viskozitesi  $\nu_t$ , uzunluk ölçeği  $l_\mu$  ve kinetik enerjiden aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (8)$$

$$v_t = C_\mu k^{1/2} l_\mu \quad (9)$$

Uzunluk ölççekleri  $l_\varepsilon$  ve  $l_\mu$  aşağıdaki bağıntılarla verilmiştir.

$$f_\mu = 1 - \exp\left(-\frac{Re_y}{A_\mu} \frac{25}{A^+}\right) \quad (10)$$

$$l_\mu = C_l y f_\mu, \quad l_\varepsilon = \frac{C_l y}{1 + \frac{5.3}{Re_y}} \quad (11)$$

Bu denklemlerdeki sabitler  $C_l = \kappa C_\mu^{3/4}$ ,  $A_\mu = 50,5$  ve  $A^+ = 25$  olarak alınmıştır. İki tabakalı modellerde  $l_\varepsilon$  ve  $l_\mu$  Reynolds sayısının fonksiyonudur ve Reynolds sayısı  $Re_y = k^{1/2} \frac{y}{\nu}$  olarak verilmiştir. İki tabakalı modelin uygulandığı duvardan olan uzaklıklar  $f_\mu \leq 0.95$  şartının sağlanması ile belirlenmiştir (Cordes, 1992 ; Bosch and Rodi, 1998).

## 2.1 Sayısal Metod

Momentum denklemlerinin ayrıştırılmasında kısmi adımlar metodu kullanılmıştır ve denklemler implisit metot ile çözülmüştür. Orta basamak  $(U_i^{n+1/2})$  hızların hesaplanması aşağıdaki şekildedir:

$$\frac{U_i^{n+1/2} - U_i^n}{\Delta t} + \left[ \frac{1}{2} C_i^{n+1/2} + \frac{1}{2} C_i^n \right] = -\frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \left( \frac{\partial (U_i^{n+1/2})}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \left( \frac{\partial U_j^*}{\partial x_i} \right) \right] \quad (12)$$

Burada C taşınım terimidir ve  $C_i^{n+1/2}$  terimine,  $C_i^{n+1/2} = U_j^n \frac{\partial U_i^{n+1/2}}{\partial x_j}$  ifadesi ile

yaklaşılmıştır. Yukarıdaki denklemdeki  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \left( \frac{\partial U_j^*}{\partial x_i} \right) \right]$  terimi karışık türev olması

halinde  $\left( \frac{\partial}{\partial x} \left[ (v + v_i) \left( \frac{\partial U^*}{\partial y} \right) \right], \frac{\partial}{\partial y} \left[ (v + v_i) \left( \frac{\partial U^*}{\partial x} \right) \right] \right)$ , \* = n zaman adımı aksi halde ise  $\left( \frac{\partial}{\partial x} \left[ (v + v_i) \left( \frac{\partial U^*}{\partial x} \right) \right], \frac{\partial}{\partial y} \left[ (v + v_i) \left( \frac{\partial U^*}{\partial y} \right) \right] \right)$ , \* = n+1/2 zaman adımı olarak göz önüne alınmıştır. Basınçların hesaplanmasında Poisson denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

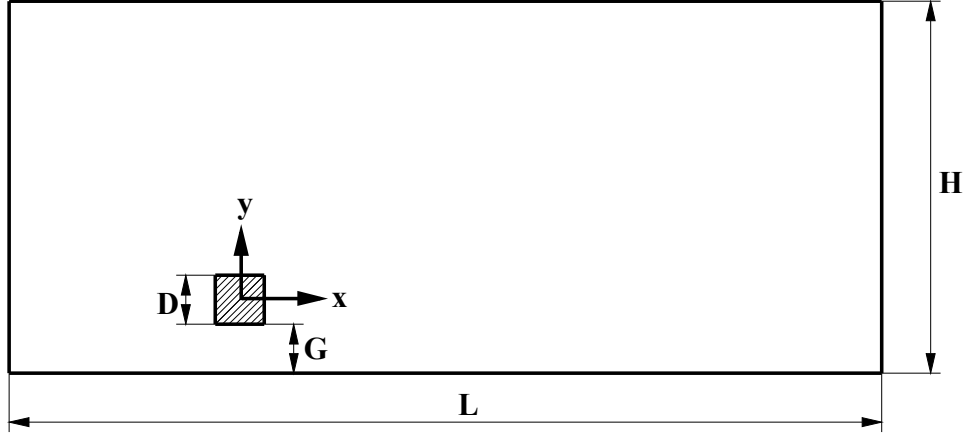
$$\Delta p = \frac{I}{\Delta t} \nabla U^{n+1/2} \quad (13)$$

Bundan sonraki zaman basamağında hız alanı

$$U^{n+1} = U^{n+1/2} - \Delta t \text{ Grad } p \quad (14)$$

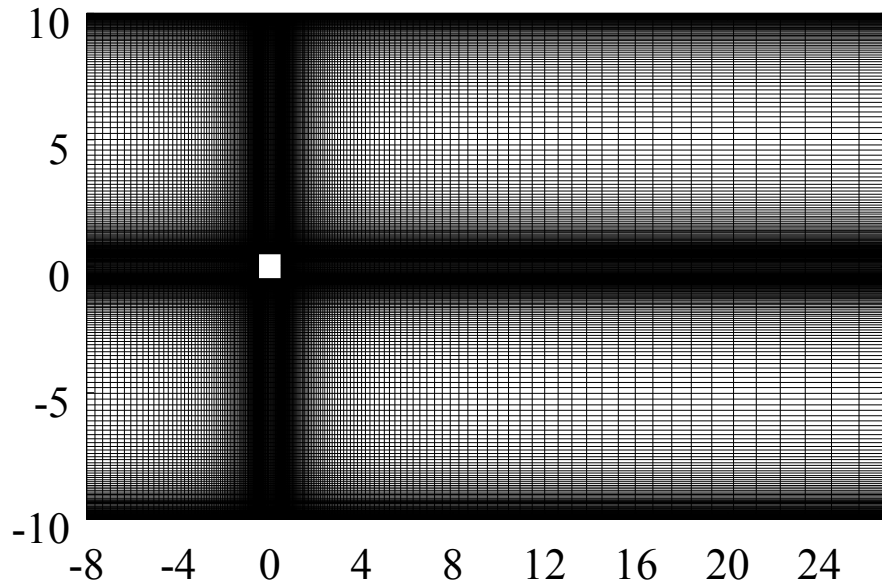
eşitliğinden hesaplanmıştır. Burada Grad gradienti göstermektedir. Hesaplamalarda zaman aralığı  $\Delta t = 2.5 \times 10^{-3}$  alınmıştır.

Taşınım terimlerindeki birinci dereceden türevler üçüncü mertebeden doğru ileri farklar metodu ile viskoz terimlerindeki ikinci dereceden türevler ise merkezi farklar formülleri ile ayrıştırılmıştır. k ve ε denklemlerindeki taşınım terimlerinde ise birinci mertebeden doğru ileri farklar metodu kullanılmıştır. Denklemler çözümünde çapraz ağ yapısı kullanılmış ve Poisson tipi denklemler Chebyshev hızlandırıcılı Jacobi metodu ile çözülmüştür. Giriş ve çıkışın akış parametrelerinin üzerindeki etkisinin göz ardı edilebilir derecede olması için, silindir girişten 7.5D uzaklığa, çıkış ise silindirden 25D uzaklığa yerleştirilmiştir. Üst ve alt plakaların yeri ise aralarındaki uzaklık 5D, 10D ve 15D olacak şekilde seçilmiştir. Hesaplama alanı ve silindirin yerleşimi şekil 2.1 ' de görülmektedir. x ve y eksenleri yönünde uniform olmayan ağ yapısı oluşturulmuş, silindir ve duvarların yakınında daha sık ağ yapısı kullanılmıştır. İki tabaka modelinin kullanılması durumunda ağ yapısının duvara en yakın noktanın  $y^+ \approx 1$  şartını sağlaması



Şekil 2.1. Blok etkisindeki silindir için hesaplama alanı.

gerekmektedir. Bundan dolayı, en yakın noktanın duvardan olan uzaklığı  $0.005D$  olacak şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur. Bir birini izleyen ağ çizgileri arasındaki uzaklık geometrik seriler ile belirlenmiş, alt duvar ve silindirin üst yüzeyi yakınında  $\Delta y_i / \Delta y_{i-1} = 1.1$ , üst duvar ve silindirin alt yüzeyi yakınında  $\Delta y_i / \Delta y_{i-1} = 0.9$  olarak seçilmiştir. Benzer şekilde, silindirin ön yüzeyinde  $\Delta x_i / \Delta x_{i-1} = 0.9$  ve arka yüzeyinde  $\Delta x_i / \Delta x_{i-1} = 1.1$  alınarak ağ yapısı oluşturulmuştur (Mahir, 2009). Silindir ve duvarların yakınındaki ağ yapısı Şekil 2.2 'de gösterilmiştir. Her bir zaman adımı için çözümlerin yakınsaması



Şekil 2.2. Kare kesitli silindir etrafında ve duvar yakınında ağ yapısı.

$\sum_{i,j} \frac{(\phi_{i,j}^n - \phi_{i,j}^{n-1})^2}{(\phi_{i,j}^n)^2} \langle 5 \times 10^{-5}$  bağıntısı ile belirlenmiştir. Burada  $\phi$  basınç ve orta hızları,  $n$  ise zaman adımını göstermektedir.

Silindir yüzeylerinde ve duvarlarda kaymama (no-slip) sınır şartı kullanılmıştır. Girişte uniform hız kabul edilmiş, çıkışta ise taşınım sınır şartı ( $\partial u_i / \partial t + u_c \partial u_i / \partial x = 0$ ) uygulanmıştır. Burada  $u_c$  çıkıştan ayrılan girdapların hızıdır. Girişte türbülans seviyesi Lyn, et al.,' nin (1995) ölçümlerine uygun olarak  $Tu = \sqrt{u'^2} / 2 / U_{ort} = \%2$  alınmıştır. Türbülans viskozitenin viskoz viskoziteye oranı  $r_\mu = \nu_t / \nu$  girişte 10 kabul edilmiştir (Bosch and Rodi, 1998). Girişteki kinetik enerji  $k_g = 3 / 2 (U_{av} Tu)^2$ ;  $\epsilon_g$  ise (8) denkleminde hesaplanmıştır. Duvarlarda sınır şartı olarak  $k = 0$  alınmıştır.

Silindir üzerindeki direnç ve kaldırma kuvvetleri aşağıda verilen bağıntılardan hesaplanmıştır.

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho U^2 D}, \quad (15)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \rho U^2 D} \quad (16)$$

$$F_D = \int_0^D (\tau_t(x) + \tau_b(x)) dx + \int_0^D (P_f(y) - P_r(y)) dy \quad (17)$$

$$F_L = \int_0^D (\tau_f(y) + \tau_r(y)) dy + \int_0^D (P_t(x) - P_b(x)) dx \quad (18)$$

Burada f, r, t ve b harfleri sırasıyla silindirin ön, arka, üst ve alt yüzeylerini göstermektedir. Strouhal sayısı ise

$$St = fD / U \quad (19)$$

bağıntısından hesaplanmıştır. Burada  $f$  vorteks frekansını göstermektedir.

## BÖLÜM 3

### DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Silindirin aralarına yerleştirildiği plakalar arasındaki uzaklık ve buna ek olarak silindir-duvar uzaklığı değiştirilerek, blok etkisinin ve silindir-duvar uzaklığının akış karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Simülasyonlarda Reynolds sayısı 20000 değerinde sabit tutulmuştur. Geliştirilen programdan elde edilen sonuçları test etmek için, önce uniform akış alanına yerleştirilmiş bir silindirin arkasındaki akış  $Re = 20000$  için simule edilmiş sonuçlar literatürdeki deneysel ve sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tablo 3.1 ' de görüldüğü gibi, kullanılan sayısal metot ile elde edilen aerodinamik kuvvet katsayıları literatürde verilen deney sonuçları ve sayısal çalışmalar ile uyumludur.



Tablo 3.1. Mevcut çalışmada hesaplanan akış parametrelerinin diğer sayısal ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

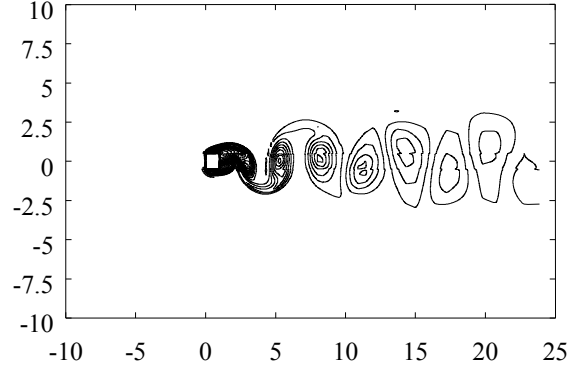
| <b>Sayısal çalışmalar</b>                              | <b>Re</b> | <b>C<sub>Dmean</sub></b> | <b>C<sub>Dsqrt</sub></b> | <b>C<sub>Lsqrt</sub></b> | <b>St</b> |
|--|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| Shimada and Ishihara (2002)                            | 22000     | 2.05                     | 0.093                    | 1.43                     | 0.141     |
| Murakami and Ooka (1999)                               | 22000     | 1.93                     | -                        | 0.79                     | 0.14      |
| Bosch and Rodi (1998) (WF Kato and Launder modeli)     | 22000     | 1.789                    | 0.0125                   | 0.614                    | 0.142     |
| Bosch and Rodi (1998) (TL Kato and Launder modeli k-ε) | 22000     | 2.004                    | 0.0683                   | 1.175                    | 0.143     |
| Saha, et al. (1999) (WF Standart k-ε)                  | 21400     | 1.93                     | 0.01                     | 0.552                    | 0.141     |
| Saha, et al. (1999) (WF Kato ve Launder modeli k-ε)    | 21400     | 1.97                     | 0.02                     | 0.707                    | 0.145     |
| Mevcut çalışma   | 20000     | 2.041                    | 0.061                    | 1.025                    | 0.14      |
| <b>Deneysel Çalışmalar</b>                             |           |                          |                          |                          |           |
| Kato and Launder (1993)                                | 22000     | 2.19                     | -                        | -                        | 0.135     |
| Lyn, et al. (1995)                                     | 21400     | 2.05                     | -                        | -                        | 0.135     |
| Saha, et al. (2000)                                    | 8700      | 2.13                     | -                        | -                        | 0.144     |
| Saha, et al. (2000)                                    | 17625     | 2.2                      | -                        | -                        | 0.142     |
| Nakagawa, et al. (1999) (D/H = 20)                     | 3000      | -                        | -                        | -                        | 0.13      |
| Okajima (1982)   | 20000     | -                        | -                        | -                        | 0.13      |

### 3.1 Anlık Vorticity, Kinetik Enerji Ve Kinetik Enerji Kaybolma Eğrileri

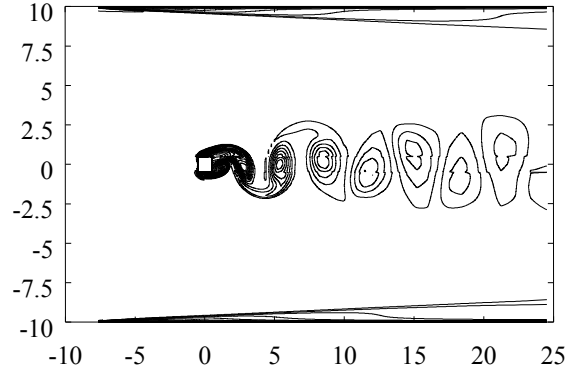
Şekil 3.1 ' de serbest akış alanına yerleştirilmiş silindir ve blok oranlarının 0.05, 0.1 ve 0.2 değerleri için çevrinti eğrileri gösterilmiştir. Blok oranları 0.05 ve 0.10 için vorteks oluşum mesafelerinin, blok etkisinin artması ile arttığı görülmektedir (Şekil 3.1 (b), (c) ). Her iki durumda da vorteksler serbest akış alanındaki silindire göre daha uzak mesafede oluşurlar (şekil 3.1 (a)). Blok etkisinin daha da artması durumunda ise (şekil

3.1 (d)) vortekslerin silindire oldukça yakın mesafede oluştukları görölmektedir. Küçük blok oranlarında alt ve üst plaka üzerinde oluşan sınır tabaka silindirden ayrılan sınır tabaka ile etkileşmemesine rağmen büyük blok oranlarında (şekil 3.1 (d)) silindirin arka bölgesinde bu sınıra tabakalar etkileşmekte ve vortekslerin silindire daha yakın

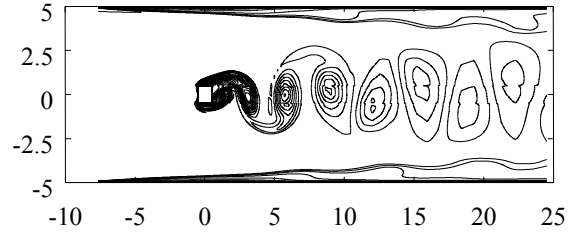
(a)



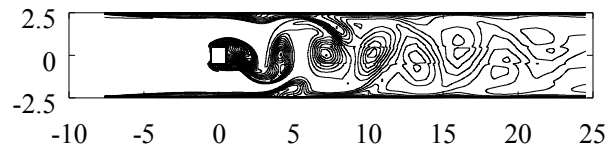
(b)



(c)

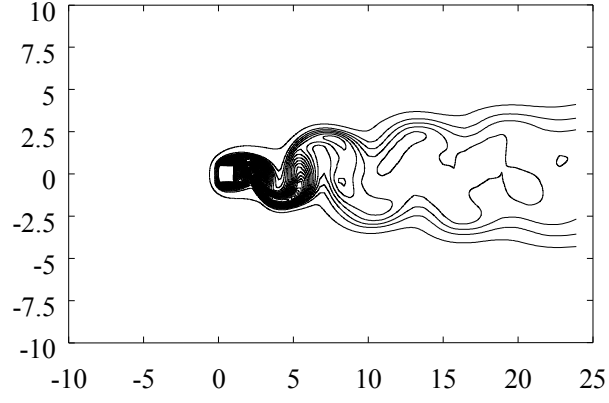


(d)

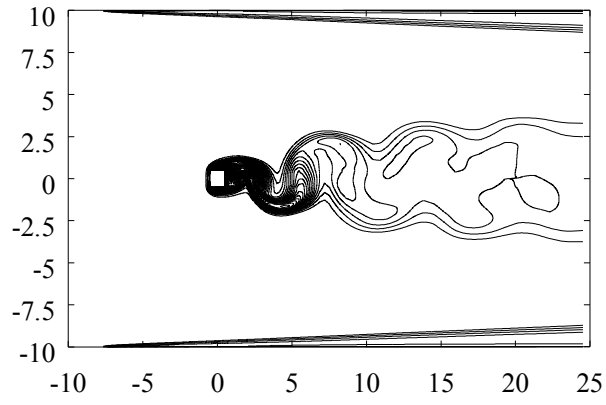


Şekil 3.1. Silindir arkasında anlık çevrinti (vorticity) eğrilerinin blok oranı ( $D/H$ ) ile değişimi (a) uniform hız alanında (b)  $D/H = 0.05$ , (c)  $D/H = 0.1$ , (d)  $D/H = 0.2$ .

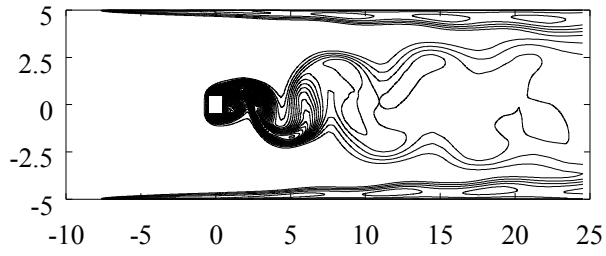
(a)



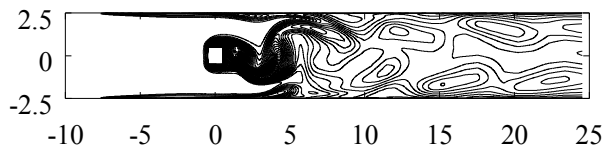
(b)



(c)



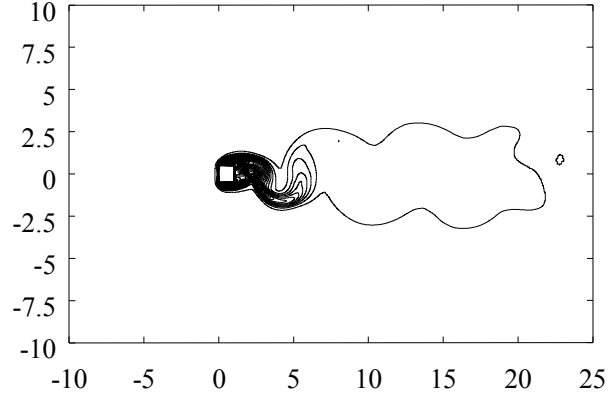
(d)



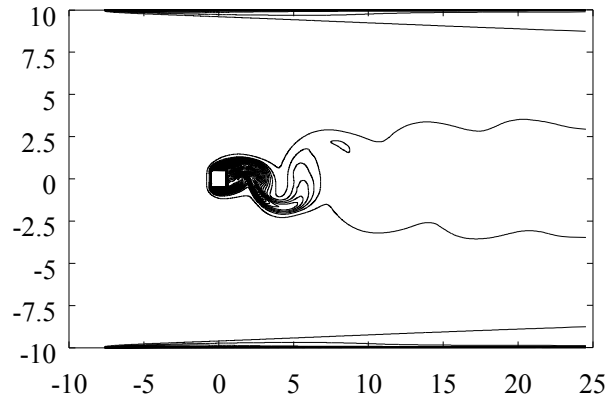
Şekil 3.2. Silindir arkasında anlık kinetik enerji eğrilerinin blok oranı ( $D/H$ ) ile değişimi (a) uniform hız alanında (b)  $D/H = 0.05$ , (c)  $D/H = 0.1$ , (d)  $D/H = 0.2$ .

oluşmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.2 ' de ise şekil 3.1 ' deki vorteks oluşumuna karşılık gelen zamanlardaki kinetik enerji dağılımları görülmektedir. Eş kinetik enerji eğrileri, kinetik enerji üretiminin sınır tabaka ayrılması ile bağıntılı olduğunu göstermektedir. Hız gradyenlerinin büyük olduğu silindire yakın bölümde çevrinti eğrileri ile eş kinetik enerji eğrilerinin benzerlik gösterirler. Hız gradyenlerinin azaldığı silindirden uzak bölgede ise ( $x > 7$ ) eş kinetik enerji eğrilerinde vorteks caddesi görülmemesine rağmen, hızların ortalama hızdan düşük olduğu iz bölgesi açık olarak görülmektedir. Blok etkisini en çok olduğu  $D/H = 0.2$  durumunda ise (şekil 3.2 (d)) silindirden ayrılan sınır tabaka ile plakalardan ayrılan sınır tabakanın etkileşimi sonucu plakalara yakın bölgelerde daha yoğun eş kinetik enerji eğrileri oluşmaktadır. Yukarıda açıklanan durumlara karşılık gelen enerji kaybolma miktarları ise şekil 3.3 ' de gösterilmiştir. Enerji kaybolmasının silindir yakınında büyük olduğu, silindirden uzakta ise yaklaşık olarak uniform olduğu görülmektedir (şekil 3.3 (a)-(c)). Blok etkilerinin büyük olduğu durumda ise (şekil 3.3 (d)) üst ve alt plaka üzerindeki kinetik enerji kaybolmasının vortekslerin olduğu silindirin hemen arka kısmında olduğu görülmektedir.

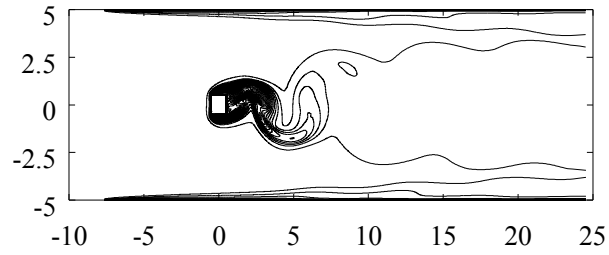
(a)



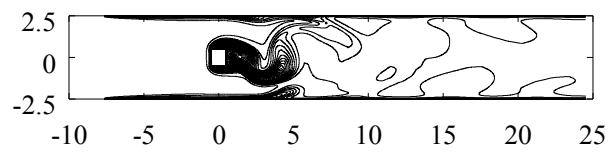
(b)



(c)



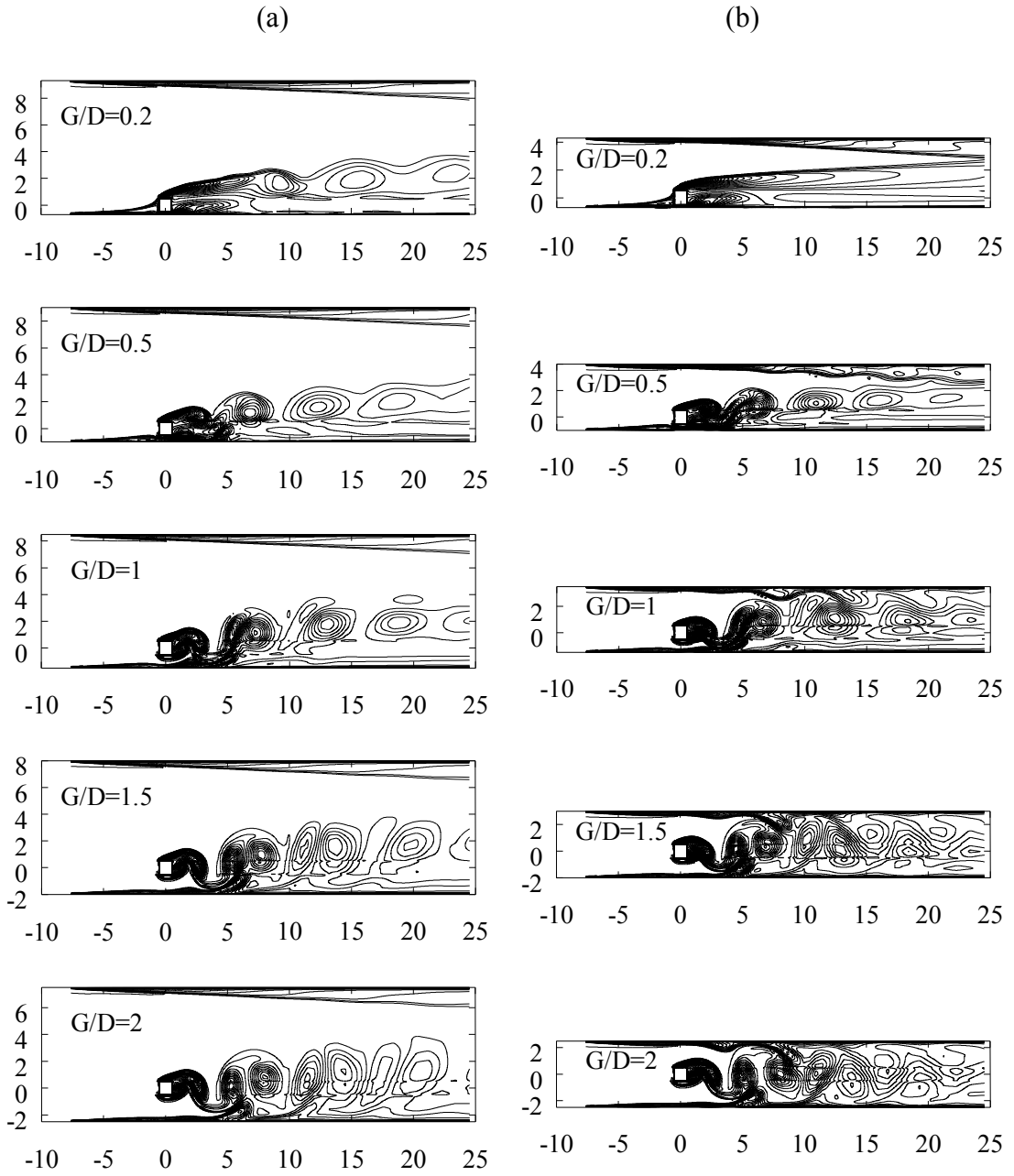
(d)



Şekil 3.3. Silindir arkasında anlık kinetik enerji kaybolma eğrilerinin blok oranı ( $D/H$ ) ile değişimi (a) uniform hız alanında (b)  $D/H = 0.05$ , (c)  $D/H = 0.1$ , (d)  $D/H = 0.2$ .

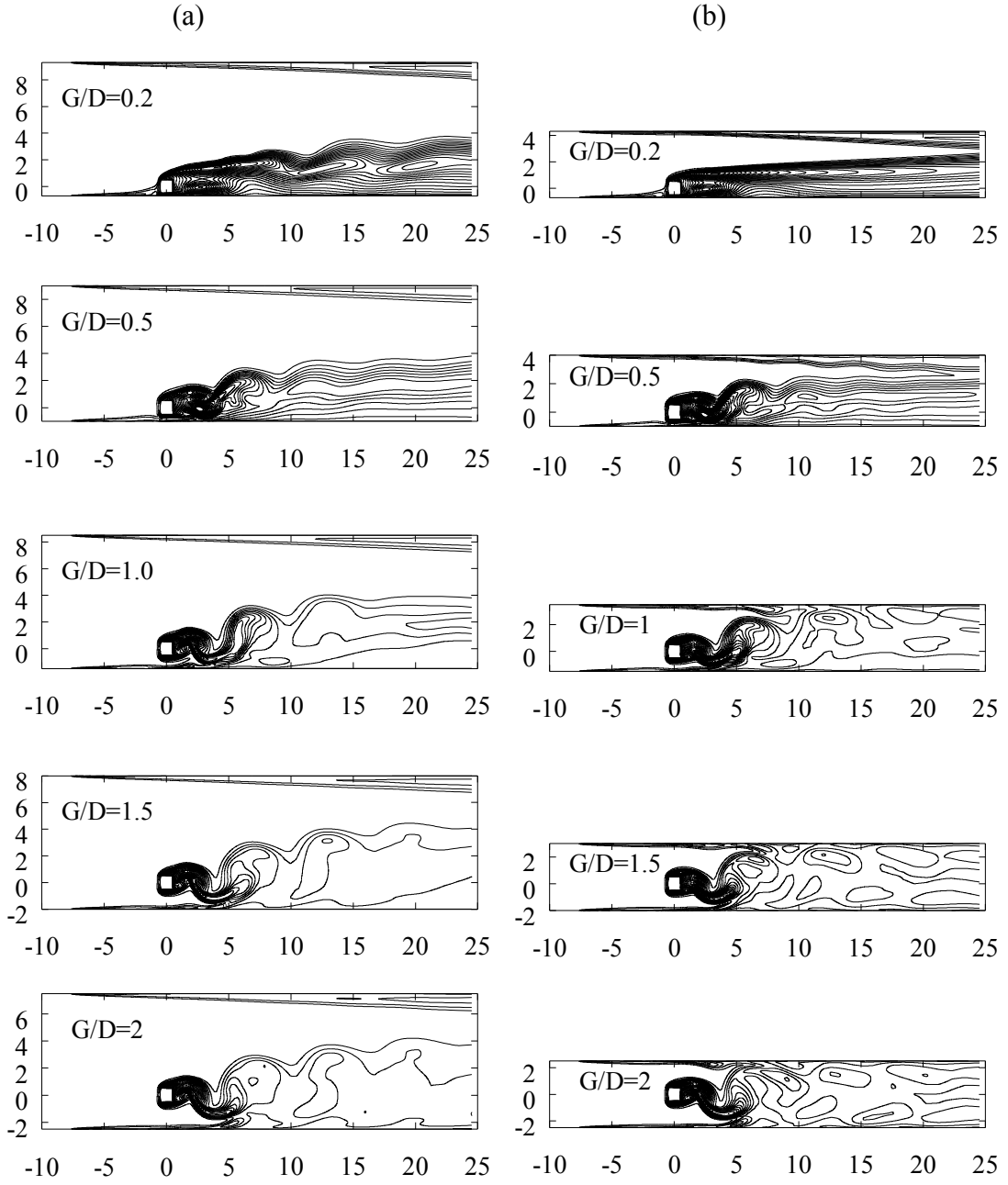
### 3.2 Silindir-Duvar Aralığının Etkisi

Blok oranının  $D/H = 0.1$  ve  $0.2$  değerleri için, değişik silindir-duvar aralıklarında silindir arkasındaki vorteks oluşumları şekil 3.4 ' de verilmiştir. Her iki blok oranında da,  $G/D = 0.2$  değeri için silindir arkasında vorteks meydana gelmediği görülmektedir (şekil 3.4, sütun (a) ve (b)).  $D/H = 0.1$  için (sütun (a)), silindirin üst yüzeyinden ayrılan sınır tabaka iz bölgesinde bükülmesine rağmen,  $G/D = 0.2$  ve  $D/H = 0.2$  için (sütun (b)) sınır tabakanın düz bir şekilde iz bölgesine yayıldığı görülmektedir.  $G/D = 0.5$  için, her blok oranında da silindirin üst kenarından ayrılan sınır tabakanın aşağı akış bölgesinde vorteks oluşturmaktadır. Vortekslerin oluşmaya başladığı kritik aralık Durao, et al., (1991) tarafından  $0.35D$ , Bailey, et al. (2002) tarafından  $0.4D$  olarak verilmiştir. Bu çalışmada  $D/H = 0.1$  ve  $0.2$  için elde edilen sonuçlar kritik uzaklığın  $0.5$  den küçük olduğunu göstermektedir.  $D/H = 0.2$  ve  $G/D = 0.5$  değerlerinde (sütun (b)) silindirin aşağı iz bölgesinde üst duvar üzerinde oluşan sınır tabaka silindirden ayrılan sınır tabaka ile birleşmektedir.  $G/D = 1$  için, her iki blok oranında da alt duvardan oluşan sınır tabaka aşağı iz bölgesinde silindirden oluşan vortekse katılmaktadır.  $D/H = 0.2$  için, üst duvardan ayrılan sınır tabakanın da  $x/D \approx 10$  da silindirde oluşan vortekslere katıldığı görülmektedir.  $G/D = 1.5$  ve  $2$  de silindirlerin arkasında daha kuvvetli vortekslerin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Silindir arkasında ve duvar yakınındaki çevrinti eğrilerinin boşluk oranları ile ( $G/D$ ) değişimi sütun (a)  $D/H = 0.1$ , sütun (b)  $D/H = 0.2$ .





Şekil 3.5. Silindir arkasında ve duvar yakınındaki eş kinetik enerji eğrilerinin boşluk oranları ile ( $G/D$ ) değişimi sütun (a)  $D/H = 0.1$ , sütun (b)  $D/H = 0.2$ .

Şekil 3.5 ' de Şekil 3.4 ' deki  $D/H$  ve  $G/H$  oranlarına karşılık gelen kinetik enerji değişimleri gösterilmiştir. Burada da kinetik enerji değişimlerinin silindir yakınında

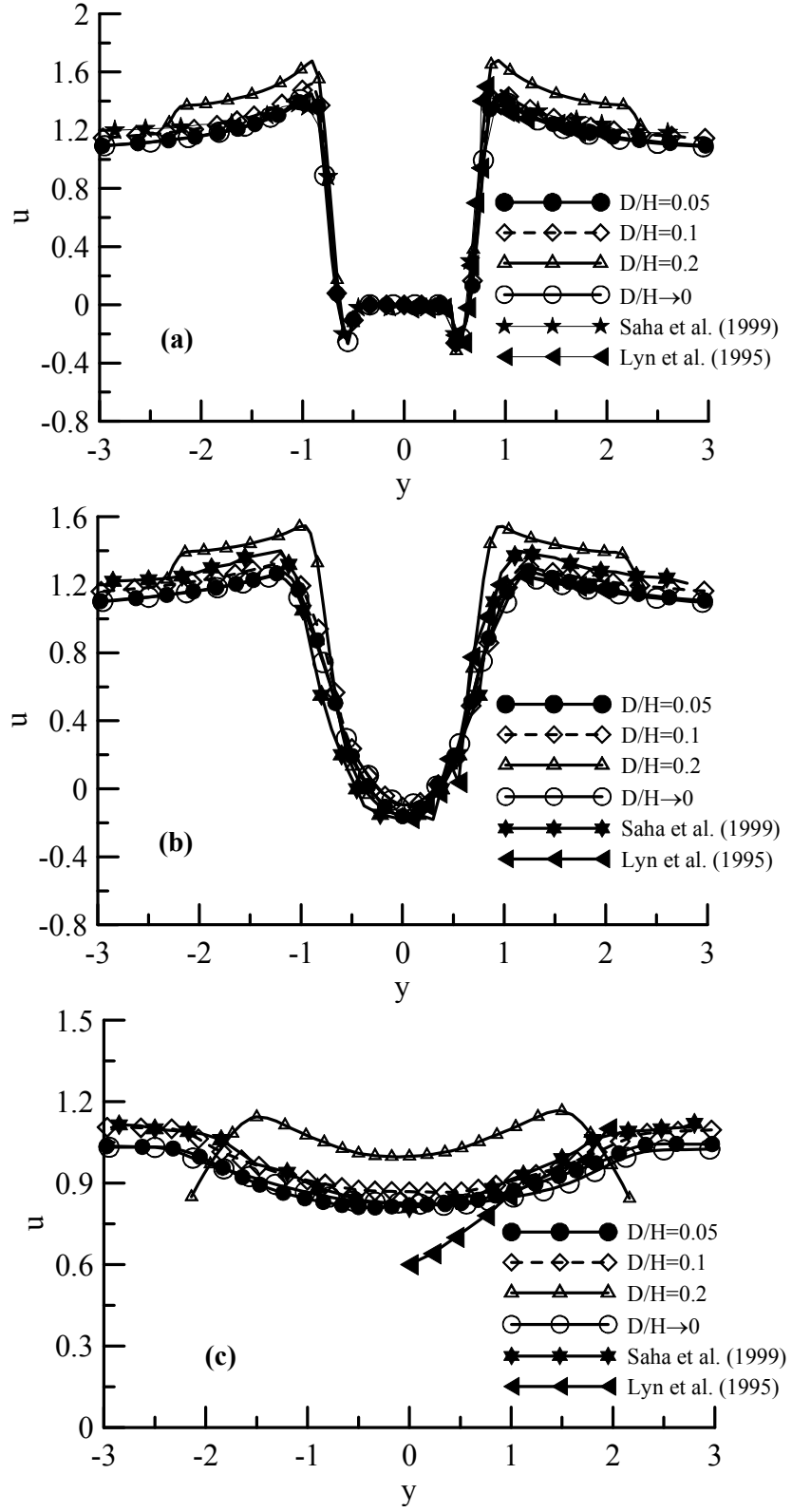
vorteks eğrileri ile benzerlik göstermektedir. Silindirden uzakta ise kinetik enerji üretimi zayıflamaktadır.

### 3.3 Ortalama Hız Dağılımları

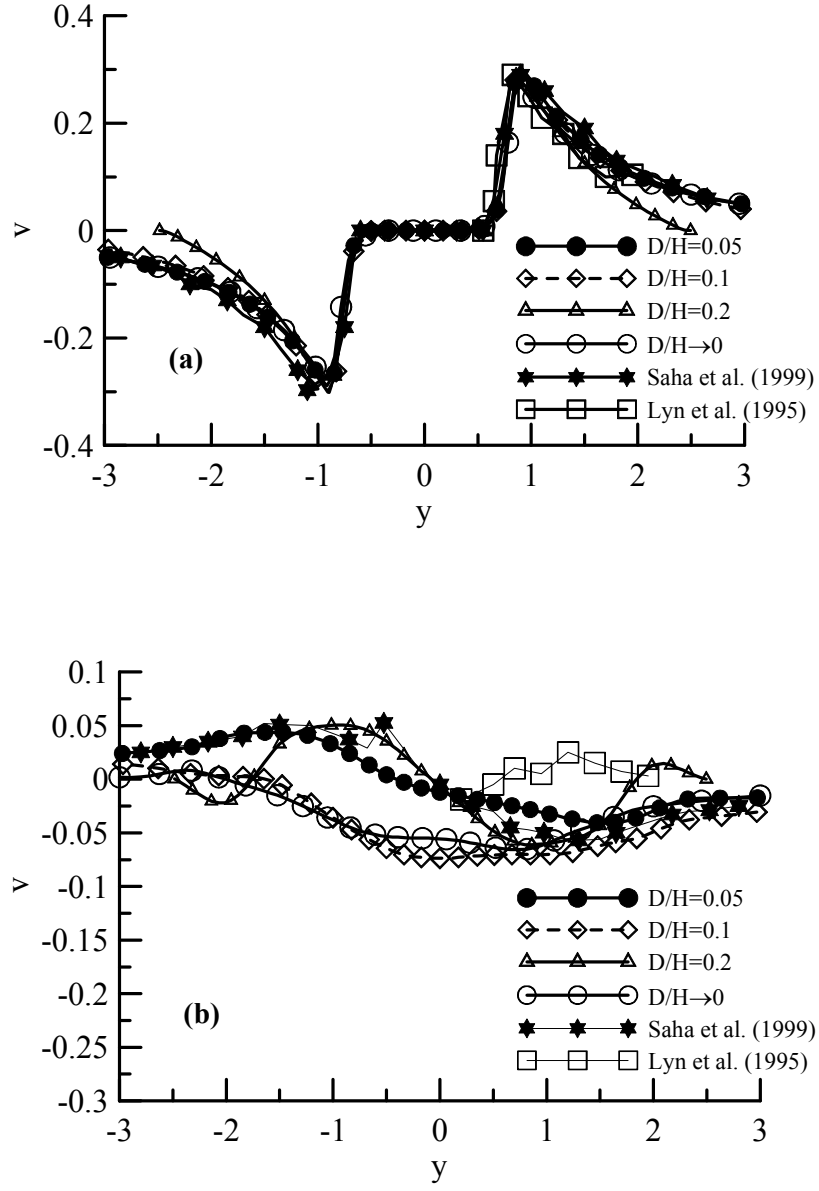
Şekil 3.6 serbest akış alanındaki silindir ve değişik blok oranlarında yerleştirilmiş silindir için, akım yönündeki ortalama hızın değişik aşağı akış yerlerindeki ( $x = 0, 1$  ve  $5$ ) dağılımlarını göstermektedir. Bu şekilde aynı zamanda Saha, et al.,' nin (1999) sayısal sonuçları ve Lyn, et al.,' nin (1995) deneysel sonuçları da gösterilmiştir. Bu çalışmada  $x = 0$  da (şekil 3.6 (a)),  $D/H = 0.05, 0.1$  ve serbest akış alanına yerleştirilmiş silindir hali için bulunan ortalama hız dağılımlarının yukarıda verilen çalışmalardaki sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.  $D/H = 0.2$  durumunda ise plakaların blok etkisi silindir yakınındaki ortalama hızların daha büyük değerlerde olmasına neden olmaktadır.  $x = 1$  de ise (şekil 3.6 (b))  $D/H = 0.05$  ve  $0.1$  için hesaplanan hız dağılımları Saha, et al.,' nin (1999) sonuçlarından biraz daha düşük fakat Lyn, et al.,' nin (1995) deney sonuçlarına daha yakındır. Burada da  $D/H = 0.2$  için ortalama hız değerleri daha büyüktür. Daha ileri aşağı akış bölgelerinde ise ( $x = 5$ ) (şekil 3.6 (c))  $D/H = 0.05$  ve serbest akış alanında silindir ( $D/H \rightarrow 0$ ) için ortalama hız değerleri Saha, et al.,'nin (1999) sonuçlarından daha düşük olmasına rağmen  $D/H = 0.1$  için hızlar Saha, et al., (1999) sonuçlarına daha yakındır. Bunun de nedeni Saha, et al.,' nin (1999) simülasyonlarını  $D/H = 0.125$  için gerçekleştirmiş olmalarıdır. Burada (şekil 3.6 (c))  $D/H$  oranının artması ile silindir yakınındaki zaman ortalama hızların arttığını dolayısı ile iz bölgesindeki hızların daha ileri akış bölgelerinde giriş hız değerlerine yaklaştığını göstermektedir. Lyn, et al.,' nin (1995) deneysel sonuçları  $x = 5$  için ,  $y \approx 0$  civarında ortalama hızların daha düşük olduğunu göstermektedir. Buradan sayısal modellerin iz bölgesindeki hızların giriş hızına daha kısa mesafede yaklaştığını tahmin ettiği sonucunu çıkarabiliriz. Şekil 3.7 akışa dik yöndeki hızın değişik aşağı akış yerlerindeki ( $x = 0$  ve  $5$ ) ortalama değerlerinin, blok oranları ile değişimini göstermektedir.  $x = 0$  da (şekil 3.7 (a))  $D/H = 0.05, 0.1$  ve silindirin uniform akış içerisinde bulunması durumunda ( $D/H \rightarrow 0$ ) hız dağılımının Saha, et al., (1999) ve Lyn, et al.,' nin (1995) sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.  $D/H = 0.2$

durumunda ise alt ve üst plakaların etkisinden dolayı sapmalar görülmektedir.  $x = 5$  durumunda ise ortalama  $v$  hız bileşenin farklı tahmin edilmesi sayısal metotların aşağı akış bölgesinde hızların giriş hızına yaklaşım uzaklıklarını farklı tahmin etmelerinden kaynaklanmaktadır. Merkez çizgide ( $y = 0$ ) akım yönündeki hız bileşenin  $x$  eksenini boyunca değişimi şekil 3.8 ' de gösterilmiştir.

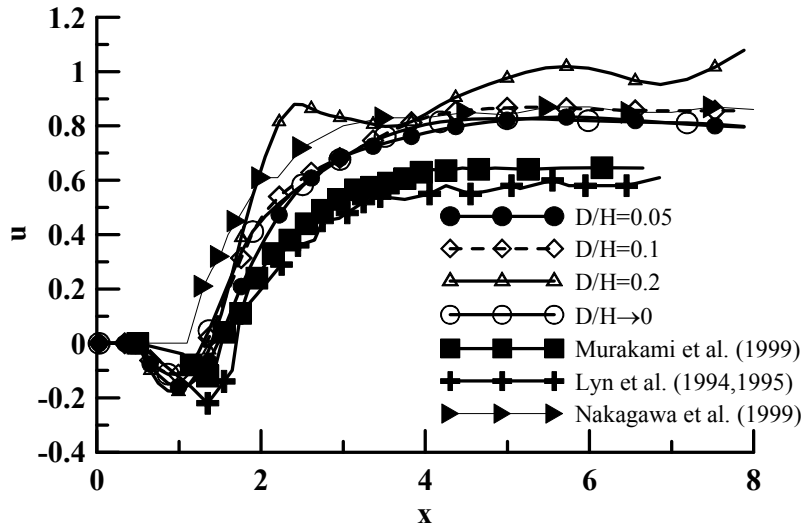
Bu çalışmada  $D/H = 0.1$  ve  $0.05$  için bulunan sonuçlar Nakagawa, et al.,'nin (1999) kare kesitli silindir için ( $D/H = 0.2$ ) bulduğu deneysel sonuçlar ile uyumlu, Lyn, et al.,' nin (1995) deneysel sonuçlarından ise büyüktür.  $D/H = 0.2$  için hesaplanan değerler ise Nagakawa, et al.,' nin (1999) sonuçlarından biraz yüksektir. Sonuçlar ve deneyler arasındaki farklılıklar, akışlardaki farklı türbülans yoğunluğundan, deneylerde farklı blok oranları kullanılmasından ve simülasyonlarda farklı sayısal metotlar kullanılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.6. Akış yönündeki hızın zaman ortalamaya profillerinin blok oranı ( $D/H$ ) ile değişimi (a)  $x=0$ , (b)  $x=1.0$  ve (c)  $x=5$



Şekil 3.7. Akışa dik yöndeki hızın zaman ortalama profillerinin blok oranı ( $D/H$ ) ile değişimi (a)  $x=0$  ve (b)  $x=5$

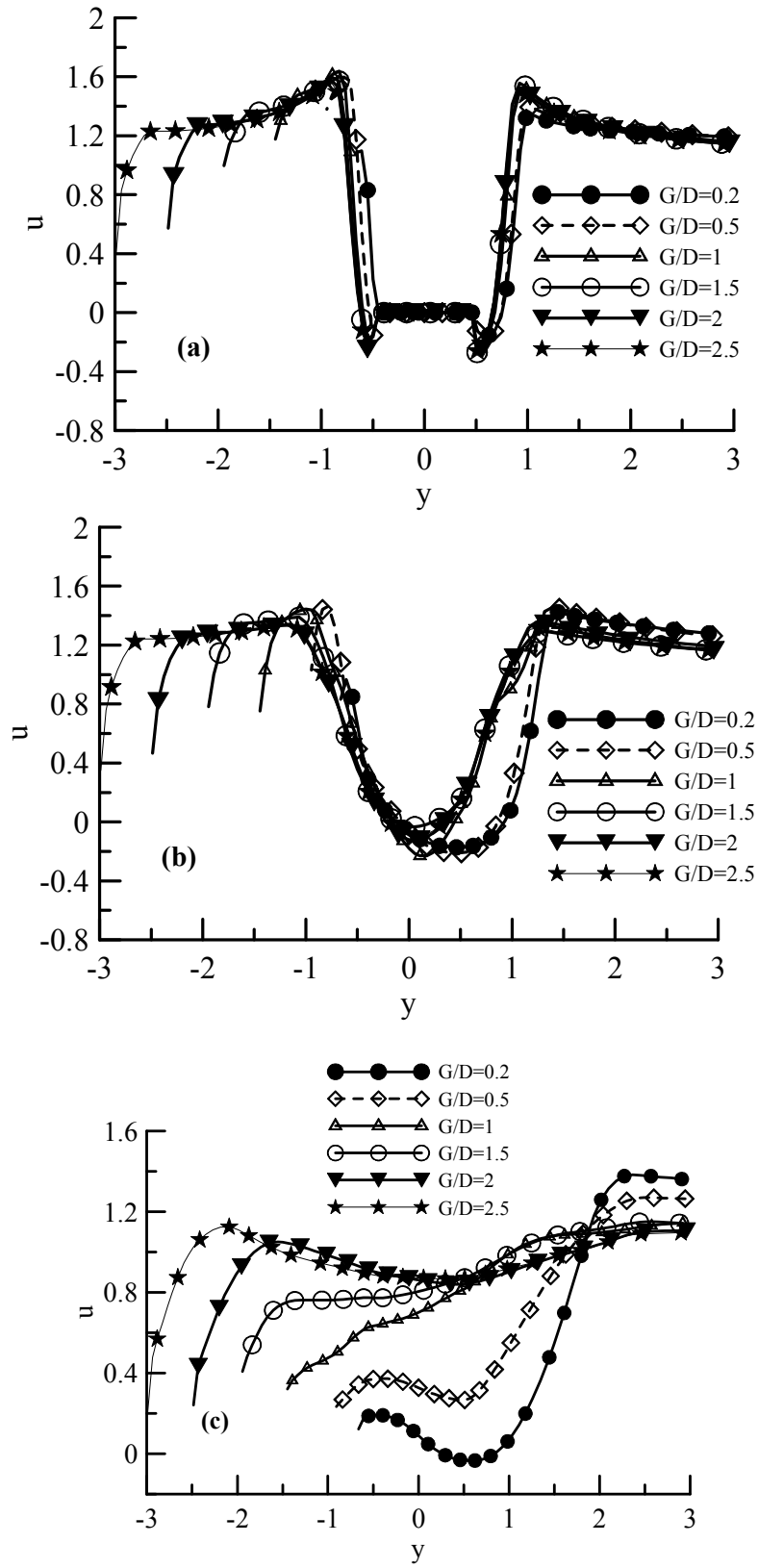


Şekil 3.8. Akış yönündeki hızın zaman ortalamasının merkez çizgi ( $y=0$ ) üzerindeki değerinin blok oranı ( $D/H$ ) ile değişimi.

### 3.4 Duvar-Silindir Aralığının Ortalama Hız Dağılımlarına Etkisi

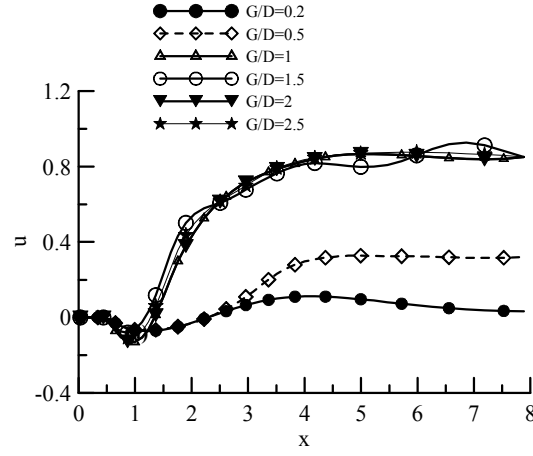
Blok oranı ( $D/H$ ) 0.1 için, değişik duvar-silindir aralıklarda  $x$ ' in 0,1 ve 5 değerlerinde elde edilen ortalama hızlar şekil 3.9 ' da gösterilmiştir. Aralığın  $G/D=0.2$  ve 0.5 değerleri için  $x=0$  da (şekil 3.9 (a)) silindirin üst kenarından oluşan sınır tabakanın alt taraftan oluşana göre biraz daha kalın olduğu görülmektedir.  $G/D=1, 1.5$  ve 2 de ise silindirin üst ve alt kenarlarından oluşan sınır tabakalar simetriktir. Bu farklı kalınlıktaki sınır tabakalar simetrik olmayan iz bölgesi oluşmasına neden olurlar. Şekil 3.9 (b) de silindir-duvar aralığı azaldıkça ( $G/D=0.2$  ve 0.5), duvarın etkisinin arttığı,  $G/D \geq 1$  değerlerindeyse duvarın etkisinin yakın aşağı akış bölgesinde az olduğu ve iz bölgesinde hızın  $x$ -bileşeninin ortalamasının simetrik oldu görülmektedir. Daha aşağı akış bölgelerindeyse (şekil 3.9 (c)), duvarlara eşit uzaklıktaki silindir halinden farklı olarak  $u$  hız bileşeninin  $y$ - eksen yönündeki dağılımı simetrik değildir. Bu durum şekil 3.4 sütun (a)' da gösterildiği gibi alt duvardan ayrılan sınır tabakanın silindirden ayrılan sınır tabakaya katılmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.10 ' de  $D/H=0.1$  için akış yönündeki hız bileşeninin  $y$ -ekseni boyunca değişimi gösterilmiştir.  $G/D=0.2$  değerinde yakın iz bölgesinde  $u$  hız bileşeni küçük değerlerdedir (yaklaşık olarak 0.1). Silindir-duvar aralığının artması ile ( $G/D=0.5$ ) ortalama  $u$  hız değeri de artmakta, aralığın daha da artması durumunda ise ( $G/D \geq 1$ ),  $u$ -hızının değişimi serbest akış

alanına yerleştirilmiş silindir haline benzer değişim göstermektedir.  $v$ -hız bileşeninin  $y$  eksenini boyunca değişimleri şekil 3.11 ' de verilmiştir.  $x = 0$  da, küçük silindir-duvar aralıklarında ( $G/D = 0.2$  ve  $0.5$ ) silindirin üst kenarın yakınında bu hız bileşeninin, büyük silindir aralıklarındakine göre ( $G/D \geq 1$ ) daha büyük değerlerde olduğu görölmektedir (şekil 3.11 (a)). Silindirin alt kenarı yakınıdaysa,  $G/D = 0.2$  ve  $0.5$  için bu hız bileşeni üst kenar yakınındaki değerlerinden daha küçüktür  $G/D = 1.5, 2$  ve  $2.5$  ise yaklaşık olarak simetriktir. Daha ileri aşığı akış bölgelerinde (şekil 3.11 (b)), duvardan ayrılan sınır tabaka ile etkileşimden dolayı  $v$ -hız bileşenlerinin düzenli olmadığı görölmektedir.

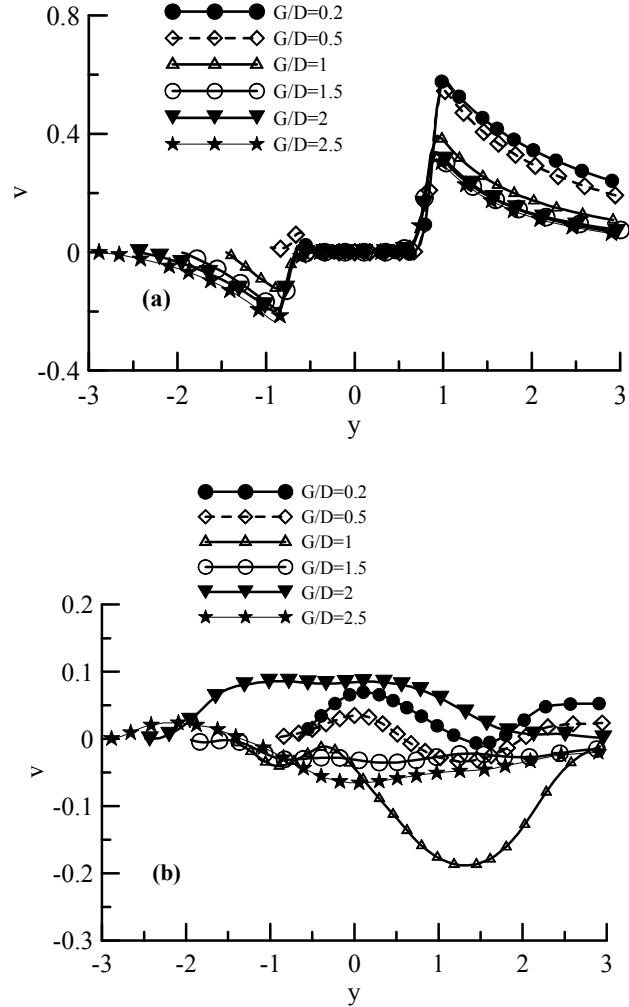


Şekil 3.9.  $D/H = 0.1$  için akış yönündeki hızın zaman ortalama profillerinin boşluk oranı ( $G/D$ ) ile değişimi. (a)  $x = 0$ , (b)  $x = 1$ , (c)  $x = 5$ .





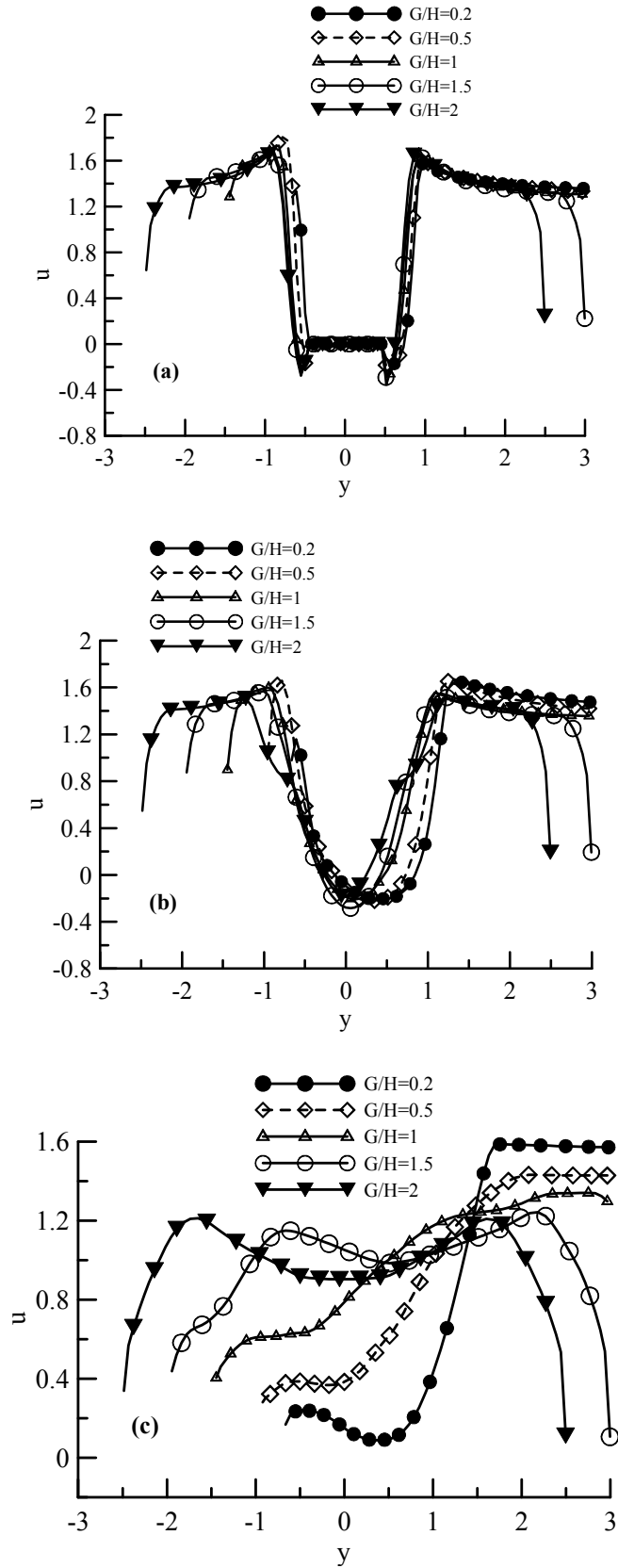
Şekil 3.10.  $D/H=0.1$  için akış yönündeki hızın zaman ortalamasının aralık oranı ( $G/D$ ) ile değişimi.



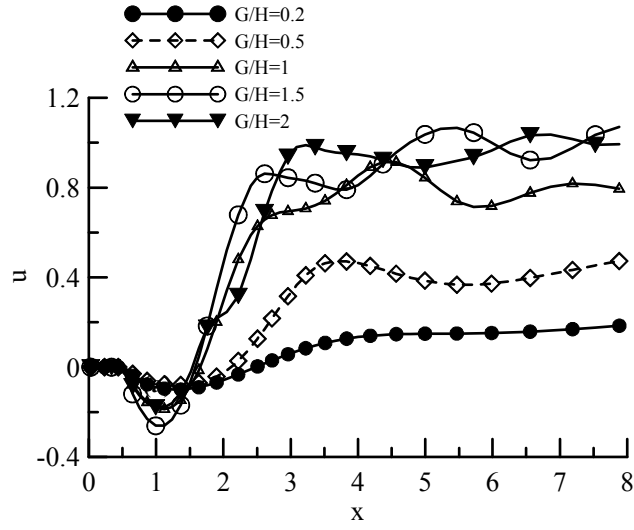
Şekil 3.11.  $D/H=0.1$  için akışa dik yöndeki hızın zaman ortalamasının merkez çizgi üzerindeki değerinin ( $y=0$ ) aralık oranı ( $G/D$ ) ile değişimi (a)  $x=0$ , (b)  $x=5$ .

Blok etkisinin daha fazla olması durumunda ( $D/H = 0.2$ ) ortalama  $u$ -hız bileşenin  $y$ -ekseni boyunca değişimi şekil 3.12 ' de verilmiştir.  $x = 0$  için  $u$ -hız bileşeni dağılımı (şekil 3.12 (a)),  $D/H = 0.1$  için verilen hız dağılımı ile (şekil 3.10 (a)) benzerlik göstermektedir. Silindirin hemen arkasında (şekil 3.12 (b)) silindir-duvar aralığının ( $G/D$ ) 0.2 ve 0.5 değerlerine ek olarak 1 ve 1.5 değerlerinde de hız dağılımı simetrik oluşmamaktadır.  $x = 5$  de,  $D/H = 0.1$  blok oranına benzer şekilde (şekil 3.10 (c))  $u$ -hız dağılımının düzgün olmadığı görülmektedir.

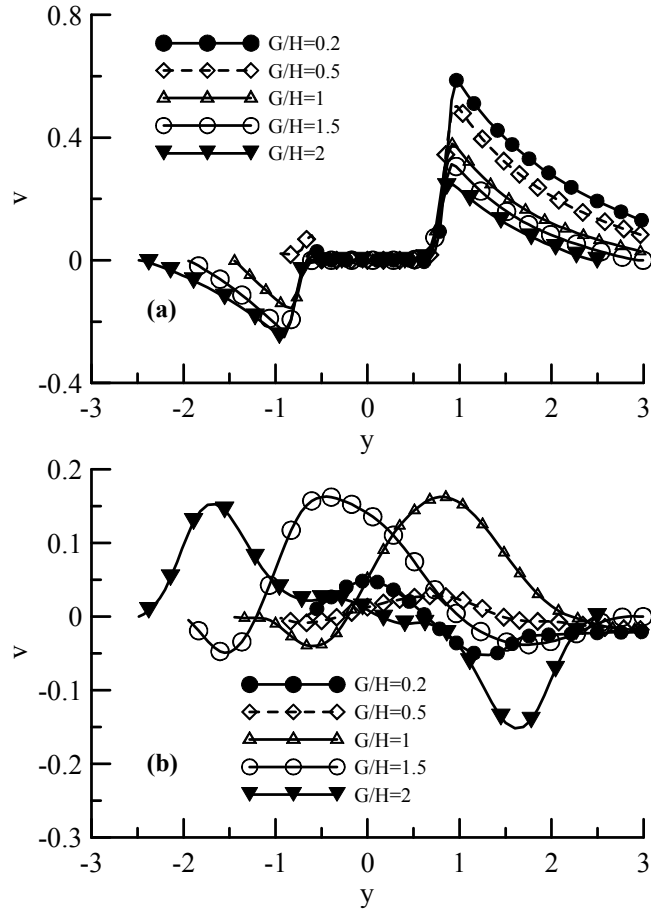
$D/H = 0.2$  blok oranı için  $u$ -hız bileşenin akış yönündeki değişimi de şekil 3.13 ' de gösterilmiştir. Burada da  $G/D = 0.2$  ve 0.5 için aralık arttıkça ortalama  $u$  değeri de artmaktadır.  $G/D = 1, 1.5$  ve 2 değerlerindeyse ortalama  $u$ -hız bileşenin salınım yaptığı görülmektedir. Bu alt ve üst plakalardan ayrılan sınır tabakaların aşağı akış bölgesinde silindirden ayrılan sınır tabaka ile etkileşiminden kaynaklanmaktadır.  $D/H = 0.2$  için akışa dik yöndeki hız bileşenin değişik  $G/D$  oranlarında merkez çizgi üzerindeki değişimi şekil 3.14 'te gösterilmiştir.  $x = 0$  da (şekil 3.14 (a)),  $G/D$  oranı arttıkça  $v$ -hızının azaldığı görülmektedir. Silindirin üst kısmındaki  $v$  hız bileşeni  $G/D = 0.2$  ve 0.5 için alt kısmındakilere göre daha büyük değerlerdedir.  $G/D = 1.5$  ve 2 de ise yaklaşık olarak simetriktir. Daha ileri arka akış bölgelerinde ise (şekil 3.14 (b)), düzgün olmayan  $v$ -hız bileşeni gözlemlenmektedir.



Şekil 3.12.  $D/H = 0.2$  için akış yönündeki hızın zaman ortalama profillerinin aralık oranı ( $G/D$ ) ile değişimi. (a)  $x = 0$ , (b)  $x = 1$ , (c)  $x = 5$ .



Şekil 3.13.  $D/H = 0.2$  için akış yönündeki hızın zaman ortalamasının aralık oranı ( $G/D$ ) ile değişimi.



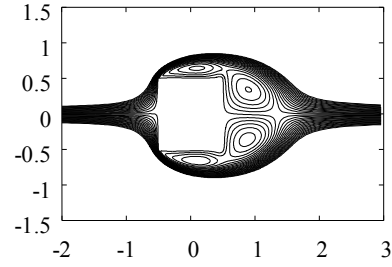
Şekil 3.14.  $D/H = 0.2$  için akışa dik yöndeki hızın zaman ortalamasının merkez çizgi üzerindeki değerinin ( $y = 0$ ) aralık oranı ( $G/D$ ) ile değişimi (a)  $x=0$ , (b)  $x=5$ .

### 3.5 Ortalama Akım çizgileri

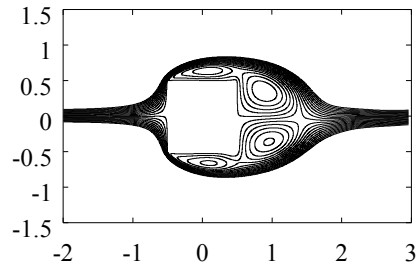
Şekil 3.15 ' de değişik zamanlarda alınan 20 akım çizgisinin ortalamasından elde edilen, akım çizgilerinin zaman ortalaması grlmektedir. Değişik blok oranlarında elde edilen eğriler serbest akış alanında kare kesitli silindir durumu ile karőılaőtırıldıklarında benzer oldukları grlmektedir.

Değişik silindir-duvar aralıklarında silindirlerin etrafındaki ortalama akım çizgileri Şekil 3.16 ' da verilmiştir. Sütun (a) ve (b) de sırasıyla blok oranları (D/H) 0.1 ve 0.2 için ortalama akım çizgileri gösterilmiştir.  $G/D = 0.2$  için her iki blok oranında da (D/H = 0.1 ve 0.2),

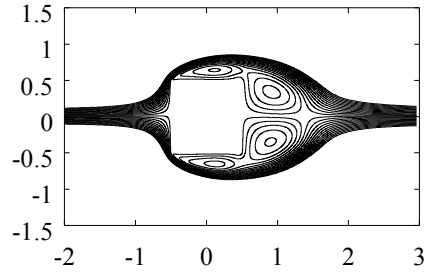
(a)



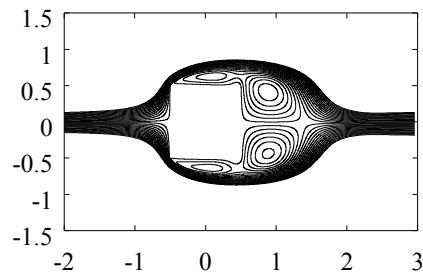
(b)



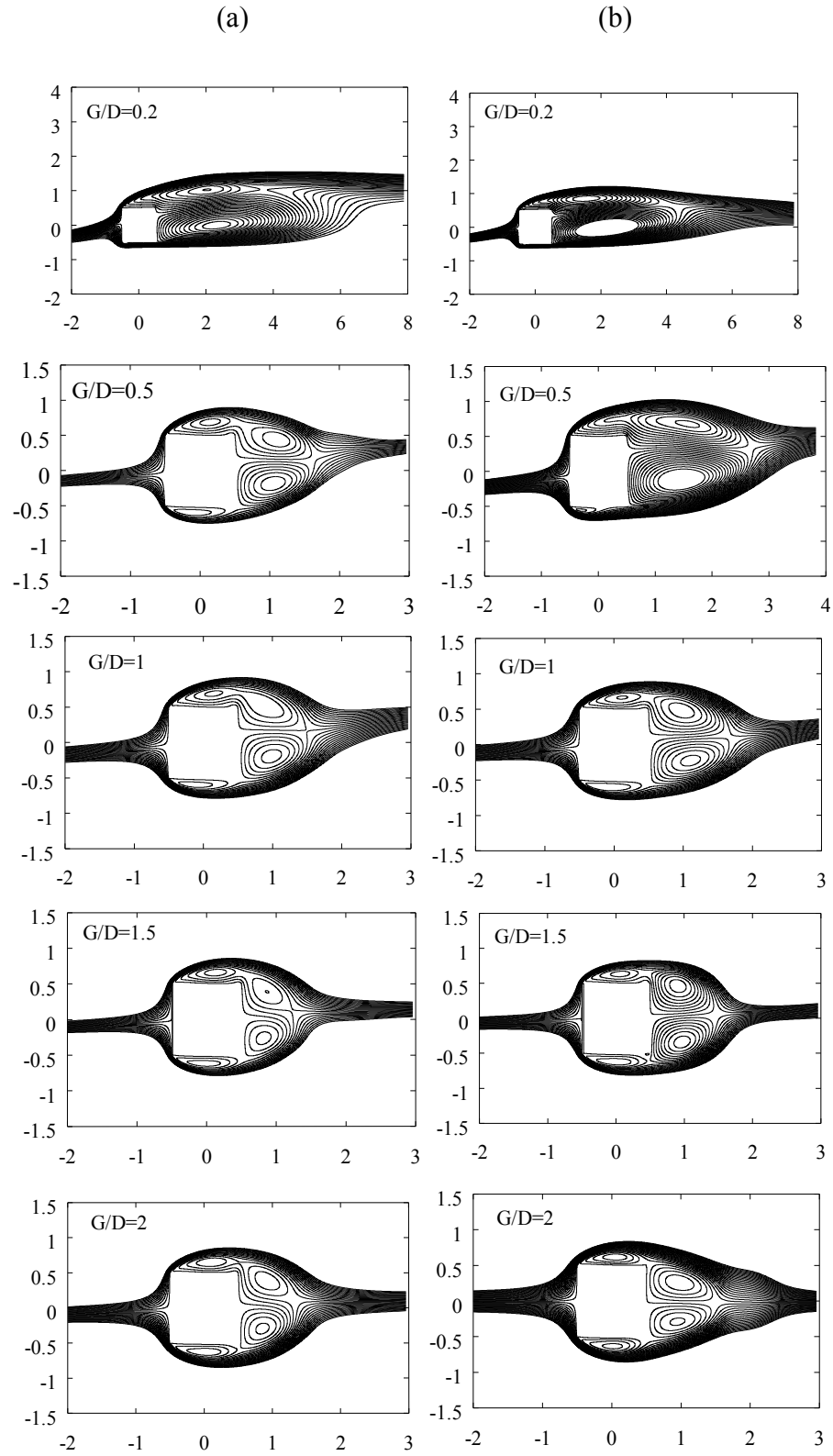
(c)



(d)



Şekil 3.15. Değişik blok oranlarında ortalama akım çizgilerinin değişimi. (a) Uniform hız alanında (b)  $D/H = 0.05$ , (c)  $D/H = 0.1$ , (d)  $D/H = 0.2$ .



Şekil 3.16. Silindir yakınındaki zaman ortalama akım çizgilerinin aralık oranı ( $G/D$ ) ile değişimi, sütun (a)  $D/H = 0.1$ , sütun (b)  $D/H = 0.2$ .

şekil 3.16 sütun (a ) ve (b) ortalama akım çizgileri silindirin arkasında simetrik değildir, silindirin hemen arkasında büyük bir sirkulasyon bölgesi ve hemen üzerinde daha küçük bir sirkulasyon bölgesi oluşur. Bu sirkulasyon bölgeleri  $D/H = 0.1, 0.2$  için sırasıyla yaklaşık olarak  $x/D = 5.5$  ve  $4.3$  olacak şekilde, daha ileri aşağı akış bölgelerine uzanır.  $G/D = 0.5$  'te blok etkisinin büyük olduğu  $D/H = 0.2$  'de silindirin arkasında oluşan sirkulasyon bölgesi de simetrik değildir. Diğer silindir duvar aralıklarında ( $G/H \geq 1$ ) silindir arkasındaki sirkulasyon bölgeleri simetriktir.

### 3.6 Blok Oranlarının Akış Parametrelerine Etkisi

Değişik blok oranlarında elde edilen akış parametreleri tablo 3.2 ' de gösterilmiştir. Burada kaldırma kuvveti katsayısı ortalama değerinin blok etkisi ile arttığı buna karşılık bu katsayının kare ortalama karekök değerinin azaldığı görülmektedir. Kaldırma kuvveti katsayısının ortalama değeri ise çok küçük değerlerdedir. Bu katsayının kare ortalama karekök değeri ise,  $D/H = 0.05$  ve  $0.1$  için uniform akış alanında kare kesitli silindir üzerindeki değere yakındır.  $D/H = 0.2$  blok oranında ise önemli ölçüde artmaktadır. Strouhal sayısı da benzer şekilde  $D/H = 0.2$  halinde önemli ölçüde artmaktadır.  $D/H = 0.2$  için bu çalışmada Strouhal sayısı  $0.168$  olarak tahmin edilmesine rağmen Nakagawa, et al., (1999)  $0.13$  olarak ölçmüşlerdir. Onların değerinin küçük olmasını deneylerindeki Reynolds sayısının düşük olmasından ( $Re = 3000$ ) kaynaklanabilir. Bu çalışmada  $D/H = 0.2$  için hesaplanan  $C_{Dmean}$  değeri Kim et al. 'nin sonucuna yakın olmasına rağmen,  $C_{Lsqrt}$  onların bulduğu değerden düşük  $St$  değeri ise onların sonuçlarından yüksektir.



Tablo 3.2. Farklı blok oranları için silindir üzerindeki aerodinamik kuvvetler ve Strouhal sayısı

| <b>Blok Oranı<br/>D/H</b>     | <b>Re</b> | <b>C<sub>Dmean</sub></b> | <b>C<sub>Dsqrt</sub></b> | <b>C<sub>Lmean</sub></b> | <b>C<sub>Lsqrt</sub></b> | <b>St</b> |
|-------------------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| 0                             | 20000     | 2.041                    | $5 \cdot 10^{-2}$        | $1.23 \cdot 10^{-3}$     | 1.025                    | 0.14      |
| 0.05                          | 20000     | 2,043                    | $4,44 \cdot 10^{-2}$     | $3,1 \cdot 10^{-3}$      | 0,99                     | 0,137     |
| 0.1                           | 20000     | 2,2                      | $4,07 \cdot 10^{-2}$     | $-6,9 \cdot 10^{-3}$     | 1,097                    | 0,144     |
| 0.2                           | 20000     | 2.69                     | $3,95 \cdot 10^{-2}$     | $3,4 \cdot 10^{-3}$      | 1,57                     | 0,168     |
| 0.25                          | 20000     | 3.015                    | $4.22 \cdot 10^{-2}$     | $3.96 \cdot 10^{-3}$     | 1.661                    | 0.189     |
| 0.2 (Kim et al.<br>2004)      | 3000      | 2.76                     | 0.15                     | -                        | 2.06                     | 0.124     |
| 0.2 (Nakagawa<br>et al. 1999) | 3000      | -                        | -                        | -                        | -                        | 0.13      |

### 3.7 Silindir-Duvar Aralığının Akış Parametrelerine Etkisi

Blok oranı  $D/H = 0.1$  ve  $0.2$  için silindir üzerindeki kaldırma kuvvet katsayısı, direnç katsayısı ve Strouhal sayılarının silindir-duvar aralıkları ( $G/D$ ) ile değişimi Tablo 3.3 ' de verilmiştir. Her iki blok oranında da  $C_{Dmean}$  katsayısı  $G/D = 1.5$  değerine kadar silindirin duvardan olan uzaklığının artması ile artar, daha büyük aralıklarda ise ( $D/H = 0.2$  için  $G/D = 2$ ,  $D/H = 0.1$  için  $G/D = 2, 2.5$ ) azalır.  $C_{Lsqrt}$  değeri de;  $D/H = 0.1$  için benzer eğilimi göstermesine rağmen,  $D/H = 0.2$  de ise aralığın ( $G/D$ ) artması ile bu değerinde artmaktadır.  $C_{Dsqrt}$  ve  $C_{Lmean}$  parametreleri ise düzenli bir değişim göstermemektedirler.

Strouhal sayısının değişimi blok oranlarına göre farklılık göstermektedir.  $D/H = 0.1$  için,  $G/D = 0.5$  de Strouhal sayısı en küçük değerindedir. Vorteks caddesinin oluştuğu  $G/D = 1$  de maksimum değerini almakta, sonra silindir-duvar aralığının

artması ile azalmaktadır.  $D/H = 0.2$  blok oranında ise  $G/D = 0.5$  de en büyük değerindedir ve sonra aralığın artması ile azalmaktadır.

Tablo 3.3.  $D/H = 0.1$  ve  $0.2$  için akış parametrelerinin silindir-duvar aralığı ( $G/D$ ) ile değişimi.

| D/H | G/D | $C_{Dmean}$ | $C_{Dsqr}$            | $C_{Lmean}$            | $C_{Lsq}$             | St    |
|-----|-----|-------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-------|
| 0.1 | 0.2 | 1.817       | $2.84 \times 10^{-2}$ | $8.75 \times 10^{-2}$  | $2.18 \times 10^{-2}$ | -     |
|     | 0.5 | 2.055       | $4.96 \times 10^{-2}$ | $1.2 \times 10^{-3}$   | 1.022                 | 0.139 |
|     | 1.0 | 2.32        | 0.103                 | -0.201                 | 1.118                 | 0.159 |
|     | 1.5 | 2.36        | $4.54 \times 10^{-2}$ | -0.115                 | 1.302                 | 0.157 |
|     | 2.0 | 2.316       | $7.72 \times 10^{-2}$ | $-7.81 \times 10^{-2}$ | 1.236                 | 0.152 |
|     | 2.5 | 2.277       | $5.57 \times 10^{-2}$ | $-5.5 \times 10^{-2}$  | 1.175                 | 0.149 |
| 0.2 | 0.2 | 2.494       | $1.58 \times 10^{-3}$ | 0.129                  | $4.49 \times 10^{-4}$ | -     |
|     | 0.5 | 2.573       | 0.112                 | -0.406                 | 0.314                 | 0.179 |
|     | 1.0 | 2.671       | $8.05 \times 10^{-2}$ | -0.191                 | 1.2                   | 0.177 |
|     | 1.5 | 2.68        | $4.05 \times 10^{-2}$ | $-6.15 \times 10^{-2}$ | 1.487                 | 0.171 |
|     | 2.0 | 2.676       | $3.9 \times 10^{-2}$  | $4.25 \times 10^{-2}$  | 1.509                 | 0.166 |

## BÖLÜM 4

### GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada iki paralel plaka arasına yerleştirilmiş kare kesitli silindirler etrafındaki akışa, duvarların blok etkisi ve silindir-duvar arasındaki boşluğun etkisi incelenmiştir.

Uniform akış alanına yerleştirilmiş silindir halinde hesaplanan  $C_{Dmean}$ ,  $C_{Lsqrt}$ , Strohal sayısı gibi akış parametrelerinin literatürdeki deneysel ve sayısal çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Büyük blok oranlarında ( $D/H = 0.2$ ) silindirlerin plakalara eşit uzaklıkta yerleştirilmesi durumunda, alt ve üst plakadan ayrılan sınır tabakaların, aşağı akış bölgesinde silindirden ayrılan sınır tabaka ile birleşmesi vortekslerin silindire daha yakın mesafede oluşmasına neden olmaktadır.

İncelenen bütün blok oranlarında, silindir-duvar aralığının 0.2 olması halinde, silindirlerin arkasında vorteks caddesi oluşmamaktadır.

Küçük blok oranında ( $D/H = 0.1$ ) ve incelenen tüm silindir-duvar ( $G/D$ ) aralıklarında; üst plakadan ayrılan sınır tabaka silindirden ayrılan sınır tabakaya katılmamasına rağmen, büyük blok oranında ( $D/H = 0.2$ ) silindirden ayrılan sınır tabaka ile birleşir.

Silindir plakalara eşit uzaklıkta yerleştirildiğinde, büyük blok oranında ( $D/H = 0.2$ ) aşağı akış bölgesinde hız silindire daha yakın mesafede girişteki uniform değerlerine yaklaşır.

Silindirler duvarlardan eşit uzaklıkta değilse, küçük silindir-duvar aralıklarında ( $G/D = 0.2, 0.5$ ) ortalama  $u$ -hız değerleri aşağı akış bölgesinde simetrik olmayan bir dağılım gösterir.

Büyük blok oranında ( $D/H = 0.2$ ), silindirin duvarlara uzaklığı eşit değilse, v-hız bileşeninin zaman ortalaması aşağı akış bölgesinde ( $x = 5$ ) y-ekseni boyunca salınımlı bir davranış gösterir.

Silindir duvar aralığının küçük olması durumunda ( $G/D = 0.2$ ) zaman ortalama akım çizgileri, silindirlerin arkasında simetrik olmayan uzun sirkulasyon bölgeleri meydana geldiğini gösterir.

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 artar.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Bailey, S. C. C. Kopp, G. A. and Martinuzzi, R. J. 2002, Vortex shedding from a square cylinder near a wall, *Journal of Turbulence*, 3, 1-18.
- Bosch, G., Kappler, M. and Rodi, W. 1996, Experiments on the flow past a square cylinder placed near a wall, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 13, 292-305.
- Bosch, G. and Rody, W., 1998, Simulation of vortex shedding past a square cylinder with different turbulence models, *International journal for numerical methods in fluids*, 28, 601-611
- Cigada, A., Malavasi, S. Ve Vanali, M. 2006, Effects of an asymmetrical confined flow on a rectangular cylinder, *Journals of fluids and structures*, 22, 213-227.
- Cordes, J. 1992, Entwicklung eines zwei-schichten-turbulenzmodells und seine anwendung auf abgelöste, zwei-dimensionale strömungen, Ph. D. Thesis, Universität Karlsruhe.
- Davis, R. W., Moore, E. F. ve Purtell, L. P. 1984, A numerical-experimental study of confined flow around rectangular cylinders, *Physics of fluids*, 27, 46-59.
- Durao, D. F. G, Gouveia, P. S. T. and Pereira, J. C. F. 1991, Velocity characteristics of the flow around a square cross section cylinder placed near a channel wall, *Experiments in Fluids*, 11, 341-350.
- Grass, A. J., Raven, P. W. J., Stuart, R. J., and Bray, J. A. 1984, The influence of boundary layer velocity gradients and bed proximity on vortex shedding from free spanning pipelines, *Journal of energy resources technology*, 106, 70-78.
- Kato, M. ve Launder, B. E., 1993, The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders, *Proc. 9th Symposium on Turbulent Shear Flows*, Kyoto, Japan, (1993) 10-14.
- Kim, D., Yang, K. Ve Senda, M. 2004, Large eddy simulation of turbulent flow past a square cylinder confined in a channel, *Computers ad fluids*, 33, 81-96.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K. 1999, Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, *Journal of wind engineering*, 80, 263-286.
- Lyn, D. A., Einav, S., Rodi, W. and Park, J. H., (1995), A laser-doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent nearwake of a square cylinder, *Journal of Fluid mechanics*, 304, 285-319.
- Mahir, N. 2009, Three-dimensional flow around a square cylinder near a wall, *Ocean Engineering*, 36, 357-367.
- Martinuzzi, R. J., Bailey, S. C. C. and Kopp, G. A. 2003, Influence of wall proximity on vortex shedding from a square cylinder, *Experiment in Fluids*, 34, 585-596.
- Mukhopadhyay, A., Biswas, G. ve Sundararajan T., 1992, Numerical investigation of confined wakes behind a square cylinder in a channel, 14, 1473-1484.
- Murakami, S. And Iizuka S, 1999, Cfd analysis of turbulent flow past square cylinder using dynamic les, *Journal of fluids and structures*, 13, 1097-1112.
- Nakagawa, S., Nitta, K., Senda, M., 1999, An experimental study on unsteady turbulent near wake of a rectangular cylinder in channel flow, 27, 284-294.
- Norris, L.H. ve Reynolds, W. C. 1975 Turbulent channel flow with moving wavy boundary. Report No. FM-10, Stanford University, Department of Mechanical Engineering, U.S.A.
- Okajima, A. 1982, Strouhal numbers of rectangular cylinders, *Journal of fluid mechanics*, 123, 379-398.
- Price, S. J., Sumner, D., Smith, J. G., Leong, K. Ve Paidoussis, P. 2002, Flow visualization around a circular cylinder near to a plane wall, *Journal of Fluids and Structures*, 16, 175-191.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Rodi, W. 1991 Experience with two-layer models combining the  $k$ - $\varepsilon$  model with a one-equation model near the wall. AIAA Paper 91-0216
- Saha, A. K., Biswas, G., Muralidhar, K, 1999, Numerical study of the turbulent unsteady wake behind a partially enclosed square cylinder usig RANS, Computer methods in applied mechanics and engineering, 178, 323-341.
- Saha, A. K., Muradilhar, K., Biswas, G., (2000), Experimental study of flow past a square cylinder at high Reynolds numbers, Experiments in fluids, 29, 553-563.
- Shimada, K, ve Ishihara, K, 2002, Application of a modified k- $\varepsilon$  model to the prediction of aerodynamic characteristics of rectangular cross-section cylinders, Journal of Fluids and Structures 16(4), 465 – 485.
- Song C. S. ve Park, S. O., 2009, Numerical simulation of flow past a square cylinder using Partially-Averaged Navier–Stokes model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 97, 37-47.
- Taniguchi, S. Ve Miyakoshi, K. 1990, Fluctuating fluid forces acting on a circular cylinder and interference with a plane wall, Experiments in Fluids, 9, 197-204.