

66400

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKINTILI DENİZ ORTAMINDA TABANA OTURAN
SİLİNDİRLERE ETKİYEN KUVVETLER**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Şevket ÇOKGÖR

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : SU MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 1997

**AKINTILI DENİZ ORTAMINDA TABANA OTURAN
SİLİNDİRLERE ETKİYEN KUVVETLER**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Şevket ÇOKGÖR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Mart 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Haziran 1997

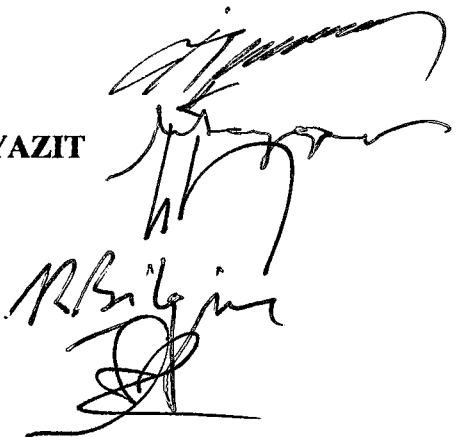
Tez Danışmanı : Prof.Dr. İlhan AVCI

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Mehmetçik BAYAZIT

Prof.Dr. İstemi ÜNSAL

Prof.Dr. Recai BİLGİN

Prof.Dr. Sebahattin ÜÇ



HAZİRAN 1997

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında gösterdiği yakın ilgi ve teşviklerinden dolayı, danışmanım Sayın Prof.Dr. İlhan Avcı'ya,

Çalışma sırasında değerli fikirlerinden ve tecrübelerinden yararlandığım Sayın Prof.Dr. B. Mutlu Sümer'e,

Çalışmanın her safhasında yanımda olan ve beni destekleyen eşim Emine Çokgör'e, teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TÜBİTAK İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu (İNTAG) tarafından 816 nolu araştırma projesi ile desteklenmiştir. Sağladıkları destek için kendilerine teşekkür ederim.

Mart 1997

Şevket Çokgör

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SEMBOL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiix
ÖZET	xix
SUMMARY	xx
BÖLÜM 1 ÇALIŞMANIN AMACI VE ÖNEMİ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	2
BÖLÜM 2 KARARLI AKIM ORTAMINDA YERALAN BİR SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIM ALANI VE SİLİNDİRE ETKİYEN KUVVETLER	3
2.1. Silindir Etrafındaki Akım Rejimleri	3
2.2. Çevri Kopması	8
2.2.1. Çevri Kopmasının Oluşum Mekanizması	8
2.2.2. Çevri Kopması Frekansı	10
2.2.2.1. Yüzey pürüzlülüğünün çevri kopması frekansı üzerine etkisi	14
2.2.2.2. Silindiri etkileyen akımın, üniform olmayışının çevri kopması frekansı üzerine etkisi	15
2.2.2.3. Silindir tabana yakınlığının çevri kopması üzerine etkisi	17
2.3. Kararlı Akım Ortamında Yeralan Bir Silindir Üzerindeki Kuvvetler	20
2.3.1. Sürüklenme ve Kaldırma Kuvveti	20
2.3.2. Ortalama Sürüklenme Kuvveti	21
2.3.3. Kararlı bir akım ortamında yeralan silindire etkiyen kuvvetlerin çalkantı bileşeni	33
2.4. Katı Cidar Yakınındaki Bir Silindir Üzerindeki Kuvvetler	35
2.4.1. Duvar Yakınındaki Bir Silindire Etkiyen Sürüklenme Kuvveti	36
2.4.2. Duvar Yakınındaki Bir Silindire Etkiyen Kaldırma Kuvveti	40
2.4.3. Katı Cidar Yakınındaki Silindire Etkiyen Kaldırma Kuvvetinin Çalkantı Bileşeni	45

BÖLÜM 3 DALGA ETKİSİ ALTINDA, SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIM VE SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ KUVVETLER	48
3.1 Silindir Etrafındaki Akım Rejimleri	48
3.2. Keulegan-Carpenter Sayısının Fonksiyonu Olarak Akım Rejimleri	49
3.2.1. Çevri Kopması Rejimleri	52
3.2.2. Tek Çevri Çiftinin Meydana Geldiği Çevri Kopması Rejimi ($7 < KC < 15$)	53
3.2.3. İki Veya Daha Fazla Çevri Çiftinin Oluştığı Rejim	55
3.3. Salınımlı Hareket Akım Rejimlerinde Reynolds Sayısının Etkisi	58
3.4. İkincil Akıntılar (<i>Streaming</i>)	60
3.5. Salınımlı Akım Ortamında Bulunan Silindir Üzerindeki Kuvvetler	61
3.5.1. Akım Doğrultusundaki Kuvvet	62
3.5.1.1. Ek kütle (hydrodynamic mass) kuvveti	62
3.5.1.2. Froude-Krylov kuvveti	64
3.6. Dalga Kuvvetlerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler	65
3.6.1. Morrison Denklemi	66
3.6.2. Sürüklenme Kuvveti ile Atalet Kuvvetinin Karşılaştırılması	67
3.6.3. Akım Doğrultusundaki Kuvvet Katsayılarının (C_D , C_M), KC İle Değişimi	69
3.6.4. Reynolds Sayısının (Re), Akım Doğrultusundaki Kuvvet Katsayıları (C_D , C_M) Üzerindeki Etkisi	70
3.6.5. Dalga Kuvvetlerinin Hesabında Morison Denkleminin Uygunluğu	72
3.6.6. Dalga Hareketinin Oluşturduğu Kaldırma Kuvveti	74
3.7. Silindirin Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi	79
3.8. Akım Doğrultusunda Kuvvet Sabitlerinin Belirlenmesi	80
3.9. Akım ve Dalga Etkisinin Birlikte Görüldüğü Akım Etkisinde Silindire Etkiyen Kuvvetler	84
3.10. Dalga Etkisinde Katı Cidar Yakınındaki Silindir Etrafındaki Akım Alanı ve Silindire Etkiyen Kuvvetler	90
3.10.1. Akım Rejimleri	91
3.10.2. Katı Cidar Yakınındaki Silindirde Kuvvet Sabitleri	105
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	112
4.1. Çalışmanın Amacı	112
4.2. Çalışmanın Kapsamı	112
4.3. Deney Sistemi	114
4.3.1. Deney kanalı	114
4.2.2. Model silindirler	123
4.2.3. Ölçme ve değerlendirme sistemi	125
4.2.3.1. Dalga ölçme sistemi	125
4.2.3.2. Hız ölçümleri	125
4.2.3.3. Basınç ölçümleri	125
4.2.3.4. Verilerin toplanma, işleme ve değerlendirme sistemi	127

5.2. Silindire Etkiyen Kuvvetler Ve Kuvvet Katsayılarının Belirlenmesi	131
5.3. Kuvvet Katsayıları (C_D , C_M , C_{LMAX})	134
5.3.1. Kararlı Akım Durumunda Kuvvet Katsayılarının Değişimi ($h=40\text{cm}$)	134
5.3.2. Sadece Dalga Etkisinde Kuvvet Katsayılarının Değişimi ($h = 40 \text{ cm}$)	138
5.3.3. Akım İle Dalganın Birlikte Görülmesi Durumunda Kuvvet Katsayılarının Değişimi ($h=40 \text{ cm}$)	152
5.3.4. $h=20\text{cm}$ su derinliğinde kuvvet katsayılarının değişimi	178
 BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER	 182
 KAYNAKLAR	 185
 EK	 192
 ÖZGEÇMİŞ	 200

SEMBOL LİSTESİ

A	: Silindirin en kesit alanı
a	: Salınımlı hareketin genliği
C_D	: Sürükleme kuvveti katsayısı
$\overline{C}_D$	: Ortalama sürükleme kuvveti katsayısı
C_L	: Kaldırma kuvveti katsayısı
$\overline{C}_L$	: Ortalama kaldırma kuvveti katsayısı
C'_L	: Kaldırma kuvveti çalkantı bileşeni
C_M	: Atalet kuvveti katsayısı
C_m	: Ek kütle (hidrodinamik kütle) katsayısı
C_p	: Basınç sabiti
D	: Silindirin çapı
e	: Silindirin gömülme derinliği ya da silindir ile taban arasındaki açıklık
f_v	: Çevri kopmasının frekansı
F	: Silindire etkiyen kuvvet
F_D	: Sürükleme kuvveti
$\overline{F}_D$	: Toplam ortalama sürükleme kuvveti
F'_D	: Sürükleme kuvvetinin çalkantı bileşeni
$\overline{F}_f$	: Ortalama sürtünme sürükleme kuvveti
F_m	: Silindir üzerinde ölçülen kuvvet

f_L	: Kaldırma kuvveti frekansı
$\bar{F}_L$	: Ortalama kaldırma kuvveti
F_L'	: Kaldırma kuvvetinin çalkantı bileşeni
F_p	: Silindire etkidiği tahmin edilen kuvvet
$\bar{F}_p$	: Ortalama şekil sürüklenme kuvveti
F_x	: Silindire etkiyen kuvvetin akım doğrultusundaki bileşeni
F_y	: Silindire etkiyen kuvvetin akıma dik doğrultudaki bileşeni
f_v	: Çevri kopması frekansı
f_w	: Salınımlı hareketin frekansı
F_{yA}	: Duvardan yukarı doğru oluşan kaldırma kuvvetinin maksimum değeri
F_{yT}	: Duvara doğru oluşan akıma dik doğrultudaki kuvvetin maksimum değeri
h	: Su derinliği
k	: Silindir üzerindeki pürüzlülüklerin yüksekliği
k_s	: Silindir üzerindeki pürüzlülüklerin Nikuradse pürüzlülüğü olarak eşdeğeri
KC	: Keulegan-Carpenter sayısı
m	: Silindirin kütlesi
m'	: Ek (hidrodinamik) kütle
p	: Basınç gerilmesi
p_o	: Hidrostatik basınç
$\bar{p}$	: Silindir yüzeyindeki basıncın zamansal ortalama değeri
R	: Silindirin yarıçapı
Re	: Reynolds sayısı
S	: Silindirin yüzey alanı
St	: Strouhal sayısı

t	: Zaman
T_w	: Salınımlı hareketin periyodu
T_t	: Veri toplama süresi
T_v	: Çevri kopması periyodu
T_ω	: Salınımlı hareketin hakim periyodu
U	: Akım hızı [salınımlı akımda $U=U_m \sin(\omega t)$, kararlı akımda $U=U_c$]
U_a	: Akımın silindir eksen seviyesindeki hızı
U_c	: Kararlı akım hızı
U_m	: Salınımlı harekette (dalga durumunda) oluşacak maksimum hız
U_b	: Silindirin hızı
$\dot{U}$	: Akımın ivmesi
U_s	: Akımın durak noktası seviyesindeki hız
x	: Diğer silindirin ölçüm silindirine göre uzaklığı
V	: Silindir hacmi
w	: Salınımlı hareketin (dalga hareketinin) açısal frekansı
α	: Kararlı akım hızının salınımlı harekette oluşacak maksimum hıza oranı
β	: Kayma dikliği
δ	: Sınır tabakasının kalınlığı
ω	: hareketin açısal frekansı
ρ	: Akışkanın özgül kütlesi
τ_0	: Kayma gerilmesi
$\bar{\tau}_0$	: Kayma gerilmesinin zamansal ortalama değeri
ν	: Akışkanın kinematik viskozitesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Kararlı akım ortamında yer alan bir silindir etrafındaki akım rejimleri	6
Şekil 2.2. Silindirin arkasında, kararlı akımında Reynolds sayısındaki artışla çevri kopmasının oluşumu (HAMANN 1936)	7
Şekil 2.3. Silindir etrafında akım bileşenlerinin adlandırılması	7
Şekil 2.4. Silindir yüzeyinde kayma tabakası oluşumu	9
Şekil 2.5. Silindirin iz bölgesinde çevri kopmasının meydana gelişi	9
Şekil 2.6. Strouhal (St) sayısının, Re sayısı ile (akım rejimlerine göre) değişimi	11
Şekil 2.7. Çeşitli akım rejimlerinde silindire etkiyen düşey doğrultudaki kuvvetin spektrum analizi a) Alt kritik, $Re=1.3 \times 10^5$, b) Süper kritik, $Re=7.2 \times 10^5$, c) Üst geçiş bölgesi, $Re=1.9 \times 10^6$, d) Üst geçiş bölgesi, $Re=3.7 \times 10^6$, e) Transkritik akım rejimi başlangıcı, $Re=5.9 \times 10^6$, f) Transkritik, $Re=7.1 \times 10^6$ (SCHEWE 1983)	12
Şekil 2.8. Farklı çevri kopması rejimlerinde ayrılma noktalarının yerleri	13
Şekil 2.9. Değişik yüzey pürüzlülüğüne sahip silindirlerde Strouhal sayısının Reynolds sayısı ile değişimi, (ACHENBACH VE HEINCKE 1981)	14
Şekil 2.10. Kararlı akımın silindir enkesiti boyunca üniform olmayışı	15
Şekil 2.11. Değişik kayma dikliklerinde, Strouhal sayısının Re sayısı ile değişimi (KIYA ve diğ. 1980)	16
Şekil 2.12. e/D ile çevri kopması frekansının değişimi (BEARMAN ve ZDRAVKOVICH 1978)	18
Şekil 2.13. Normalize edilmiş Strouhal sayısının e/D ile değişimi (GRASS ve diğ. 1984);(RAVEN ve diğ. 1985)	19
Şekil 2.14. Kararlı akım ortamında yeralan bir silindir etrafındaki basınç dağılımının ve silindire etkiyen kuvvetin bileşenlerinin zamanla değişimi, $Re = 1.1 \times 10^5$, $D=8$ cm, $U = 1.53$ m/s (DRESCHER 1956)	22

Şekil 2.15. Sürüklenme ve kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi ($Re = 1.1 \times 10^5$);(DRESCHER 1956)	23
Şekil 2.16. Kararlı akım ortamında yeralan bir silindir yüzeyinde oluşacak gerilmeler	23
Şekil 2.17. Silindir üzerinde basınç ve yüzey kayma gerilmesinin zamansal ortalamasının dağılımı ($Re=10^5$)(ACHENBACH 1968)	24
Şekil 2.18. Ortalama sürtünme sürüklenme kuvvetinin toplam sürüklenme kuvvetine oranının, Re sayısı ile değişimi, (ACHENBACH 1968)	26
Şekil 2.19. Değişik Reynolds sayılarında, silindir üzerinde basınç ve kayma gerilmesi dağılımı, (ACHENBACH 1968)	26
Şekil 2.20. Sürüklenme katsayısının ($\bar{C}_D$) Re sayısı ile değişimi, (SCHLICHTING 1979)	29
Şekil 2.21. Silindir üzerinde basınç dağılımı (ACHENBACH (1968)' ın çalışmasındaki grafikler yeniden düzenlenmiştir)	29
Şekil 2.22. Silindir üzerinde ayrılma noktasının yerinin Re sayısı ile değişimi (ACHENBACH 1968)	30
Şekil 2.23. Değişik pürüzlülüğe sahip silindirlerde ortalama sürtünme sürüklenme kuvvetinin toplam sürüklenme kuvvetine oranının Re sayısı ile değişimi (ACHENBACH 1971)	30
Şekil 2.24. Ortalama sürüklenme kuvveti katsayısının($\bar{C}_D$) değişik yüzey pürüzlülüklerinde (k_s/D) Re sayısı ile değişimi (ACHENBACH ve HEINCKE 1981)	31
Şekil 2.25. Kararlı akım ortamındaki silindirde değişik yüzey pürüzlülüklerinde sınır tabakasından ayrılma noktasının silindir üzerindeki açısal yeri, (ACHENBACH 1971)	33
Şekil 2.26. Kararlı akım ortamında; a) cidardan bağımsız b) katı cidar yakınında durumdaki silindir üzerinde ayrılma noktasının yeri	36
Şekil 2.27. Duvar yakınında yer alan silindirde duvara değişik yakınlık durumlarına göre silindir üzerinde oluşacak basınç dağılımları, (BEARMAN ve ZDRAVKOVICH 1978)	37
Şekil 2.28. Ayrılma açısının e/D ile değişimi, $Re=6 \times 10^3$ (JENSEN ve SÜMER 1986)	37

Şekil 2.29. Sürüklenme kuvveti katsayısının e/D ile değişimi, (ZDRAVKOWICH 1985);(KIYA 1968);(ROSHKO 1975)	39
Şekil 2.30. Ortalama sürüklenme kuvveti katsayısında ($\overline{C}_D$), katı cidar etkisi ile görülen değişim	39
Şekil 2.31. Sürüklenme kuvveti katsayısının e/D ile değişimi (KALGHATGI ve SAYER 1997)	39
Şekil 2.32. Üniform bir akım ortamında taban yakınındaki bir silindire etkileyen kaldırma kuvveti, ($10^4 < Re < 3 \times 10^4$);(FREDSØE 1985)	41
Şekil 2.33. Silindirin tabana yaklaşması durumunda durak noktasının yer değiştirmesi	41
Şekil 2.34. Hız dağılımının üniform olduğu ve hız dağılımının katı cidardan etkilendiği durumlarda $\overline{C}_L$ 'nin e/D ile değişimi $10^3 < Re < 3 \times 10^4$, $\delta/D = 5$, (FREDSØE ve diğ. 1985)	43
Şekil 2.35. $\overline{C}_L$ 'nin e/D ile değişimi (ZDRAVKOVICH 1985);(KIYA 1968);(ROSHKO 1975)	43
Şekil 2.36. $\overline{C}_L$ 'nin e/D ile değişimi (KALGHATGI ve SAYER 1997)	43
Şekil 2.37. Hız dağılımının üniform olduğu ve hız dağılımının katı cidar etkisi ile üniform olmadığı durumlarda durak noktasındaki basıncın karşılaştırılması	45
Şekil 2.38. Kaldırma kuvveti çalkantı bileşeninin karesel ortalama değerinin e/D ile değişimi (JENSEN ve diğ. 1990);(SCHEWE 1983)	46
Şekil 2.39. Ortalama kaldırma kuvveti katsayısı ($\overline{C}_L$) ve kaldırma kuvveti çalkantı bileşeni (C'_L)'nin e/D ile değişimi (C_L salınımlı kaldırma kuvvetinin maksimum değeri baz alınarak hesaplanmıştır)	47
Şekil 3.1. Yüzeyi cilalı (pürüzsüz) bir silindir etrafında oluşan akım rejimleri ($Re=10^4$), (SARPKAYA 1986);(WILLIAMSON 1985)	51
Şekil 3.2. Mantar tipli Honji çevrileri	51
Şekil 3.3. $1.6 < KC < 4$ ve $Re=1000$ değerleri için "sabit ve simetrik çevrili durumda" akım rejimlerin oluşumu (WILLIAMSON 1985)	53
Şekil 3.4. Tek çevri çiftinin meydana geldiği akım rejimi ($7 < KC < 13$)	54

Şekil 3.5. Çapraz iz bölgesi ($KC=12$) (WILLIAMSON 1985)	55
Şekil 3.6. Tek çevri çiftinin meydana geldiği akım rejimi ($13<KC<15$)	55
Şekil 3.7. $15<KC<24$ bölgesinde oluşan çevrilerin zamanla değişimi	56
Şekil 3.8. $24<KC<32$ bölgesinde oluşan çevrilerin zamanla değişimi	56
Şekil 3.9. Çevri kopması rejimlerinde salınlı hareketin genliğinin artmasının çevri sayısına etkisi	57
Şekil 3.10. Küçük KC sayılarında salınlı hareket durumunda akım rejimlerinin Re sayısı ile değişimi (SARPKAYA 1986)	59
Şekil 3.11. Çevri kopması rejimlerinde akım üzerine Reynolds sayısının etkisi	60
Şekil 3.12. Ayrılmanın görülmediği salınlı akımlarda ikincil akıntılar	60
Şekil 3.13. Salınlı hareketin yarı periyotlarında hız değişiminde görülen simetrisizliğin etkisi	61
Şekil 3.14. Salınlı akım ortamında silindirik bir yapıya etkiyen kuvvetler	61
Şekil 3.15. Sakin su içerisindeki levhanın değişik konumlarda hareketi	63
Şekil 3.16. Ek kütle katsayısının e/D ile değişimi (YAMAMOTO 1974)	64
Şekil 3.17. Sürüklenme ve atalet kuvvetlerinin zamanla değişimi	68
Şekil 3.18. Sürüklenme kuvveti katsayısının (C_D), KC ile değişimi	69
Şekil 3.19. C_M atalet kuvveti katsayısının KC ile Değişimi	71
Şekil 3.20. Kararlı ve salınlı akım durumları için sürüklenme kuvveti katsayısının (C_D)'nin Re ile değişimi (JUSTESEN 1989)	71
Şekil 3.21. Atalet kuvveti katsayısının (C_M), Re ile değişimi (JUSTESEN 1989)	72
Şekil 3.22. Morisson denklemleri ile elde edilmiş akım doğrultusundaki kuvvet ile deneysel olarak ölçülmüş kuvvetin karşılaştırılması, ($KC=14$, $Re=2.8 \times 10^4$);(SARPKAYA ve ISAACSON 1981)	73
Şekil 3.23. Uyum parametresinin (δ)'nın KC ile değişimi $Re=5 \times 10^5$ (JUSTESEN 1989)	74
Şekil 3.24. KC ve akım rejimleri ile kaldırma kuvvetinde görülen değişimler ($Re/KC=196$);(JUSTESEN 1991)	75

Şekil 3.25. C_{LRMS} 'in KC ile değişimi (JUNSTENSEN 1989)	77
Şekil 3.26. Kaldırma kuvveti katsayısı ($C_{LRMS} \cdot KC^2$) ile KC'nin değişimi (WILLIAMSON 1985)	78
Şekil 3.27. Kaldırma kuvveti katsayısının (C_{Lmax}) Re sayısı ile değişimi (SARPKAYA 1976)	78
Şekil 3.28 Akım doğrultusundaki kuvvet katsayıları üzerinde pürüzsüzlüğünün etkisi (JUSTESEN 1989)	80
Şekil 3.29. Akım doğrultusundaki kuvvet katsayıları üzerinde pürüzsüzlüğünün etkisi ($KC=20$);(SARPKAYA 1976)	81
Şekil 3.30. Kaldırma kuvveti katsayısı üzerine pürüzlülüğün etkisi (JUSTESEN 1989)	81
Şekil 3.31. Kararlı akım + dalga etkisinde silindire etkiyen kuvvetin zamanla değişimi ($KC = 20$);(SÜMER ve diğ. 1992)	87
Şekil 3.32. Kararlı akım ve dalganın birlikte etkimesi durumunda silindir üzerindeki basınç dağılımının zamanla değişimi ($KC = 10$) (SÜMER ve diğ. 1992)	87
Şekil 3.33. Kararlı akım ve dalganın birlikte etkimesi durumunda, akım doğrultusundaki kuvvet katsayılarındaki değişim (SÜMER ve diğ.1992);(SARPKAYA ve STORM 1985) (ACHENBACH ve HEINCHE 1981)	88
Şekil 3.34. Kararlı akım ve dalganın birlikte etkimesi durumunda, kaldırma kuvveti katsayısındaki değişim (SÜMER ve diğ. 1992)	90
Şekil 3.35. Silindir etrafında çevri hareketleri ($KC = 4$);(SÜMER ve diğ. 1991)	92
Şekil 3.36. Dalga etkisinde silindire etkiyen kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi, ($KC=4$);(SÜMER ve diğ. 1991)	93
Şekil 3.37. Silindirin katı cidara göre değişik konumlarında çevri hareketleri ($KC = 10$);(SÜMER ve diğ. 1991)	95
Şekil 3.38. $7 < KC < 15$ arası akım rejimlerinde silindir etrafında çevri hareketleri ($KC = 10$);(SÜMER ve diğ. 1991)	96
Şekil 3.39. $7 < KC < 15$ arası akım rejimlerinde kaldırma kuvvetinin değişik e/D oranlarında değişimi ($KC = 10$) (SÜMER ve diğ. 1991);(WILLIAMSON 1985)	97

Şekil 3.40. $15 < KC < 24$ aralığında çevri hareketleri ($KC = 20$) (SÜMER ve diğ. 1992)	100
Şekil 3.41. $15 < KC < 24$ arası akım rejimlerinde kaldırma kuvvetinin değişimi ($KC = 20$);(SÜMER ve diğ. 1992)	101
Şekil 3.42. $0.05 \leq e/D \leq 0.4$ ve $15 < KC < 24$ arası akım rejimlerinde kaldırma kuvvetinin değişimi, (SÜMER ve diğ. 1992)	102
Şekil 3.43. e/D ve KC' nin değişimi ile çevri kopmasının bastırıldığı bölgeler (SÜMER ve diğ. 1991)	103
Şekil 3.44. Strouhal sayısının e/D ile değişimi (SÜMER ve diğ. 1991)	104
Şekil 3.45. Normalize edilmiş Strouhal sayısının e/D ile değişimi, (SÜMER ve diğ. 1991)	105
Şekil 3.46. Salınlımlı akım durumunda, katı cidar yakınında silindir üzerindeki basınç dağılımının değişimi, $KC = 10$, (SÜMER ve diğ. 1991)	105
Şekil 3.47. Salınlımlı akım durumunda, katı cidar yakınında silindir üzerindeki basınç dağılımının değişimi ($KC = 20$);(SÜMER ve diğ. 1991)	106
Şekil 3.48. Sürüklenme kuvveti ve atalet kuvveti sabitlerinin (C_D , C_M), katı cidar yakınındaki bir silindirde KC ile değişimi, $Re = 0.8 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5$ (SÜMER ve diğ. 1991);(YAMAMOTO 1974)	107
Şekil 3.49. Kaldırma kuvveti sabitlerinin (C_{LA} , C_{LT}), katı cidar yakınındaki bir silindirde KC ile değişimi ($Re = 0.8 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5$) (SÜMER ve diğ. 1991)	108
Şekil 3.50. Pürüzlülüğün sürüklenme kuvveti katsayısı (C_D) üzerindeki etkisi ($Re = 0.8 \sim 1.1 \times 10^5$);(SÜMER ve diğ. 1991)	109
Şekil 3.51. Pürüzlülüğün atalet kuvveti katsayısı (C_M) üzerindeki etkisi ($Re = 0.8 \sim 1.1 \times 10^5$);(SÜMER ve diğ. 1991)	109
Şekil 3.52. Pürüzlülüğün kaldırma kuvveti katsayısı (C_{LA} , C_{LT}) üzerindeki etkisi ($Re = 0.8 \sim 1.1 \times 10^5$);(SÜMER ve diğ. 1991)	110
Şekil 4.1. Deney silindirleri ve ölçüm koşulları	113
Şekil 4.2. Sakin su içerisinde silindirin hareketi ile dalga etkisinin benzeştirildiği deney sistemi (SÜMER ve diğ. 1991)	114
Şekil 4.3. U tübü deney sistemi	115
Şekil 4.4. Deney düzeneği	117

Şekil 4.5. Deney sisteminin genel görünüşü	118
Şekil 4.6. Deney kanalı ve sistem elemanlarının genel görünüşü	119
Şekil 4.7 Deney kanalı ekseninde kararlı akım etkisinde hız dağılımı ($h = 40$ cm) (YÜCE 1995)	121
Şekil 4.8. Dalga etkisinde kanal ekseninde ölçülen hız dağılımı (AVCI ve diğ. 1996)	122
Şekil 4.9. Dalga etkisinde su yüzeyinin zamanla değişimi	122
Şekil 4.10. Kanal ekseninde akım+dalga durumunda kanalda ölçülen hız dağılımı (AVCI ve diğ. 1996)	123
Şekil 4.11. Akım+dalga durumunda referans noktada hızın zamanla değişimi ($KC=1.5$, $Re=12000$)	123
Şekil 4.12. Deneylerde kullanılan yüzeyleri pürüzlü model (test) silindirler	124
Şekil 4.13. Ölçme, değerlendirme sistemleri ve deney silindiri üzerine yerleştirilen basınç dönüştürücüleri	126
Şekil 4.14 Kararlı akım+dalga durumunda tabana yarı gömülü ($e/D=0.48$) tek silindir üzerindeki noktalarda basıncın zamanla değişimi (ÇOKGÖR 1996)	127
Şekil 5.1. Değişik gömülme oranlarında kararlı akım etkisi altında tek silindir üzerindeki basınç dağılımı	130
Şekil 5.2. Silindir üzerindeki kuvvetlerin basınç dağılımı ile belirlenmesi	131
Şekil 5.3. Salt dalga etkisinde tabana oturan tek silindire etkiyen kuvvetlerin açısal frekans ile değişimi ($KC \cong 4$)	132
Şekil 5.4. Sinüzoidal akım kabulü ile hesaplanan akım doğrultusundaki C_D ve C_M kuvvet katsayılarının en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanan C_D ve C_M ile karşılaştırılması	133
Şekil 5.5. "Sadece dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$)	139
Şekil 5.6. "Sadece dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$)	140
Şekil 5.7. "Sadece dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$)	141

Şekil 5.8. "Sadece dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$)	142
Şekil 5.9. "Sadece dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$)	143
Şekil 5.10. "Sadece dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$)	144
Şekil 5.11. "Sadece dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$)	145
Şekil 5.12. "Sadece dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$)	146
Şekil 5.13. "Sadece dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$)	147
Şekil 5.14. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=13000$)	153
Şekil 5.15. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=20000$)	154
Şekil 5.16. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$, $Re=8000$)	156
Şekil 5.17. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$, $Re=18000$)	157
Şekil 5.18. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=7000$)	158
Şekil 5.19. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=12000$)	159
Şekil 5.20. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=13000$)	160
Şekil 5.21. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=20000$)	161
Şekil 5.22. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$, $Re=8000$)	163
Şekil 5.23. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$, $Re=18000$)	164

Şekil 5.24. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=7000$)	165
Şekil 5.25. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=12000$)	166
Şekil 5.26. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=13000$)	167
Şekil 5.27. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=20000$)	168
Şekil 5.28. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$, $Re=8000$)	169
Şekil 5.29. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$, $Re=18000$)	170
Şekil 5.30. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=7000$)	176
Şekil 5.31. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=12000$)	177
Şekil 5.32 Deney kanalında $h=20$ cm derinlikteki kararlı akım durumunda hız dağılımı	178
Şekil 5.33 Kuvvet katsayıları C_D , C_M ve C_{LMAX} 'ın pür dalga durumunda KC ile değişimi ($e/D=0$, $h=20$ cm)	179
Şekil 5.34 Kuvvet katsayıları C_D , C_M ve C_{LMAX} 'ın pür dalga durumunda KC ile değişimi ($e/D=0.2$, $h=20$ cm)	180
Şekil 5.35 Kuvvet katsayıları C_D , C_M ve C_{LMAX} 'ın pür dalga durumunda KC ile değişimi ($e/D=0.48$, $h=20$ cm)	180
Şekil 5.36 Akım +Dalga durumunda C_D , C_M ve C_{LMAX} kuvvet katsayılarının $e/D=0$ durumunda KC ile değişimi ($Re=1 \times 10^4$, $\alpha=5$)	181
Şekil 5.37 Akım +Dalga durumunda C_D , C_M ve C_{LMAX} kuvvet katsayılarının $e/D=0.20$ durumunda KC ile değişimi ($Re=1 \times 10^4$, $\alpha=5$)	181
Şekil 5.38 Akım +Dalga durumunda C_D , C_M ve C_{LMAX} kuvvet katsayılarının $e/D=0.48$ durumunda KC ile değişimi ($Re=0.48 \times 10^4$, $\alpha=5$)	181

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Transkritik akım rejiminde sürüklenme kuvveti katsayısının ($\bar{C}_D$) Reynolds sayısı ile değişimi	33
Tablo 3.1 Normalize edilmiş kaldırma kuvveti frekansları (WILLIAMSON 1985)	76
Tablo 5.1. Kararlı akım etkisi altında değişik gömülme oranlarında silindir üzerine ölçülen basınçların ortalama değerleri	129
Tablo 5.2. Kararlı akım durumunda kuvvet katsayılar (Akım derinliği $h=40$ cm.)	135
Tablo 5.3. $h=20$ cm derinlikte kararlı akım etkisinde tek silindire ait kuvvet katsayıları	179
Tablo A1. Test matrisi	194

ÖZET

Akım ortamında yeralan cisimler, akım ile etkileşimleri sonucu hidrodinamik kuvvetlerin etkisinde kalırlar. Günümüzde yaygın olarak kullanılan petrol, doğalgaz veya su iletimi, atıksu deşarjı, ulaşım amaçlı büyük nehir veya denizaltı tüp (körfez boğaz) geçişi gibi değişik amaçlarla deniz veya nehir altında inşa edilen yapılar da bu tip kuvvetlerden etkilenmektedir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde, deniz ortamında görülebilecek kararlı akım, salt dalga ve akıntı ile dalganın birlikte oluşması durumlarında bir yapı etrafındaki akım alanı ve akımın yapı üzerindeki etkisi ile, yapıya gelen kuvvetlerle ilgili literatür çalışması yapılmıştır. Literatür çalışmasına, olayın mekaniğinin açıklanması açısından, çok sayıda araştırmacı tarafından detaylı olarak incelenen sonsuz kararlı akım veya salınımlı akım ortamında yeralan tek bir silindir etrafındaki akım alanı ve bu silindire etkiyen kuvvetler incelenerek başlanmıştır. Bu konudaki çalışmalar, incelenecek konuya yakın katı cidar yakınındaki silindir etrafındaki akım alanı ve silindire etkiyen kuvvetlerin belirlenmesine ait sınırlı sayıda çalışma ile birleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, deniz tabanına oturan bir silindire etkiyen kuvvetlerin belirlenmesi amacıyla İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında oluşturulan deney düzeneği, ölçme ve değerlendirme sistemi açıklanmıştır. Hazırlanan deney sisteminden yararlanarak, deniz tabanına oturan ve “kararlı akım”, ”düzenli dalga” ve “akım+dalga” etkileri altında bulunan bir silindir üzerindeki basınç değerleri ölçülmüş ve basınç dağılımları belirlenmiştir. Tek silindirin tabana oturması veya değişik gömülme oranları ile, çift silindir olma durumları için ayrı ayrı belirlenen bu basınç dağılımları kullanılarak silindire gelen kuvvetler hesaplanmıştır.

Silindire etkiyen bu kuvvetler C_D , C_M ve C_L kuvvet katsayıları ile ifade edilmiş ve bu kuvvet katsayılarının olay üzerinde etkili olan Re ve KC sayıları gibi boyutsuz sayılarla değişimi grafikler halinde gösterilmiştir. Tabana oturan tek silindire ait değişik akım koşullarında elde edilen sonuçlar, literatür çalışmasında verilen diğer araştırmacıların benzer koşullarda elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın son kısmında, elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirilmiş, çalışmanın sağlayacağı yararlar ve bilgi birikimi tartışılmış ve çalışmanın gelişmesi için gelecekte yapılması gereken konularda önerilerde bulunulmuştur.

HYDRODYNAMIC FORCES ON THE CIRCULAR CYLINDER ON THE SEA BED UNDER THE CURRENT, WAVE, AND COEXISTING FLOW

SUMMARY

The effect of close proximity of a wall on the flow around a cylinder has been the subject of several investigations in recent decades. Various authors have developed theoretical models of potential flows around a cylinder, such as MILNE and THOMSON, (1962) for a cylinder on a plane boundary, and YAMOMOTO et al. (1974) for a cylinder close to a plane wall.

FREDSE and HANSEN (1987) gave modified description of the potential flow in which the lift force on the cylinder was evaluated.

Various authors, reported qualitative and quantitative observations of the flow around a circular cylinder placed near a wall where the cylinder was towed at constant velocity in still fluid.

BEARMAN and ZDRAVKOVICH (1978) measured pressure distribution around a circular cylinder on and near a wall and also along the wall in steady currents. They also conducted a spectral analysis of hot-wire signals received from both sides of the cylinder wake. From their spectral analysis, they found out that regular vortex shedding persisted for cylinder on the bottom. This result was later confirmed by the measurement of GRASS et al. (1984).

The case where the cylinder is subjected to an oscillatory flow has also attracted much attention, in view of its application to marine pipelines exposed to waves. The first investigation was the research work of SARPKEYA (1976). Drag, inertia and lift coefficients on the cylinder placed at wall were the measured studies. Recently JACOBSEN *et al* (1987), JUSTESEN *et al*. (1987) and SÜMER *et al*. (1991) have reported measurements regarding the effect of the wall on force coefficients on a cylinder exposed to oscillatory flow.

The studies of SARPKEYA and STORM (1985) and SÜMER *et al*. (1992) are related to the determination of the forces on a cylinder, if both the wave and current exist. In both studies, the coexisting flow is obtained with the sinusoidally oscillating motion of the cylinder. In these studies, the forces on a cylinder are determined by obtaining the pressure distribution with the pressure transducers placed on the cylinder. On the other hand, the study of SÜMER *et al*. (1992), covers the

determination of the forces on a structure such as the cylinder on the wall or at various distances from the wall.

In this study, the forces on a cylinder, laid just on the ground are determined by measuring the pressure distribution on the cylinder in the case of steady current, pure wave and both together. The bottom of the cylinder is buried at different burying ratios with a dummy cylinder nearby and without it. In these two cases the variations of the forces on the cylinder are measured.

Experimental Set-up

Experiments were realized in a water flume; having 26 m. length, 1 m. width and 0.85 m height. The closed water circuit system was used for the case of steady current. Regular wave produced with a palette of flop type was connected to the direct current (DC) motor. The experiment cylinder, where pressure measurements were realized, and the dummy cylinder have a diameter of 8.9 cm, with a length of 1 m and a surface roughness (k) of 0.5 mm. The measurement cylinder was fixed to the base of the water flume. In the water flume, different bury ratios (e/D) were obtained by raising the water flume base by steel plates. Eleven transducers (Endevco Model 8510B-2 with range of 0.2 psi and with a sensitivity of 150 ± 50 mV psi at 10 V d.c and 24 °C) were mounted on the surface of the cylinder at 30° intervals (except the bottom point of the cylinder); (Fig. 1). They were mounted at the same cross section.

In the water flume, "Nixon Instrumentation Stream Flow Velocity Meter, Type 400, Model 403" muline was mounted in the cross section, where the flow was not under the effect of the cylinder, to determine the wave characteristics and two HBM P 11 transducers were mounted in the same section to determine the wave characteristics on the cylinder axis. The signals received from transducers have been regulated with an amplifier and they were transmitted to the computer in the form of analog signals with the help of AD card and are saved in the ASCII format with the EASYEST LX data acquisition program.

The distribution of the measured pressure values on the cylinder, exposed to steady flow, were presented in Fig 2. for different bury ratios of the cylinder. The pressure values in the Fig 2. have been made dimensionless with a pressure coefficient. The pressure coefficient is defined as

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_c^2} \quad (1)$$

Where p , p_0 , ρ and U_c are the measured pressure value, the hydrostatic pressure, the density of the fluid and the steady flow velocity at the top level of the cylinder respectively.

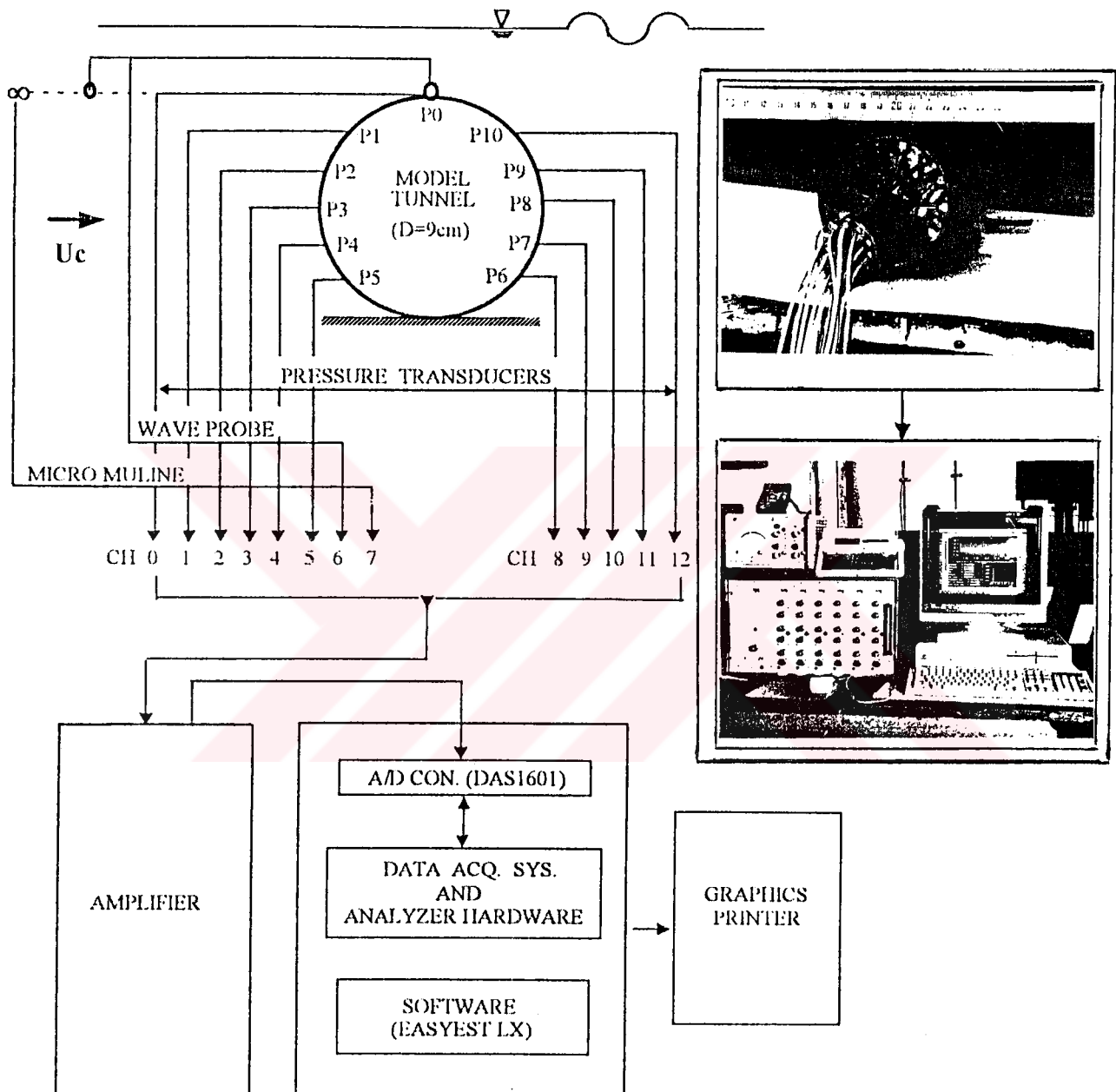


Figure 1. Measurement and evaluation system

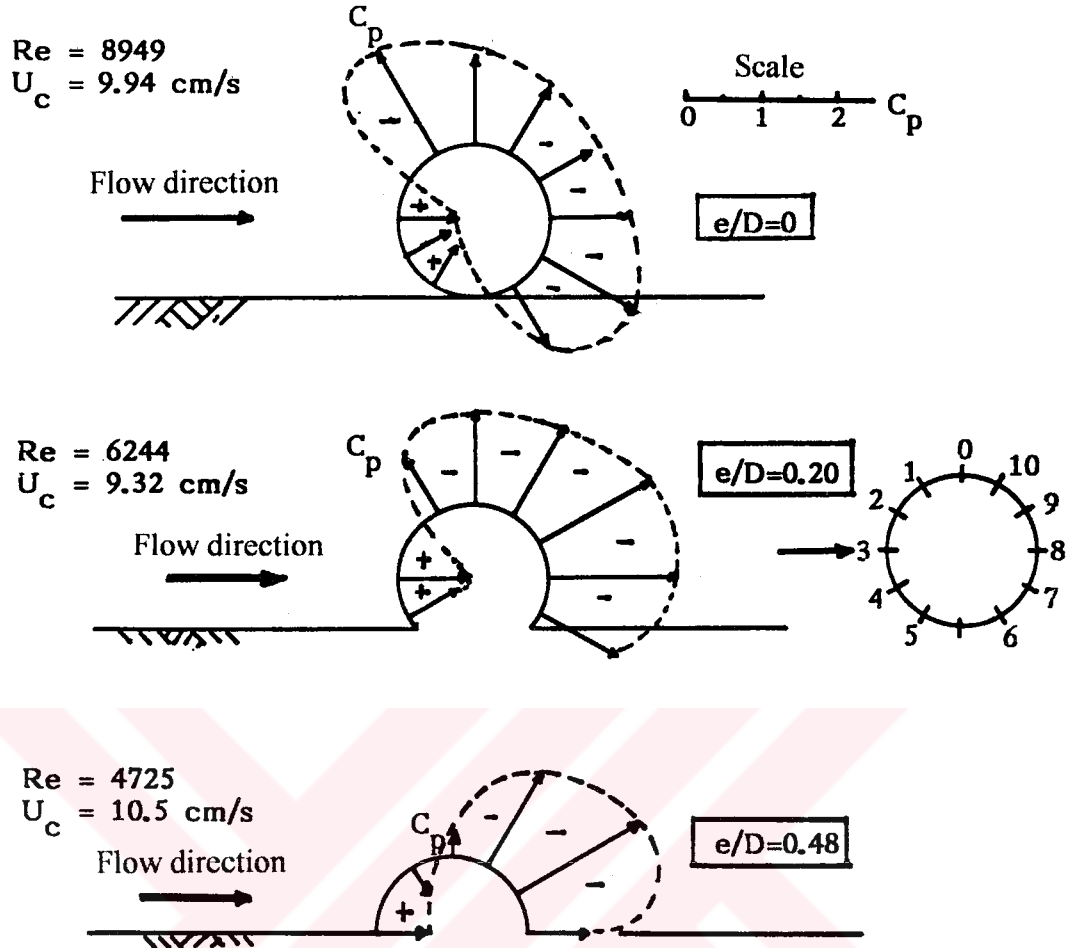


Figure 2. Pressure distribution around a cylinder; buried and unburied position

The force components affecting on the in line and lift directions are determined by the integration of the measured pressures on the cylinder surface. For a wall mounted cylinder under the wave, the variation of the forces on the in line and lift directions with the angular frequency are presented in Figure 3.

Test Conditions

The study covers the determination of the forces on the cylinder in the case of different boundary conditions (wall mounted, partly buried and parallel twin cylinders) and for different flow conditions (steady flow, coexisting flow and wave). The forces on the cylinder change with the Reynolds number for the steady current. Re number is defined as follows:

$$Re = \frac{U_c D}{\nu} \quad (2)$$

In the above equation, U_c , D and ν represent the flow velocity at the top level of the cylinder, the diameter of the cylinder and the kinematic viscosity respectively. In the experiment conditions, where wave effect is investigated, Re number is determined by considering the maximum horizontal velocity (U_m), which is due to the wave effect at the same level. In the flow condition, " U_c+U_m " is considered as the velocity component for the case of coexisting flow. In the case of wave, the variation of the forces does not depend only on the Re number but also on the Keulegan Carpenter number. KC is defined as $KC=U_m T/D$ where T is the wave period. For coexisting flow condition, the velocity component in the equation is considered as " U_c+U_m ". In the coexisting flow, also dimensionless U_c/U_m value has to be taken into account together with Re and KC numbers.

In this study, the forces on the cylinder are determined in the case of the different bury positions for one cylinder and parallel twin cylinders. (x/D) and their variations with Re , KC and U_c/U_m are investigated. Different cylinder configurations, considered in the experiment are presented in Fig. 3.

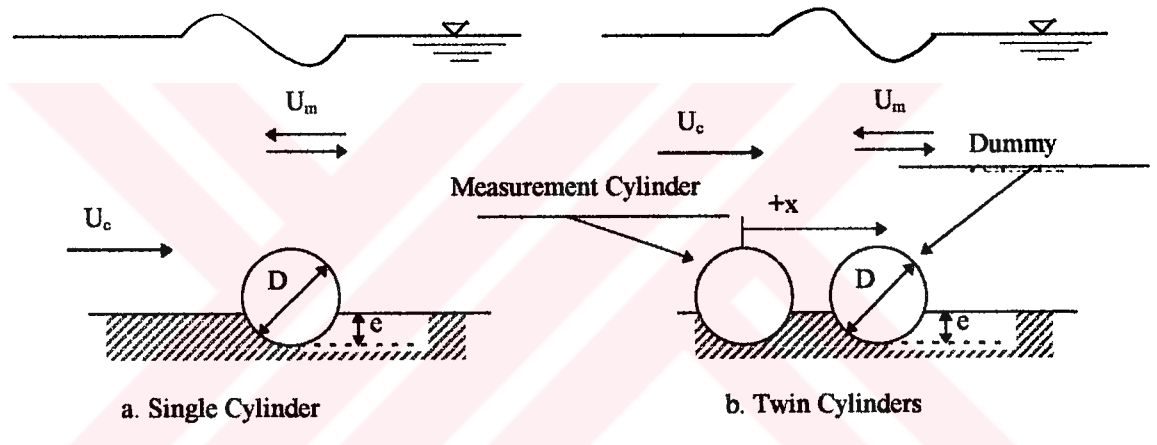


Figure 3. Definition sketch of test conditions

In the steady current case, the force on the cylinder in the flow direction can be defined as:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D D U_c^2 \quad (3)$$

The drag coefficient, (C_D), can be determined from Eq. 3. since the F_x force is obtained from the measured pressure values. The lift force (F_y), which is in the vertical direction with respect to flow, is obtained by;

$$F_y = \frac{1}{2} \rho C_L D U^2 \quad (4)$$

Here, C_L is obtained by the help of determining F_y by the measured force.

The acting force on the cylinder in the flow direction under the wave condition can be determined by MORRISON *et al.* (1950) equation. MORRISON equation is as follows;

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D U(t)|U(t)| + \rho C_M A \dot{U}(t) \quad (5)$$

In the Eq. 5. C_M is the inertia force coefficient. C_D and C_M can be determined with the least squares method. The lift force on the cylinder under wave condition is obtained by Eq. 4.

In the coexisting flow condition, the hydrodynamic forces are found using Eq. 4. and Eq. 5. As an example for the variation of the force coefficients with the flow conditions and their variation with KC for a wall mounted cylinder is presented in Fig. 4.

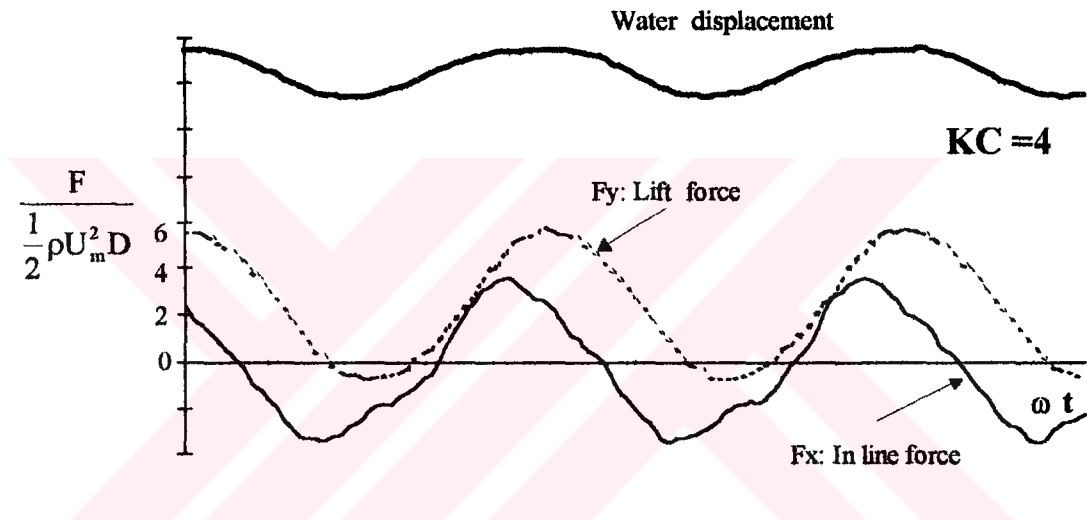


Figure 4. Sample records of drag and lift force under the wave condition ($KC \approx 4$)

Results

In line force coefficients

Steady current case: In line coefficient C_D was determined from Eq. 2. The results of the experiments show that C_D values change between 0.6~0.9. These C_D values are very close to the result of (ZDRAVKOVICH 1985);(KALGATHI and SAYER 1987) under the same flow conditions. When the cylinder, begins to bury in the base, C_D values decrease. The least C_D values were determined for $e/D=0.48$ positions for single cylinder. Generally, C_D values decrease when the parallel dummy cylinder is replaced near the measurement cylinder. For +1.5 and +2 x/D values the larger C_D values were determined than the other x/D ratios. C_D values are small when the x/D ratio is negative.

Wave alone: In line force coefficient C_D and C_M were determined from Eq. 5. by using least square method. The C_D values which are determined from the experiments are very similar to experiment results of YAMOMOTO 1974, SARPKAYA and STORM 1989. When the cylinder starts to bury, C_D values decrease. Generally, in parallel twin cylinder position C_D values are smaller than the single cylinder case. For positive x/D ratios (especially +1.5 and +2) C_D values are bigger than the negative x/D ratios. When the cylinders are tangent to each other ($x/D=+1$ and -1 positions) C_D takes the smallest values. Generally, when the KC number increases, C_D values decrease.

The other in line coefficient C_M also can be determined from Eq. 5. with least square method. C_M values decrease with increasing burying ratios e/D like the C_D values. The twin cylinder condition for the negative x/D ratios, C_M values are larger than the positive values and also single cylinder case. Also, a decrease in C_D values is seen for the positive values of x/D . The reason of this is the addition of hydrodynamic mass of the dummy cylinder which is placed at inlet, on the hydrodynamic mass of the measurement cylinder. Since the dummy cylinder is placed in the hydrodynamic mass of the measurement cylinder, it diminishes the hydrodynamic mass of the measurement cylinder. The largest C_M values were determined for -1.5 and -2 values of x/D . Generally, for all boundary conditions, C_M values decrease with increasing KC numbers.

Coexisting flow case: In line force coefficients were determined for approximately $U_c/U_m=5$ and two different Re numbers. Drag force coefficient C_D takes small values at the large Re number. As a result of the movement of the separation point towards the wake with increasing Re numbers, the negative pressures behind the cylinder decrease and at large Re numbers C_D also decrease. C_D values decrease with the increasing cylinder bury ratio. Twin cylinder conditions; sometimes larger values can occur at $+1.5$ and 2 x/D values compared to single cylinder position. For all other twin cylinder positions C_D values generally are small than single cylinder C_D 's under same flow conditions.

The other in line coefficient C_M decrease with the increasing e/D values for the single cylinder position. Inertia coefficient C_M takes larger values for negative x/D ratios with respect to positive values. The reason of this is similar to the steady current case.

Lift force coefficient

Steady current case: Lift force coefficient C_L can be determined by Eq. 4. An increase was seen in the values of C_L with the increase of bury ratios for the single cylinder case. The reason of this can be seen from Fig.2. In Fig. 2. it can also be seen that with the burying of cylinder to the base, negative pressure values under the horizontal axis which is in the opposite direction to the lift force, diminish. Pressure values opposite to the lift force are also small in $e/D=0.48$ case. Hence, the increase in C_L is high for $e/D=0.48$. The C_L in case of twin cylinders is generally smaller than the single cylinder case. Also, higher C_L values were seen from time to time for $x/D=+1.5$

value. For $x/D=-2$ and $+2$ values and in some current conditions, similar C_L values were obtained like the single cylinder results.

Wave alone: C_L values under the wave effect increase with burying the cylinder to the base like the single cylinder case under steady flow condition. In twin cylinder case, an increase has been seen for positive x/D values but also a decrease has been observed for negative x/D values compared to the single cylinder results. Similar single cylinder C_L values have been obtained in some flow conditions. With $x/D=+2$ and -2 values. This shows that the measuring cylinder has not been affected from the dummy cylinder. Generally, C_L values for $x/D=+1.5$ value are higher compared to single cylinder results.

Coexisting flow: The variation of C_L for the single cylinder settled on the base case is like the steady flow and wave alone case. C_L values increase with the increase of bury ratios. In examining C_L values with two different Re number flow conditions, small C_L values were observed in high KC numbers. When the variation of C_L is examined in twin cylinder case, generally there is an increase for positive x/D values compared to single cylinder results. Higher C_L values than the single cylinder case were obtained from time to time at $x/D=+1.5$.

BÖLÜM 1

ÇALIŞMANIN AMACI VE ÖNEMİ

1.1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojideki gelişmelere paralel olarak insan ihtiyaçları da zaman ve mekana bağlı olarak gittikçe artan bir çeşitlilik göstermektedir. Bu ihtiyaçların karşılanmasındaki en büyük engel, kara parçaları ve yerleşim alanları arasında doğrudan ulaşımı, iletişimi ve mal transferini engelleyen denizlerdir. İnsan ihtiyaçlarının optimum bir şekilde giderilmesi amacı ile günümüzde deniz ortamında, petrol ve doğal gaz taşınması, mevcut sanayi tesisleri ve enerji santralleri için soğutma suyu temini ve iki kıyı arasında irtibatın sağlanmacı amacı ile deniz ve nehirlerin altından boru hatları veya ulaşım tünelleri inşa edilmektedir. Bu sistemler, işlevleri gereği tek ya da birbirilerine paralel çoklu hatlar olabildiği gibi, deniz tabanına oturan ya da kısmen gömülmüş olarak da inşa edilebilmektedirler.

Oldukça kritik görevleri olan bu yapıların başta oturdukları hareketli tabanda oluşabilecek oyulma-yığılma ve akım sebebi ile yapıya etkiyen hidrodinamik yüklere karşı stabilitelerinin sağlanması gereklidir. Böyle bir yapının stabilitesinin sağlanması için öncelikle içinde yeralacağı akım şartlarının (dalga, akıntı) belirlenmesi ve bu akım şartlarında yapıya etkiyecek hidrodinamik kuvvetlerin doğru olarak tahmin edilmesi gereklidir. Bu kuvvetlerin belirlenmesinde kullanılan en geçerli yol, uygulanacak sistemin bir modelinin ya da prototipinin laboratuvarında benzer akım koşulları altında test edilmesidir. Özellikle 1970'lerden bu yana denizaltından petrol temininde oldukça yoğun bir şekilde kullanılan platformların ve iskelelerin ayaklarına gelen yüklerin belirlenmesi amacı ile başlatılan bu konudaki çalışmalar genelde sonsuz akım ortamındaki yapıları inceleyen türdedir. Doğalgaz,

petrol veya içmesuyu taşınmasında ve deniz deşarjlarında kullanılan tabana oturan yapılar ile ilgili çalışmalar ise oldukça sınırlıdır. Bu konuda yapılan çalışmalar genel olarak tabana oturan tek silindirik bir yapıya çeşitli akım koşullarında (kararlı akım, dalga, dalga + akıntı) etkiyen hidrodinamik yüklerin belirlenmesinden oluşmaktadır. Deniz tabanına kısmi gömülü durumda ya da birbirine paralel yerleştirilmiş iki yapı bulunması durumunda bu etki ve kuvvetlerin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar mevcut değildir.

1.2. ÇALIŞMANIN AMAÇ VE KAPSAMI

Değişik sınır şartlarında (tabana oturan, kısmi gömülü ve paralel iki yapı) ve çeşitli akım koşulları etkisinde (kararlı akım, dalga, akıntı + dalga) silindirik yapıya etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin belirlenmesi amacı ile İTÜ, İnşaat Fakültesi, Hidrolik Laboratuvarı'nda deneysel olarak yapılan bu çalışma;

a) Deniz tabanına oturan silindirik bir yapıya, sadece akıntı, sadece dalga kuvveti ve akıntı ile dalganın birlikte etkimesi durumlarında, etkiyen kuvvetlerin akım doğrultusunda ve akıma dik doğrultudaki bileşenlerin belirlenmesi,

b) Yapının taban içerisine değişik gömülme oranlarında bulunması durumunda yapıya etkiyen kuvvetlerde ortaya çıkacak değişikliklerin belirlenmesi,

c) Sözkonusu silindirin yakınında yeralan paralel konumdaki diğer bir silindirin değişik yerleştirilme koşullarında, silindire etkiyen kuvvetlerdeki değişimin belirlenmesi,

adımlarını kapsamaktadır.

BÖLÜM 2

KARARLI AKIM ORTAMINDA YERALAN BİR SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIM ALANI VE SİLİNDİRE ETKİYEN KUVVETLER

2.1. SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIM REJİMLERİ

Kararlı bir akım ortamında yeralan bir silindir etrafındaki akım koşulları boyutsuz ifade olarak Re sayısına bağlıdır. Re sayısı:

$$Re = \frac{U_c D}{\nu} \quad (2.1)$$

olarak tanımlanır. Burada; U_c , kararlı akım hızı, D , silindirin çapı, ν , akışkanın kinematik viskozitesidir. Re sayısının sıfırdan (durgun hal) başlayarak arttırılması ile silindir etrafındaki akım alanında büyük değişimler meydana gelir.

Reynolds sayısının çok küçük değerlerinde ($Re < 5$) silindir etrafındaki akımda bir ayrılma görülmez. Silindir etrafındaki akımda ayrılma, Reynolds sayısının 5 değerinden itibaren meydana gelmeye başlar (Şekil 2.1a).

Reynolds sayısının $5 < Re < 40$ değerlerini aldığı aralıkta silindirin iz bölgesinde bir çift sabit çevri oluşur (Şekil 2.1b). Bu oluşan çevrilerin uzunluğu, belirtilen aralıktaki Re sayısının değerine bağlıdır. Re sayısının değeri arttıkça çevrilerin iz bölgesinde uzunluğu da artar (Şekil 2.2a).

Re sayısının değeri daha da artırıldığında iz bölgesindeki akımın stabilitesi bozulur ve çevri kopması rejimleri denen olay, iz bölgesinde görülmeye başlar. Bu durumda

silindirin bir kenarında oluşan çevri diğer kenardaki çevriyi belirli bir frekansta koparır. Bunun sonucunda iz bölgesinde bir çevri caddesi meydana gelir (Şekil 2.2d-e-f) (BATCHELOR 1967).

Reynolds sayısının $40 < Re < 200$ değerlerini aldığı aralıkta bu çevri caddesi laminar akım durumundadır (Şekil 2.1c). Bu aralıkta kopma iki boyutlu olmakta ve silindir boyunca (üçüncü boyut) etkileşim olmamaktadır (Şekil 2.2b-c.) (WILLIAMSON 1989).

Reynolds sayısı daha da arttırılırsa silindir iz bölgesinde türbülans oluşmaya başlar. $200 < Re < 400$ aralığında iz bölgesinde oluşan bu türbülans, Re sayısı arttıkça silindire doğru yaklaşır. BLOOR (1964)' un yaptığı bir çalışmada, Re sayısı 400 değerine ulaştığında, iz bölgesinde meydana gelen türbülansın, çevrinin silindirden ayrıldığı noktaya kadar geldiği gözlenmiştir. Bu konuda yapılan gözlemlerde, $40 < Re < 200$ aralığında daha küçük Re sayılarında iki boyutlu görülen çevri kopmasının iz bölgesinde oluşan türbülansın da etkisi ile üç boyutlu hale geldiği belirlenmiştir (GERARD 1978); (WILLIAMSON 1988). Reynolds sayısının 400'den büyük olduğu bütün akım rejimlerinde meydana gelen çevri kopması üç boyutludur.

Reynolds sayısının 300'den daha büyük değerlerinde iz bölgesinde türbülanslı akım rejimi mevcuttur. Silindir üzerindeki sınır tabakası ise oldukça geniş bir bölgede ($300 < Re < 3 \times 10^5$) laminardır. Sınır tabakasının laminar karakterde, iz bölgesi akımının ise türbülanslı olduğu bu akım rejimi "alt kritik (subcritic) akım rejimi" olarak adlandırılır (Şekil 2.1e).

Reynolds sayısının artırılması ile birlikte ($Re < 3 \times 10^5$) sınır tabakasında da türbülans görülmeye başlar. Öncelikle sınır tabakasında ayrılmanın olduğu yerde görülmeye başlanan türbülans, Re sayısının artması ile durak noktasına doğru gelişir.

Reynolds sayısının $3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ aralığında değerler aldığı dar bir bantta ise, sınır tabakasından ayrılma noktasında türbülans oluşmaya başlar. Bu dar bantta sınır tabakasındaki türbülans, önce sadece silindirin tek tarafında meydana gelir. Diğer

tarafıta ise hala laminer sınır tabakası akımı mevcuttur. Bu yüzden bu rejim, "kritik akım rejimi" ya da "düşük geçiş bölgesi" olarak adlandırılır. Türbölanslı ayrılmanın meydana geldiğı taraf zaman içinde bir taraftan diğerk tarafa değışir. Bunun sonucunda akımda asimetrik bir yapı ve ortalama değeri sıfırdan farklı kaldırma kuvveti meydana gelir. Bu kaldırma kuvveti, türbölanslı ayrılmanın meydana geldiğı tarafa göre bir taraftan diğerkine yön değıştirir (Şekil 2.1f)(SCHEWE 1983).

$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ aralığında akım rejimi "süper kritik akım rejimi" olarak bilinir. Bu rejimde sınır tabakasından ayrılma silindirin iki yüzeyinde de türbölanslıdır. Buna rağmen silindir üzerindeki sınır tabakası tam olarak türbölanslı hale geçmemiştir. Türbölansa geçiş, durak noktası ile ayrılma noktası arasında bir yerdedir (Şekil 2.1g).

Reynolds sayısı 1.5×10^6 değerkine ulaştığında silindir yüzeyinin bir bölümünde laminer sınır tabakası akımı olsa dahi, sınır tabakası tamamen türbölanslıdır denilebilir. Bu akım rejiminde silindirin bir yüzeyindeki sınır tabakası tamamen türbölanslı iken, diğerk yüzeyindeki sınır tabakası ise zaman zaman laminer, zaman zaman türbölanslı durumdadır. $1.5 \times 10^6 < Re < 4.5 \times 10^6$ aralığında görülen bu akım rejimi "üst geçiş bölgesi" olarak adlandırılır (Şekil 2.1h).

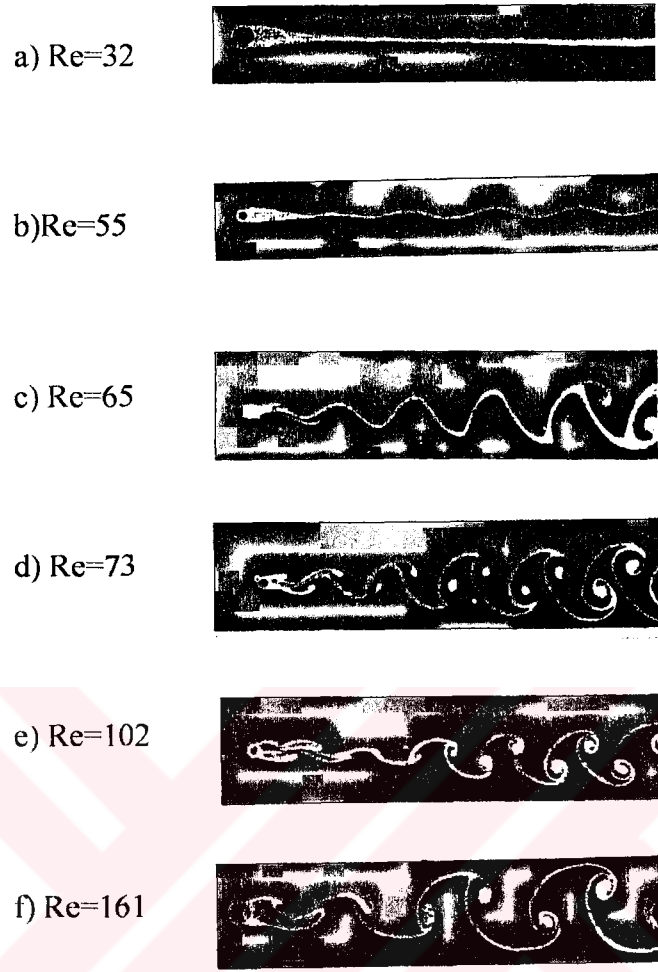
Reynolds sayısının 4.5×10^6 değerkinden daha büyük değerklerinde, silindirin bütün yüzeyinde sınır tabakası tamamen türbölanslıdır. Bu akım rejimi "transkritik akım rejimi" olarak isimlendirilir (Şekil 2.1j).

Kararlı akım ortamında yeralan bir silindir etrafındaki akım çeşitlerinin sınıflandırılmasında, birçok yazar farklı yorumlar ortaya koyduğundan henüz tam bir fikir birlikteliğine varılamamıştır (SÜMER ve FREDSΦE (1997). Yukarıda yapılan sınıflandırmada, ROSHKO (1961)' nun ve SCHEWE (1983)' in yaptığı çalışmalardaki değerklendirmeleri esas alınmıştır.

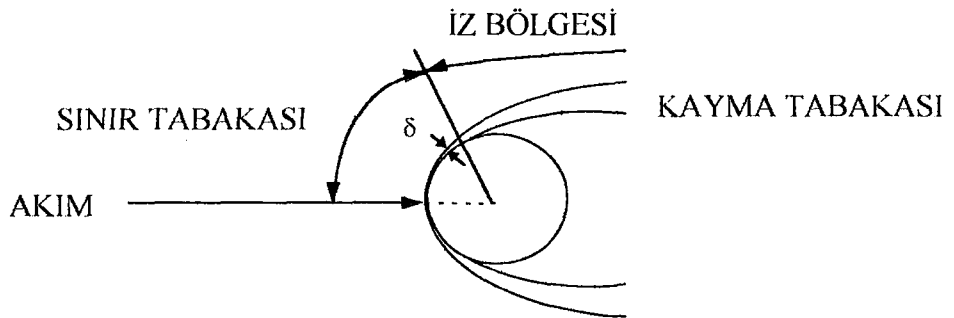
Şekil 2.3' te, silindir etrafında görülen akım bölgeleri ve tanımlamada kullanılan kısımlar gösterilmiştir.

(a)		Ayrılma yok	$Re < 5$
(b)		Bir çift sabit simetrik çevri	$5 < Re < 40$
(c)		Laminer çevri caddesi	$40 < Re < 200$
(d)		İz bölgesinde türbülansa geçiş	$200 < Re < 300$
(e)		İz bölgesi tamamen türbülanslı A: Laminer sınır tabakası ayrılması	$300 < Re < 3 \times 10^5$ (kritik altı)
(f)		A: Laminer sınır tabakası ayrılması B: Sınır tabakası laminar iken türbülanslı tabaka ayrılması	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ (kritik)
(g)		B: Türbülanslı sınır tabakası ayrılması; sınır tabakası bazen laminar bazen türbülanslıdır.	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ (süperkritik)
(h)		C: Sınır tabakası bir tarafta tamamen türbülanslıdır.	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ (üst geçiş-upper transition)
(i)		Sınır tabakası her iki tarafta da tamamen türbülanslıdır.	$4 \times 10^6 < Re$ (transkritik)

Şekil 2.1. Kararlı akım ortamında yer alan bir silindir etrafındaki akım rejimleri



Şekil 2.2. Silindirin arkasında, kararlı akımında Reynolds sayısındaki artışla çevri kopmasının oluşumu (HOMANN 1936).



Şekil 2.3. Silindir etrafında akım bileşenlerinin adlandırılması.

2.2. ÇEVİRİ KOPMASI

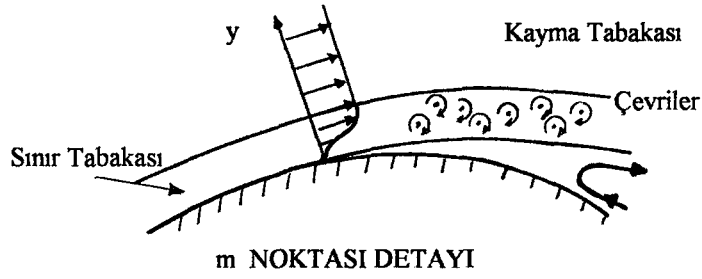
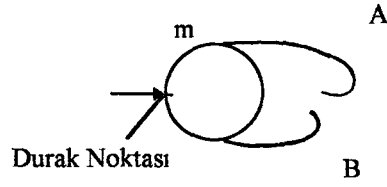
2.2.1. Çevri Kopmasının Oluşum Mekanizması

Bölüm 2.1'den de görüleceği gibi, silindir etrafında oluşan akım rejimlerinin en önemlileri, $Re > 40$ değerlerine karşı gelen çevri kopması rejimleridir (Şekil 2.1.). Doğada karşılaşılan akım rejimlerinde Re sayısının büyük değerleri ($Re > 40$) meydana geleceğinden çevri kopması (vortex shedding) olayının daha detaylı incelenmesi gereklidir. Bu bölümde çevri kopmasının oluşum mekanizması açıklanacaktır.

Daha önce de söz edildiği gibi, Reynolds sayısının yeterince büyük olduğu durumlarda silindirin arka kısmında akım geometrisinden doğan ters basınç gradyanından dolayı silindir yüzeyinde sınır tabakası ayrılır ve bunun sonucunda bir kayma tabakası (shear layer) meydana gelir (Şekil 2.4.).

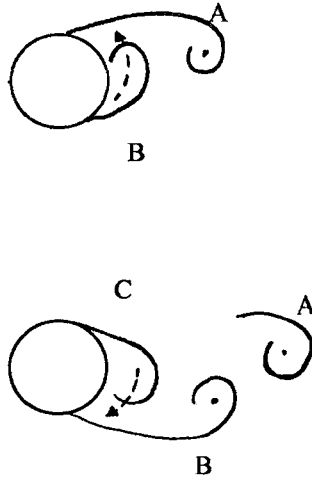
Oluşan bu kayma tabakası katlanarak bir çevri meydana gelir (Çevri A). Aynı şekilde silindirin diğer tarafında da ters yönde bir çevri meydana gelir (Çevri B).

Bu iki çevriden oluşan vorteks çiftinin $Re > 40$ için kararlı yapıya sahip oldukları Bölüm 2.1.'de gösterilmiştir. Bunun sonucunda silindirin bir tarafındaki çevri diğer tarafındaki çevriye göre daha erken gelişir. Şekil 2.4' den de görüldüğü gibi daha önce büyüyen çevrinin (Çevri A) iz bölgesinde yarattığı etki, diğer tarafta oluşmaya başlayan çevriyi (Çevri B) iz bölgesine çekmek için yeterince kuvvetlidir. Yeni oluşmaya başlayan B çevrisinin yönü (Şekil 2.4) diğer çevriye (Çevri A) göre ters yöndedir. Şekil 2.4'den de görüleceği gibi A çevrisinin çevrimi saat yönünde iken silindirin diğer tarafında gelişen B çevrisinin çevrim yönü, saat yönüne zıt yöndedir. Ters işaretli çevrinin (Çevri B) diğer çevriye (Çevri A) yaklaşması bu çevriyi (Çevri A) sınır tabakasından itibaren koparır. Bu anda A çevrisi silindir yüzeyinden ayrılır. Artık A çevrisi akım alanında, akım etkisi ile sürüklenebilecek serbest bir çevri durumundadır.



Şekil 2.4. Silindir yüzeyinde kayma tabakası oluşumu

A çevrisinin ayrılması ile silindirin bu yüzeyinde yeni bir çevri oluşmaya başlar. Daha önce A çevrisinin üstlenmiş olduğu rolü bu kez ters taraftaki ve ters yönde hareket eden B çevrisi üstlenir. B çevrisi boy ve güç olarak büyüyecek ve oluşan yeni çevriyi (C çevrisi) iz bölgesine geçer ve bunun sonucunda B çevrisi silindir yüzeyinden kopar. Bu işlem akım devam ettiği sürece sürer ve her defasında silindirin bir tarafından bir çevri (vortex) şaşırtmalı olarak ayrılır (Şekil 2.5b).



Şekil 2.5. Silindirin iz bölgesinde çevri kopmasını meydana gelişi

Yukarıda da açıklandığı gibi çevri kopması (vortex sheeding), silindirin iki tarafında gelişen iki kayma tabakasının (shear layer) etkilenmesi ile meydana gelir. Eğer bu iki kayma tabakasının etkileşimi fiziksel olarak engellenirse, (iki yüzey arasına konacak levha, vb) kopma engellenmiş olacak, bu durumdan çevri kopması olayı oluşmayacaktır. Bir diğer örnek olarak, silindir tabana yakın veya tabana oturan bir konumda akım alanında yer alıyorsa (deniz deşarj boru hattı gibi) silindirin bir tarafında meydana gelecek olan kayma tabakası tabanın etkisi ile ya zayıf olarak gelişecek ya da tabana tam oturması durumunda hiç oluşmayacaktır. Bu durumda iki kayma tabakası arasındaki etkileşim ya çok zayıf olacak ya da hiç oluşmayacaktır. Bunun sonucunda çevri kopması bastırılacaktır (SÜMER ve FREDSØE 1997). Silindirin taban yakınında yer alması durumu bu çalışmada önemli olduğundan, alt bölümlerde daha detaylı olarak ele alınacaktır.

2.2.2. Çevri Kopması Frekansı

Çevri kopması frekansı (f_v), akım hızı (U) ve silindirin çapı (D) ile normalize edildiği zaman, Re sayısının bir fonksiyonudur.

$$f_v = f(Re) \quad (2.2)$$

Boyutsuz hale getirilmiş çevri kopması frekansı;

$$St = \frac{f_v D}{U} \quad (2.3)$$

olarak belirlenir. Normalize edilmiş çevri kopması frekansı (St) Strouhal sayısı olarak bilinir. Şekil 2.6'da Strouhal sayısının (St), Reynolds sayısı (Re) ile değişimi görülmektedir.

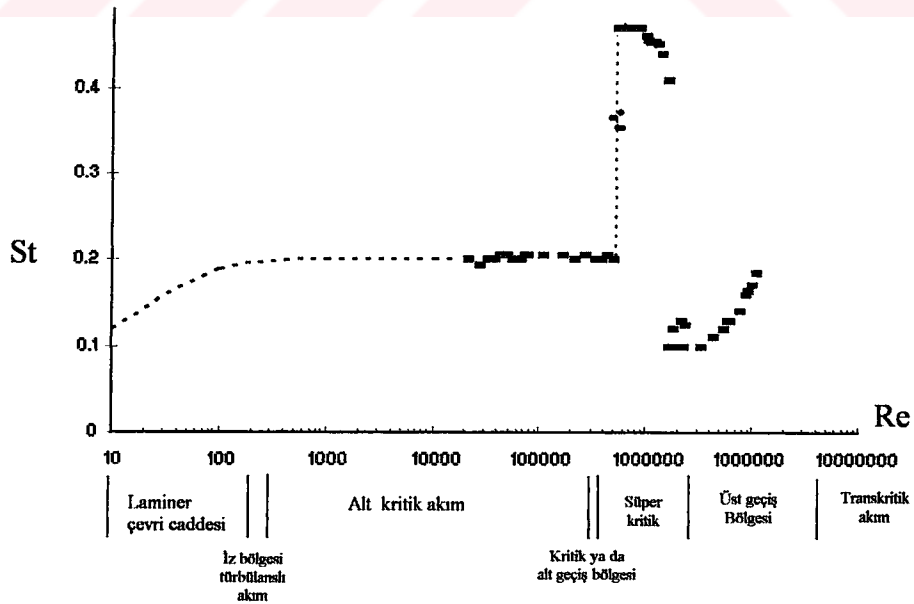
Şekil 2.7'de, SCHEWE (1983)'nin yaptığı bir çalışmada, çeşitli akım rejimlerinde, silindire etkiyen kaldırma kuvvetinin hakim frekansı belirlenmiştir. Sistemin

düşey yöndeki hareketini çevri kopması sağladığından, bu frekans aynı zamanda çevri kopması frekansıdır.

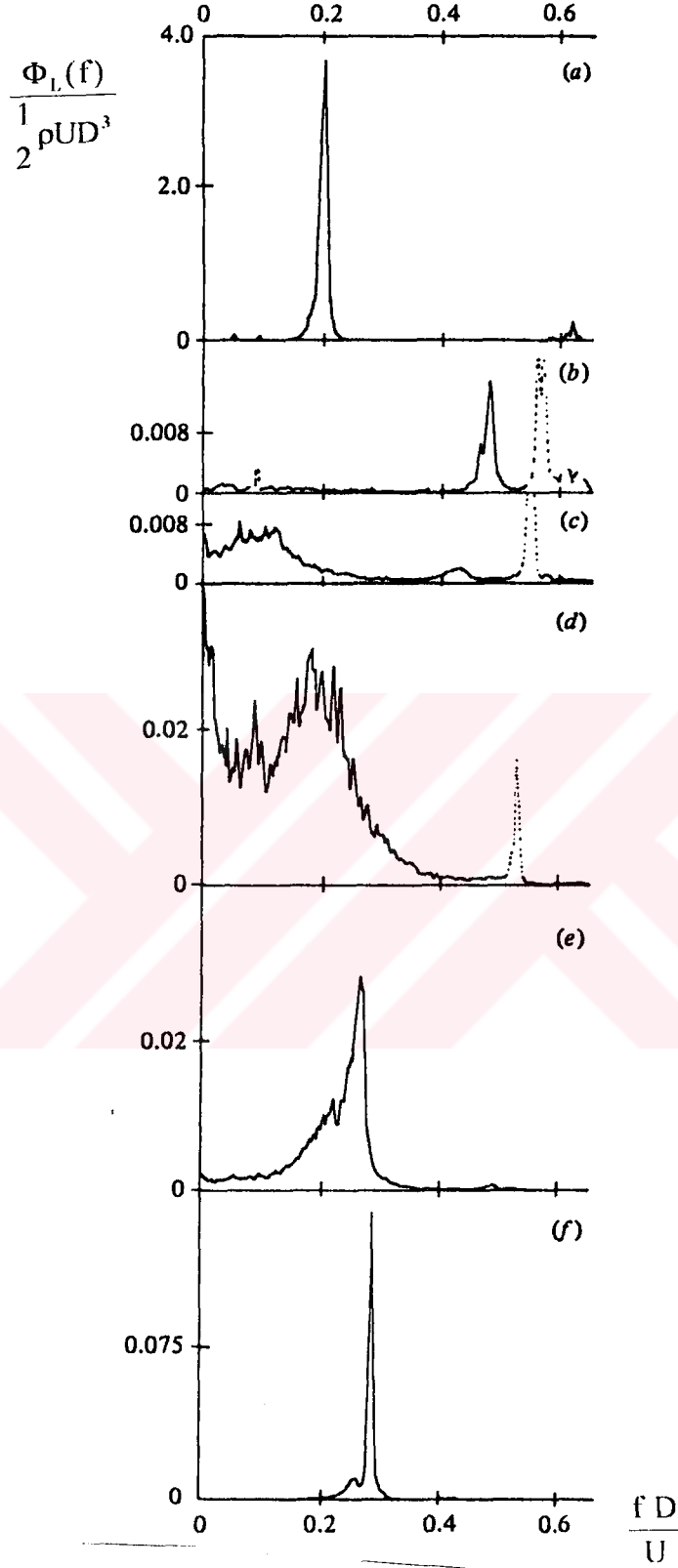
Çevri kopması olayının $Re=40$ değerinden itibaren görüldüğü Bölüm 2.1'de belirtilmişti. Bu değerde çevri kopması frekansının, Strouhal sayısı olarak normalize edilmiş değeri 0.1'dir (Şekil 2.6).

Reynolds sayısındaki artış ile Strouhal sayısında da az miktarda bir artış meydana gelir. Re sayısının yaklaşık 300 değerinde ($Re \cong 300$), Strouhal sayısı yaklaşık 0.2 değerini alır. Bu değer ($St=0.2$), $Re=3 \times 10^5$ değerine kadar sabit bir şekilde devam eder (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7). Bu aralıkta alt kritik akım rejimi mevcuttur (LE COINTE ve PIQUET 1989).

Re sayısının 3×10^5 ve 3.5×10^5 değerleri arasında görülen kritik akım rejiminde ise St sayısı ani bir sıçrama yaparak 0.2'den 0.45 değerine yükselir (Şekil 2.6). Bu değer süper kritik akım rejiminde ($3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$) yavaş bir şekilde azalmaya başlar (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7).

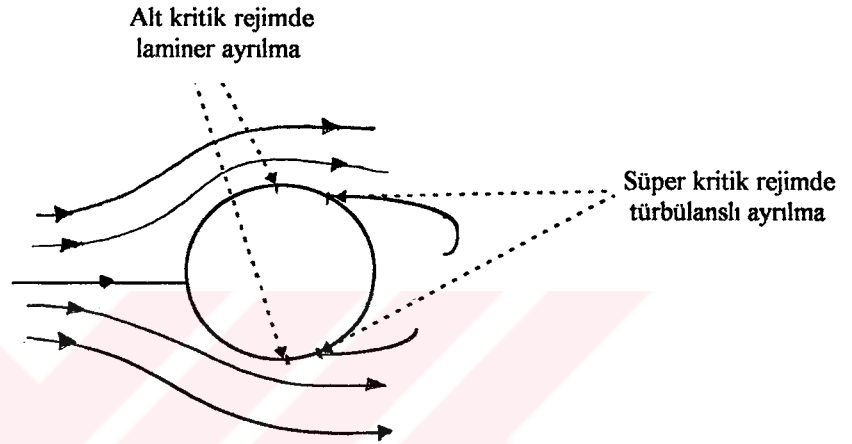


Şekil 2.6. Strouhal (St) sayısının, Re sayısı ile (akım rejimlerine göre) değişimi



Şekil 2.7. Çeşitli akım rejimlerinde silindire etkiyen düşey doğrultudaki kuvvetin spektrum analizi a) Alt kritik, $Re=1.3 \times 10^5$, b) Süper kritik, $Re=7.2 \times 10^5$, c) Üst geçiş bölgesi, $Re=1.9 \times 10^6$, d) Üst geçiş bölgesi, $Re=3.7 \times 10^6$, e) Transkritik akım rejimi başlangıcı, $Re=5.9 \times 10^6$, f) Transkritik, $Re=7.1 \times 10^6$ (SCHEWE 1983).

Reynolds sayısındaki artış ile Strouhal sayısında görülen bu ani artışın sebebi aşağıdaki şekilde açıklanabilir: Silindirin iki tarafında da sınır tabakası ayrılma noktasında tamamen türbülanslıdır. Bu, sınır tabakasındaki ayrılmanın geçikmesine sebep olur. Bunun sebebi, ayrılma noktalarının akım yönü ile aynı doğrultuda kaymasıdır (hareket etmesidir). Bu da çevrilerin birbirine yaklaşması, dolayısıyla etkileşimin daha hızlı bir şekilde meydana gelmesi ve St sayısının daha büyük değerler alması anlamına gelmektedir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Farklı çevri kopması rejimlerinde ayrılma noktalarının yerleri

Reynolds sayısının 1.5×10^6 değeri civarında Strouhal sayısında süreksizlik görülür. Re sayısının bu değerlerinde bir taraftaki sınır tabakası tamamen türbülanslıdır. Diğer taraftaki sınır tabakasının ise zaman zaman laminar veya türbülanslı olması nedeni ile iz bölgesinde çevri kopması simetrik olmayan bir durumdur. Bu durum üst geçiş bölgesi rejimi olarak adlandırılan $1.5 \times 10^6 < Re < 4.5 \times 10^6$ aralığında görülür. İz bölgesindeki simetrisizlik, çevrilerin etkileşimini kısmen engelleyeceğinden düzensiz çevri kopması olayı meydana gelir. Bu durum, belirtilen aralıktaki St sayısının değişken olmasına yol açar.

Transkritik akım rejimi olarak adlandırılan $Re > 4.5 \times 10^6$ olduğu bölgede her iki tarafta da sınır tabakasının tam türbülanslı olması ile birlikte çevri kopması tekrar düzenli hale gelir. Bunun sonucunda Strouhal sayısı (St) $0.25 \approx 0.3$ gibi sabit değerleri alır.

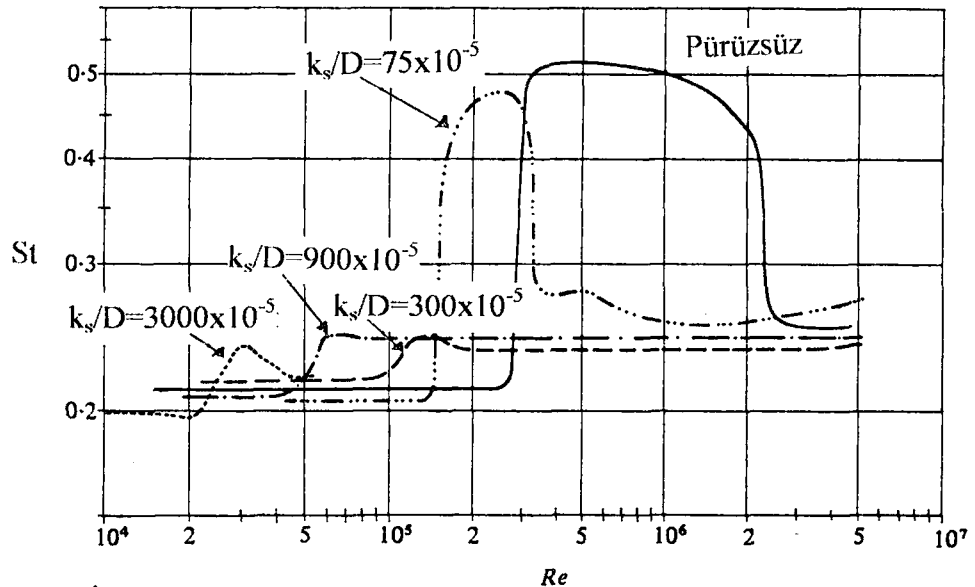
2.2.2.1. Yüzey pürüzlülüğünün çevri kopması frekansı üzerine etkisi

Pürüzlü bir silindir için normalize edilmiş çevri kopması frekansı (Strouhal sayısı) Reynolds sayısının ve yüzey pürüzlülüğünün fonksiyonudur.

$$St = f(Re, k_s/D) \quad (2.4)$$

Bu ifadede k_s , yüzey pürüzlülüklerinin Nikuradse pürüzlülüğü olarak eşdeğeridir.

Strouhal sayısının Re ve k_s/D değerleri ile olan değişimi, deneysel sonuçlara bağlı olarak Şekil 2.9'da verilmiştir (ACHENBACH VE HEINCKE 1981). Bu şekilden de görüldüğü gibi, yüzey pürüzlülüğünün Strouhal sayısı üzerindeki etkisi büyüktür. Yine Şekil 2.9'dan görüleceği gibi, rölatif yüzey pürüzlülüğü k_s/D , 3×10^{-3} değerinden daha büyük değerler aldığı anda ($k_s/D > 3 \times 10^{-3}$), kritik, süperkritik ve üst geçiş akım rejimlerinin görüldüğü ve Strouhal sayısının büyük ve değişken değerler aldığı bölgenin, pürüzsüz silindire göre daha dar bir aralıkta kaldığı ve Strouhal sayısında büyük bir artış gözlenmeden rejim değişimlerinin olduğu görülmektedir. Strouhal sayısında artışın olduğu bu bölge, pürüzlü silindirde daha düşük Re sayılarında görülmektedir. Bunun sebebi yüzey pürüzlülüğünün türbülansa geçişi kolaylaştırması ve bunun sonucunda çevri kopmasının tam türbülanslı hale kolayca geçmesidir.

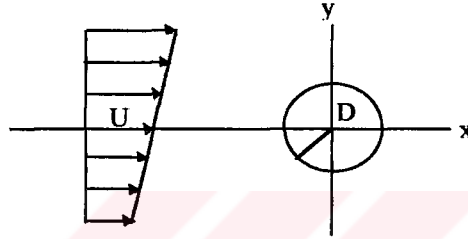


Şekil 2.9. Değişik yüzey pürüzlülüğüne sahip silindirlerde Strouhal sayısının Reynolds sayısı ile değişimi, (ACHENBACH VE HEINCKE 1981).

2.2.2.2. Silindiri etkileyen akımın, üniform olmayışının çevri kopması frekansı üzerine etkisi

Çevri kopmasının meydana gelmesinde önemli bir etken de silindiri etkileyen akımın yapısının silindire karşı gelen kısmında (menba tarafta) üniform olmayışıdır. Silindire gelen akım, iki yönde üniform olmayabilir;

1. Silindir uzunluğu boyunca (spanwise), köprü ayağı ve iskele ayaklarının yükseklikleri boyunca,
2. silindir en kesiti boyunca (cross-flow)(Şekil 2.10)

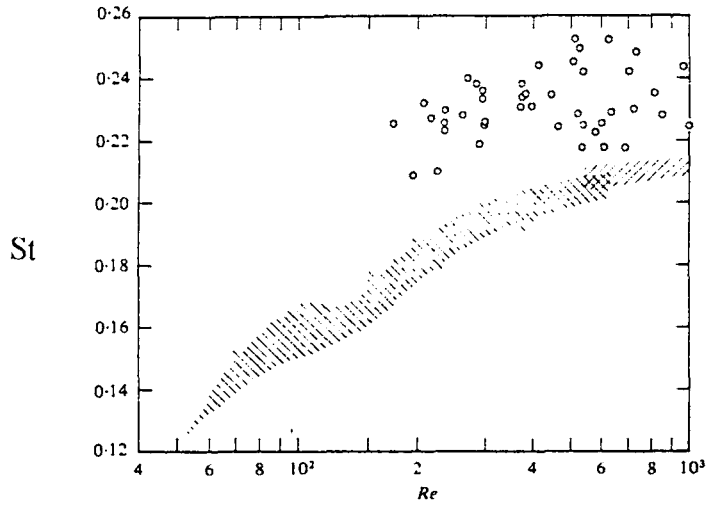
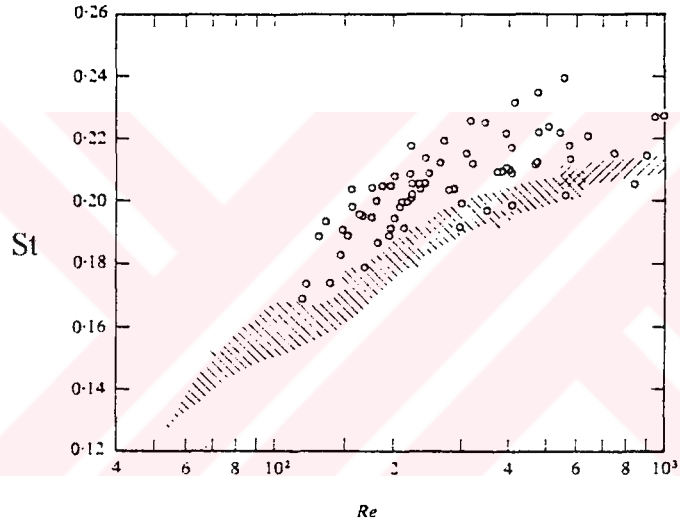
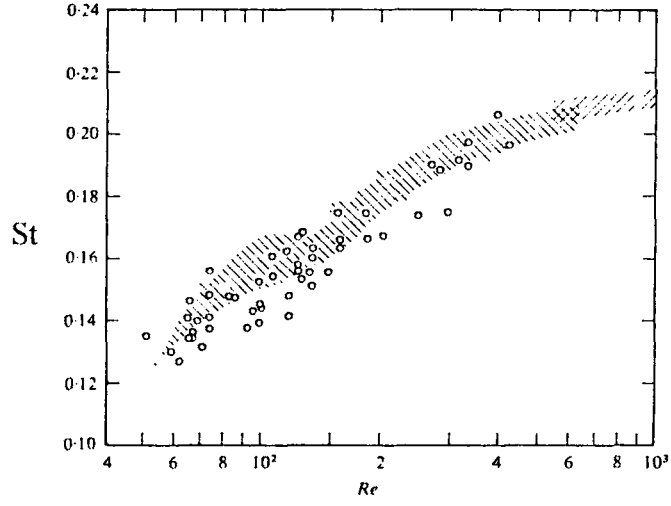


Şekil 2.10. Kararlı akımın silindir enkesiti boyunca üniform olmayışı.

Bu çalışmada tabana oturan silindirik bir yapı incelendiğinden sadece silindir en kesiti boyunca akımın üniform olmayışı incelenecektir. Bu durumda çevri kopması, sadece küçük kayma dikliği değerlerinde önemsenecek şekilde etkilendir. Kayma dikliği (β);

$$\beta = \left(\frac{D}{U_{cl}} \right) \left(\frac{du}{dz} \right) \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. β 'nin büyük değerlerinde ise çevri kopması frekansı, akımın üniform olmayışından önemli şekilde etkilendir (KIYA ve diğ. 1980). β 'nin değişik değerleri için, Strouhal sayısının Re sayısı ile değişimi, Şekil 2.11'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, $\beta = 0.2$ değerinde, üniform akım durumuna göre ($\beta = 0$) Strouhal sayısında önemli bir artış vardır.



Şekil 2.11. Değişik kayma dikliklerinde, Strouhal sayısının Re sayısı ile değişimi (KIYA ve diğ. 1980).

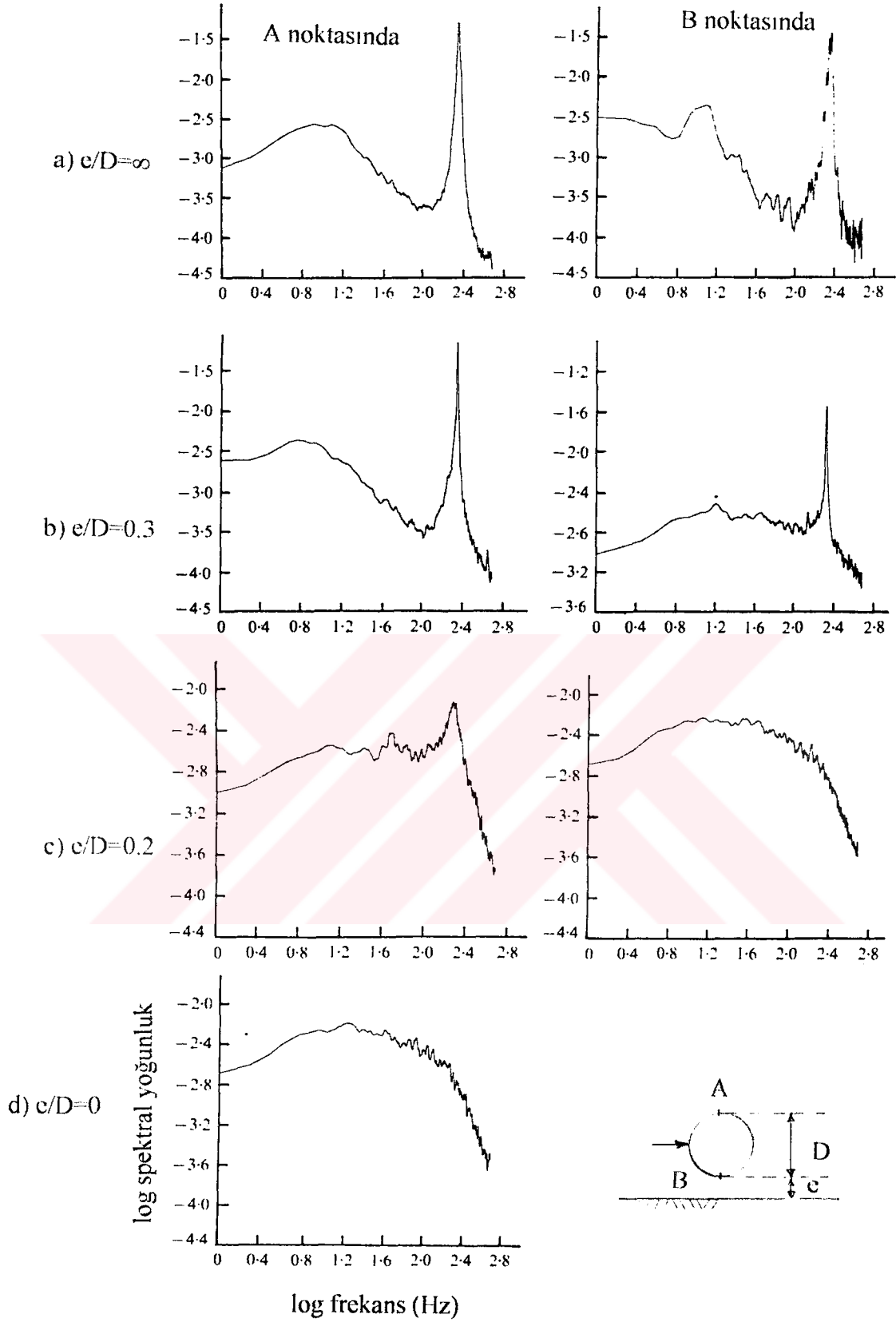
2.2.2.3. Silindirin tabana yakınlığının çevri kopması üzerine etkisi

Akım ortamında yeralan bir silindirin tabana yakın konumda olması doğada çok sık karşılaşılan bir durumdur. Özellikle boru hatlarının tabana oturması nedeniyle bu konu önem kazanır. Öncelikle silindirin tabana yaklaşması durumunda çevri kopması bastırılmış olacaktır. Silindirin iki tarafında yerleştirilmiş sıcak tel anamometrelerinden alınan sinyallerin frekans analizi (power spectrum) sonuçları, silindirin tabana olan çeşitli yakınlıkları için Şekil 2.12'de verilmektedir (BEARMAN ve ZDRAVKOVICH 1978). Düzenli çevri kopmalarının olduğu durumlarda hakim frekansın tek keskin bir pik yaptığı şekilde açıkça görülmektedir. Taban ile silindir arasındaki uzaklığın (e) silindir çapına oranının (e/D) 0.3'ten daha küçük olduğu durumlarda, yakındaki duvarın etkisiyle düzenli çevri kopmasının oluşmadığı ve bu nedenle hakim frekansın çok net olarak görülmediği gözlenmektedir (Şekil 2.12).

GRASS (1984)'ın yaptığı çalışmanın sonuçlarına göre e/D 'nin 0.3'ten küçük değerlerinde, ($e/D < 0.3$) düzenli çevri kopması görülmemektedir.

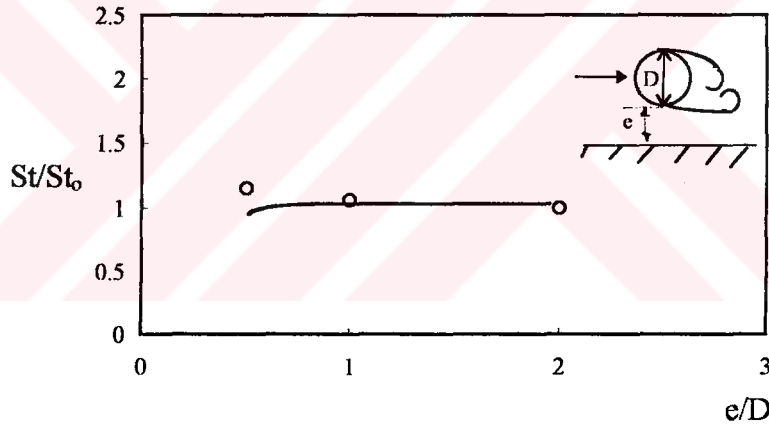
Çevri kopması frekansının, tabanın silindirin yakınında olmasından etkilenmesinin sebebi, silindirin tabana yakın yüzeyinde oluşan çevrinin tam gelişmemesi ve silindirin diğer tarafında gelişen çevrinin bu nedenle çok güçlü kalmasıdır. Özellikle e/D 'nin küçük değerlerinde bu durum daha belirgindir.

Taban yakınındaki silindir iz bölgesindeki çevri kopmasını etkileyen bir diğer faktör de sınır tabakasının kalınlığıdır (δ). Eğer akımın katı cidarda oluşturacağı sınır tabakası kalınlığı bazı nedenlerle az ise, diğer bir ifade ile δ/D oranı küçük değerler alıyorsa, duvar ile silindir arasında bastırılmış durumda bulunan çevri üst kısmında gelişen çevriyi koparacak kadar güçlü olabilir. Bu da daha küçük e/D oranlarında çevri kopmasının meydana gelmesini sağlayabilir. SÜMER ve diğ.(1991)'nin çalışmalarında δ/D değeri 0.01 ile 0.16 arasında değişirken, $e/D=0.1$ değerinde çevri kopmasının olduğu görülmüştür (Çalışma salınımlı hareket etkisi altında yapılmıştır).



Şekil 2.12. e/D ile çevri kopması frekansının değişimi (BEARMAN ve ZDRAVKOVICH 1978).

Tabanın silindir yakınında yer almasının, iz bölgesindeki çevri kopmasına etkisi çeşitli e/D değerlerinde incelendiğinde, yapılan ölçümler, silindir tabana yaklaştıkça yani e/D değeri küçüldükçe çevri kopmasında az da olsa bir artış olduğunu göstermektedir. Şekil 2.13'de bu doğrultuda yapılan iki çalışmanın sonuçları özetlenmiştir. İlk çalışmada deney kanalının tabanı hem pürüzsüz hem de pürüzlü olarak alınmıştır. Deney silindiri ise pürüzsüzdür. Bu şekildeki St , duvar etkisinin olduğu; St_0 ise, aynı akım koşulları altında duvar etkisinin olmadığı haldeki Strouhal sayılarını ifade etmektedir (GRASS ve diğ. 1984). Şekilde görülen diğer datalar ise sınırlı sayıdadır. Bunun sebebi, ölçümlerin doğada prototip üzerinde yapılmasıdır. Ölçümler Severn Haliç'inde yeralan 50.8 cm çapında ve yüzey pürüzlülüğü $k/D = 8.5 \times 10^{-3}$ olan boru hattı üzerinde yapılmıştır (RAVEN ve diğ. 1985). Her iki çalışmada da Strouhal sayısının belirlenmesinde, referans hız olarak silindirin üst noktasındaki hız alınmıştır.



Şekil 2.13. Normalize edilmiş Strouhal sayısının e/D ile değişimi, (GRASS ve diğ. 1984);(RAVEN ve diğ. 1985).

Bu konuda yapılan diğer bazı çalışmalara BEARMAN ve ZDRAVKOVICH (1978) ile ANGRILLI ve diğ. (1982) örnek olarak gösterilebilir. BEARMAN ve ZDRAVKOVICH (1978)'in çalışmasında, çevri kopmasının pratik olarak değişmediği $0.3 \leq e/D \leq 3$ aralığı incelenmiştir. ANGRILLI ve diğ. (1982)'in yaptığı çalışmada ise $0.5 \leq e/D \leq 6$ aralığında ölçümler yapılmış ve sonuç olarak e/D 'deki azalmaya karşılık çevri kopması frekansında az da olsa bir artış olduğu açıklanmıştır (Yayımlanan rapora göre $e/D=0.5$ iken çevri kopması frekansında, duvardan etkilenmeyen silindir durumuna göre % 10' luk bir artış görülmüştür).

2.3. KARARLI AKIM ORTAMINDA YERALAN BİR SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ KUVVETLER

2.3.1. Sürükleme ve Kaldırma Kuvveti

Daha önceki bölümde, akım ortamında yeralan bir silindir etrafındaki akım alanının Re sayısı ile değiştiği ve bu değişimin, yapının en kesit şekli ve pürüzlülüğü ile çevredeki akım koşullarına olan bağımlılığı belirlenmiş idi. Burada en önemli özellik, akım rejimlerinin önemli bir kısmında ($Re \geq 40$) silindir etrafında görülen ve çevri kopması rejimi diye adlandırılan olaydır. Öyle ki, çevri kopması olayının silindir etrafında görülmesi ile birlikte silindir etrafındaki basınç dağılımında periyodik değişiklikler olacak ve silindire etkiyen kuvvet bileşenlerinde de periyodik değişiklikler görülecektir.

Şekil 2.14'de, silindirin iz bölgesinde akımın değişmesi ile silindir üzerinde ölçülen basınç dağılımı görülmektedir. Şekildeki zaman aralığı çevri kopması periyodundan (bir çevri kopması oluşması) çok az daha büyüktür. Silindir üzerindeki basınç değerleri boyutsuz hale getirilmiş basınç sabiti (C_p) olarak gösterilmiştir. Basınç sabiti, C_p ;

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.6)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada p herhangi bir andaki basınç değerini, p_0 aynı noktada akım yokken ölçülen hidrostatik basınç yüksekliğini, ρ akışkanın özgül kütlesini, U da akım hızını göstermektedir.

Şekil 2.15'de ise, sonuçları Şekil 2.14'de verilmiş olan aynı deneyler sırasında sisteme etkiyen kuvvetlerin bileşenlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Kuvvetlerin değişimi, akım doğrultusunda ki kuvvet katsayısı C_D ile akıma dik doğrultudaki kuvvet katsayısı C_L 'nin değişimi olarak verilmiştir. Bu bileşenlerin ifadeleri daha sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

Şekil 2.14 ve Şekil 2.15 incelendiğinde, iki önemli yapı göze çarpmaktadır. Birincisi, silindire etkiyen akım doğrultusundaki kuvvetin zamanla değişiminin periyodik olduğu; ikincisi ise, silindire yaklaşan akımın silindir eksenine göre simetrik (üniform akım) olması durumunda akıma dik doğrultuda da sıfırdan farklı ve periyodik bir kuvvetin oluştuğudur. Ortalaması sıfır olan bu akıma dik doğrultudaki kuvvetin değişimi Şekil 2.15'de görülmektedir.

Akım doğrultusundaki kuvvet, sürüklenme kuvveti olarak (drag force), akıma dik doğrultudaki kuvvet ise kaldırma kuvveti (lift force) olarak bilinir. Şekil 2.14 ve Şekil 2.15 incelendiğinde sürüklenme kuvvetinin bir ortalama değer etrafında değiştiği görülmektedir. Kaldırma kuvvetinin ortalaması ise sıfırdır. Buradaki kuvvetler, Şekil 2.14'de görülen basınç dağılımının silindir üzerindeki integrasyonu ile belirlenmiştir (DRESCHER 1956);(SÜMER 1992);(AVCI ve diğ. 1996).

2.3.2. Ortalama Sürüklenme Kuvveti

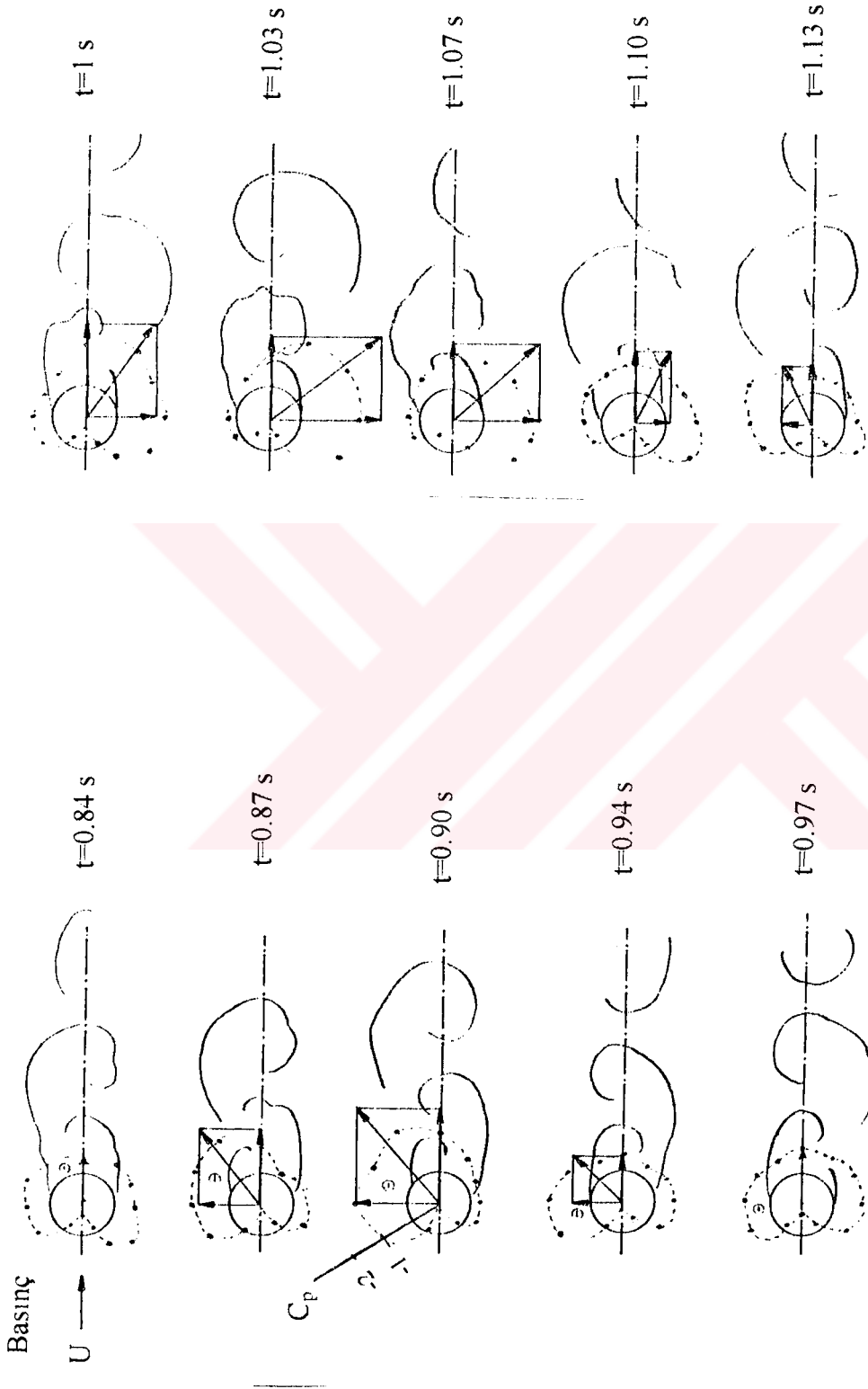
Kararlı akım ortamında yeralan bir silindire etkiyen ortalama sürüklenme kuvveti iki bileşenden meydana gelir;

1. Şekil direnci (form drag)
2. Sürtünme sürüklenme kuvveti (friction drag)

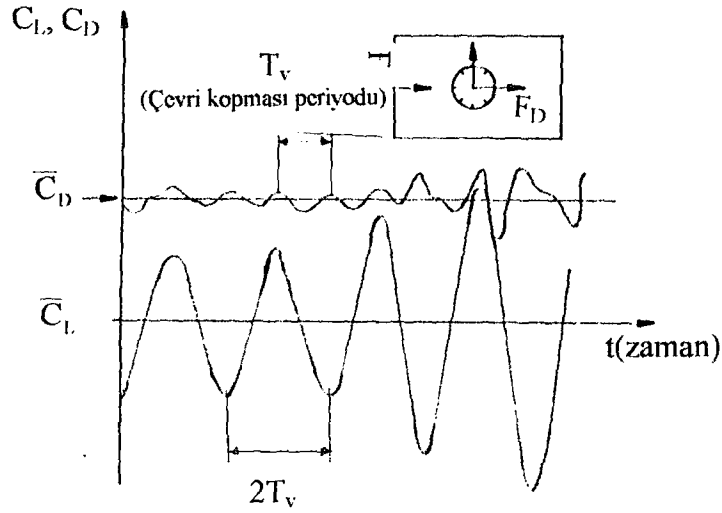
Şekil direnci (form drag) ve sürtünme sürüklenme kuvveti

Şekil direnci, normal gerilmenin (basınç gerilmesinin) silindir yüzeyinde oluşturduğu sürüklenme kuvvetidir. Bu kuvvetin ortalama değeri;

$$\bar{F}_p = 2 \int_0^{\pi} \bar{p} \cos(\phi) R d\phi \quad (2.7)$$



Şekil 2.14. Kararlı akım ortamında yeralan bir silindir etrafındaki basınç dağılımı ve silindire etkiyen kuvvetin bileşenlerinin zamanla değişimi, $Re = 1.1 \times 10^5$, $D = 8 \text{ cm}$, $U = 1.53 \text{ m/s}$ (DRESCHER 1956).



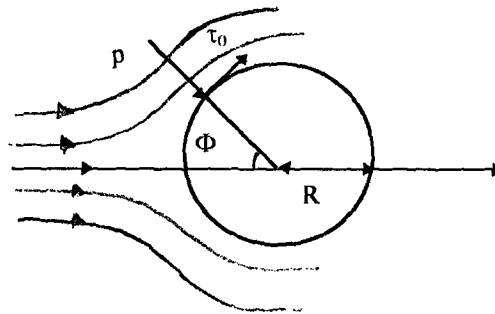
Şekil 2.15. Sürüklenme ve kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi ($Re = 1.1 \times 10^5$) (DRESCHER 1956).

* Şekil 2.14'deki deneyler esas alınarak çizilmiştir.

şeklindedir. Burada, $\bar{F}_p$ şekil sürüklenme kuvvetinin ortalama değeri, $\bar{p}$ silindir yüzeyinde basıncın zamansal ortalama değeri ve R de silindirin yarıçapıdır (Şekil 2.16).

Silindir yüzeyinde akım ile yüzey arasındaki yüzey sürtünmesi nedeni ile oluşacak kayma gerilmesinin (τ_0) etkisi ile oluşacak sürtünme sürüklenme kuvvetinin ortalama değeri ($\bar{F}_r$) de;

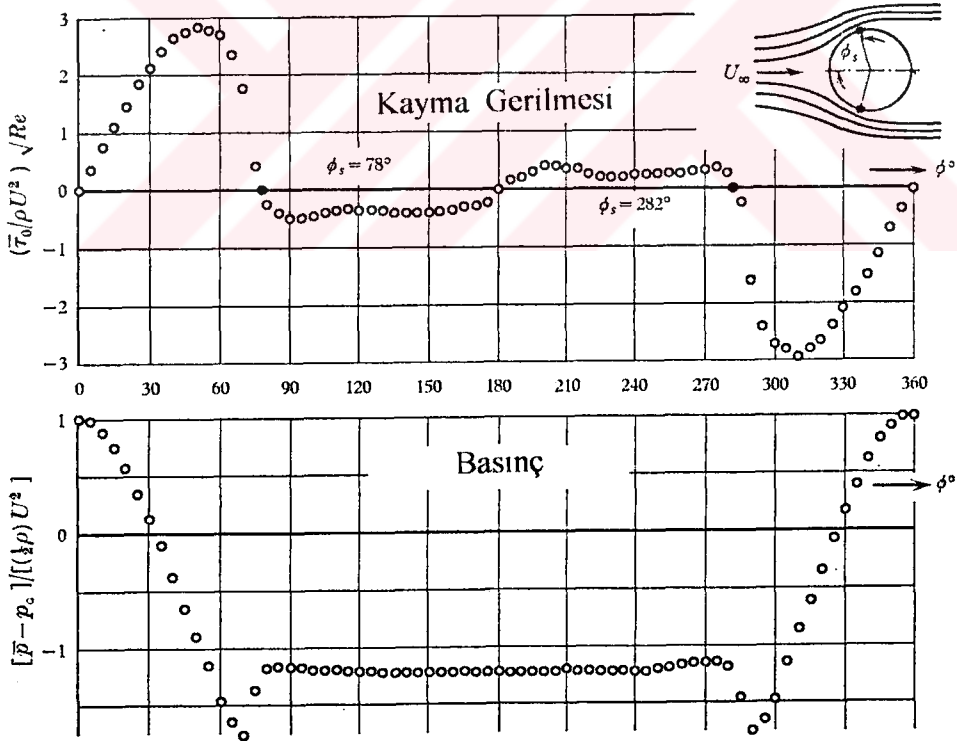
$$\bar{F}_r = 2 \int_0^\pi \tau_0 \sin(\phi) R d\phi \quad (2.8)$$



Şekil 2.16. Kararlı akım ortamında yeralan bir silindir yüzeyinde oluşacak gerilmeler

olarak belirlenebilir. Burada $\bar{\tau}_0$ silindir yüzeyindeki kayma gerilmesinin zamansal ortalama değeridir. Her iki sürüklenme kuvvetini oluşturan etkenler Şekil 2.16'da görülmektedir.

Şekil 2.17'de silindir üzerindeki kayma gerilmesi ve basınç dağılımlarının zamansal ortalaması görülmektedir (ACHENBACH 1968). Şekilden de görüleceği gibi sürtünmenin oluşturacağı sürüklenme kuvvetinin (friction drag) en önemli bölümü, silindirin alt ve üst yüzeyinde meydana gelmektedir. Bunun nedeni, kayma gerilmesinin silindirin alt ve üst yüzeyinde büyük değerler almasıdır. Buna karşılık silindir üzerinde basınç değerleri ile oluşan şekil direnci (form drag), şekilden de kolayca görüleceği gibi, basıncın silindirin ön yüzündeki pozitif değerleri ile arka kısmındaki negatif değerleri arasındaki farktan ileri gelmektedir.



Şekil 2.17. Silindir üzerinde basınç ve yüzey kayma gerilmesinin zamansal ortalamasının dağılımı ($Re=10^5$)(ACHENBACH 1968).

Silindir üzerinde kayma gerilmesi ve basınç dağılımı deneysel olarak ölçülürse, (2.7) ve (2.8)'deki denklemler kullanılarak ortalama sürüklenme kuvvetinin, ortalama şekil sürüklenmesi ve ortalama kayma sürüklenmesi bileşenleri belirlenebilir. Bu iki sürüklenme kuvvetinin toplamı, toplam ortalama sürüklenme kuvvetini ($\bar{F}_D$) oluşturur. Toplam ortalama sürüklenme kuvveti ($\bar{F}_D$);

$$\bar{F}_D = \bar{F}_p + \bar{F}_r \quad (2.9)$$

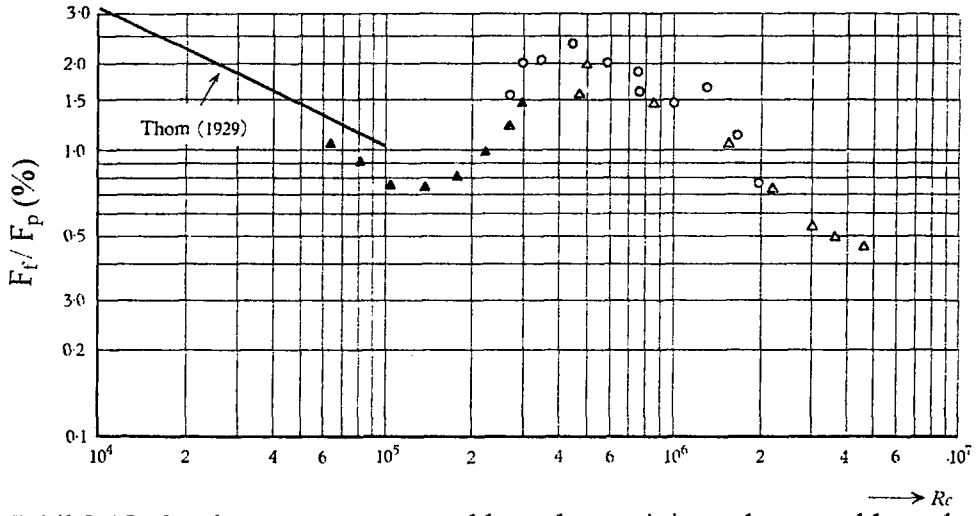
şeklindedir. Burada, $\bar{F}_p$ ortalama şekil sürüklenmesi, $\bar{F}_r$ ortalama sürtünme sürüklenmesidir. Şekil 2.18'de silindir üzerinde ölçülmüş kayma gerilmesinin yüzey üzerinde integrasyonu ile elde edilen ortalama sürtünme sürüklenme kuvvetinin ($\bar{F}_r$), toplam ortalama sürüklenme kuvvetine ($\bar{F}_D$) oranının Re sayısı ile değişimi görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi $\bar{F}_r / \bar{F}_D$ oranı, pratikte karşılaşılabilecek $Re \geq 1 \times 10^4$ değerlerinde, %2~3'den küçük değerler almaktadır. Bundan çıkarılacak sonuç, toplam ortalama sürüklenme kuvvetinin esas itibariyle basınç gerilmeleri sonucunda ortaya çıkan ortalama şekil sürüklenme kuvvetinden meydana geldiği, ortalama sürtünme sürüklenme kuvvetinin ise toplam sürüklenme kuvvetinin üzerinde çok küçük (%2~3'den az) bir etkisi olduğu ve dolayısı ile bu ikinci kuvvet bileşeninin pratikte gözönüne alınmayacağıdır (ACHENBACH 1968);(SÜMER 1992).

Buna göre, kararlı akım ortamında yeralan bir silindire etkiyen ortalama sürüklenme kuvveti ($\bar{F}_D$);

$$\bar{F}_D \cong \bar{F}_p$$

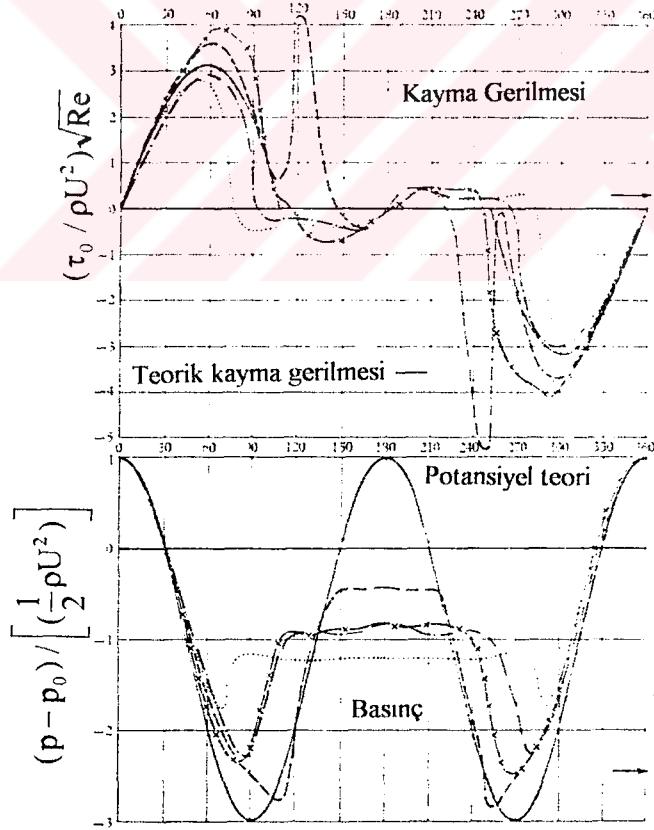
$$\bar{F}_D = 2 \int_0^{\pi} \bar{p} \cos(\phi) R d\phi \quad (2.10)$$

olarak gösterilebilir. Sonuç olarak, silindir üzerindeki toplam sürüklenme kuvvetinin, silindir üzerindeki basınç dağılımı sonucu meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 2.18. Ortalama sürtünme sürüklemesi kuvvetinin toplam sürüklemesi kuvvetine oranının, Re sayısı ile değişimi, (ACHENBACH 1968).

Silindir etrafında ölçülmüş basınç dağılımlarının farklı Re sayısı ile değişimleri Şekil 2.19a'da görülmektedir. Şekil 2.19b'de ise, aynı anda silindir yüzeyinde ölçülen kayma gerilmesi dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.19. Değişik Reynolds sayılarında, silindir üzerinde basınç ve kayma gerilmesi dağılımı, (ACHENBACH 1968).

Şekil 2.19a'da aynı anda potansiyel teori ile hesaplanan silindir üzerindeki basınç dağılımı da görülmektedir. Potansiyel teori ile bu basınç dağılımı;

$$\bar{p} - \bar{p}_0 = \frac{1}{2} \rho U^2 (1 - 4 \sin \phi) \quad (2.11)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu ifadede p_0 hidrostatik basınç değeridir. Silindir etrafında ölçülen basınç dağılımlarının en önemli karakteristik davranışı, potansiyel teori ile hesaplanan basınç dağılımında silindirin arka kısmında pozitif basınçlar bulunurken, ölçülen değerlerde arka kısımda basınç dağılımının daima negatif değerler almasıdır. Pozitif değerlerle negatif değerleri ayıran sınır, ayrılma noktasıdır.

Bu şekilde görülen ikinci noktada silindirin iz bölgesi kısmında kalan yüzeyinde basınç dağılımı yaklaşık olarak sabittir. Burada iz bölgesi olarak tanımlanan, silindirin üst kenarı ile alt kenarındaki ayrılma noktaları arasında silindirin arka kısmında kalan bölgedir. Şekilde ayrılma noktaları kayma gerilmesi diyagramında işaretlenmiştir (Şekil 2.19.b). Bunun sonucunda, akım hızındaki değişmeye göre (farklı Re sayıları) silindir üzerindeki basınç dağılımında pratik olarak çok önemli değişiklikler olmadığı söylenebilir.

Ortalama sürüklenme kuvveti sabiti

Kararlı akım ortamında yeralan bir silindire etkiyen sürüklenme kuvveti (2.7) ve (2.9) denklemleri kullanılarak aşağıdaki formda yazılabilir;

$$\bar{F}_D = 2 \int_0^\pi (\bar{p} \cos(\phi) + \bar{\tau}_0 \sin(\phi)) R d\phi \quad (2.12)$$

Bu ifadenin her iki tarafı $(\frac{1}{2} \rho D U^2)$ ' ye bölünürse (2.12) denklemi;

$$\frac{\bar{F}_D}{\frac{1}{2}\rho DU^2} = 2 \int_0^\pi \left[\left(\frac{p - p_0}{\rho U^2} \right) \cos(\phi) + \left(\frac{\tau_0}{\rho U^2} \right) \sin(\phi) \right] d\phi \quad (2.13)$$

şeklini alır; burada D silindirin çapıdır ($D = 2R$). Denklemin sağ tarafı, hem basınç terimlerinin hem de kayma gerilmesi terimlerinin Re sayısının fonksiyonu olması nedeni ile, Re sayısının fonksiyonudur. Bu sebeple (2.13.) denklemi,

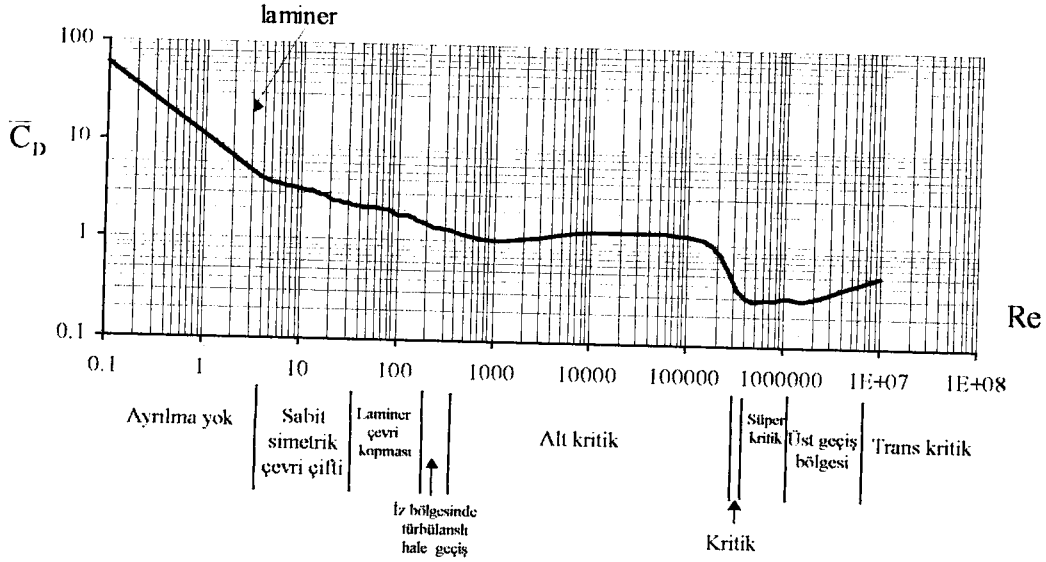
$$\frac{\bar{F}_D}{\frac{1}{2}\rho DU^2} = \bar{C}_D \quad (2.14)$$

olarak yazılabilir. Burada $\bar{C}_D$ ortalama sürüklenme kuvveti katsayısıdır ve Re sayısının bir fonksiyonudur.

Şekil 2.20'de deneysel verilerle birlikte laminar teori ile hesaplanmış (ayrılmanın olmadığı laminar akım bölgesinde) $\bar{C}_D$ değerlerinin Re sayısı ile değişimi görülmektedir.

Şekil 2.20'de görüldüğü gibi, Re sayısının değeri sıfırdan 300'e doğru arttırıldığında $\bar{C}_D$ rutin bir şekilde azalmaktadır. Reynolds sayısının $Re \leq 300$ ve $300 < Re < 3 \times 10^5$ değerleri için alt kritik akım rejiminin görüldüğü bölgede $\bar{C}_D$ pratik olarak 1.4 sabit değerini almaktadır. Re sayısı 3×10^5 ten itibaren arttırılmaya başlanırsa $\bar{C}_D$ 'de ani, beklenmeyen bir değişim görülür ve $\bar{C}_D$ ani olarak 0.4 değerine düşer. Bu değer, komşu akım rejimi olan süper kritik akım rejiminde de devam eder (Şekil 2.20). $\bar{C}_D$ 'de bu şiddetli düşüşün görüldüğü olaya sürüklenme krizi (drag crisis) adı verilir.

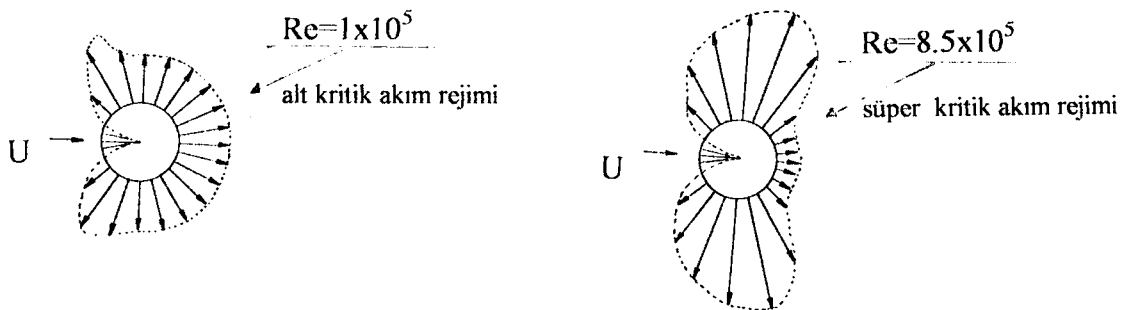
Sürüklenme krizi kavramı, en kolay olarak silindir etrafında basınç dağılımının görüldüğü Şekil 2.21 referans alınarak açıklanabilir (Sürtünme sürüklenme kuvvetinin, toplam sürüklenme kuvveti üzerinde etkili olmadığı Şekil 2.18'de gösterilmiştir).



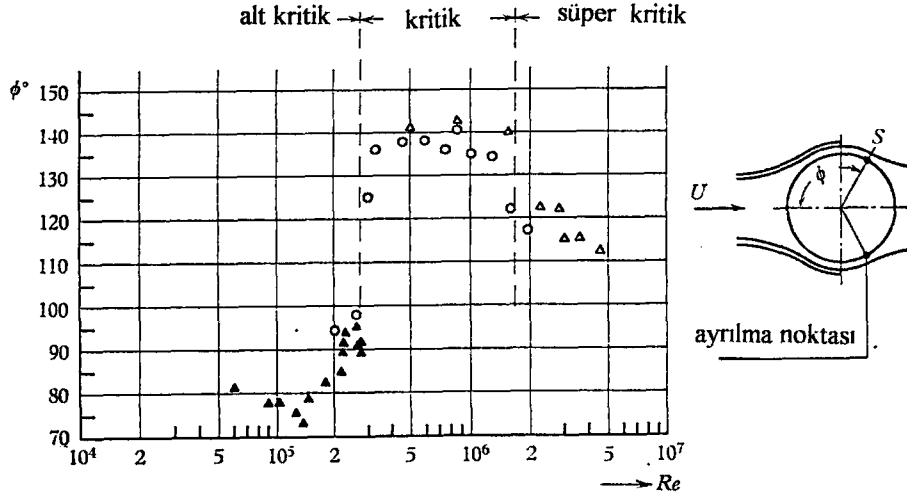
Şekil 2.20. Sürüklemeye katsayısının ($\bar{C}_D$) Re sayısı ile değişimi, (SCHLICHTING 1979)

ACHENBACH (1968)' in yaptığı çalışmada iki farklı Re sayısı için verdiği silindir etrafındaki basınç dağılımı Şekil 2.21'de gösterilmiştir. Bunlardan ilkinde (Şekil 2.21a) $Re=1 \times 10^5$ tir. Buna göre akım, alt akım rejimi durumundadır. İkincisinde $Re = 8.8 \times 10^5$ tir ve akım rejimi bu Re sayısında süper kritik durumdadır (Şekil 2.21.b). Şekil 2.21'den açıkça görüleceği gibi süper kritik akım rejiminde sürüklemeye kuvveti, alt kritik akım rejimindekinden daha küçüktür. Burada olay üzerindeki belirleyici etki, ayrılma noktasının $\phi_s = 78^\circ$ 'den ($Re = 1.1 \times 10^5$ ve laminar ayrılma), $\phi_s = 140^\circ$ 'ye ($Re = 8.5 \times 10^5$, türbülanslı ayrılma) geçmesidir (Şekil 2.22).

Akım rejimi alt kritikten, süper kritiğe doğru değişmesi sonucu iz bölgesinde negatif basınçlar küçülür ve bu nedenle sürüklemeye katsayısı da küçülür (Şekil 2.21).



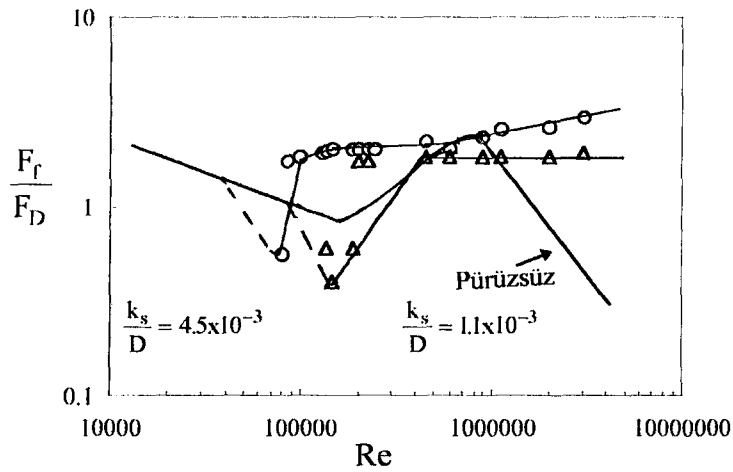
Şekil 2.21. Silindir üzerinde basınç dağılımı (ACHENBACH (1968)' in çalışmasındaki grafikler yeniden düzenlenmiştir).



Şekil 2.22. Silindir üzerinde ayrılma noktasının yerinin Re sayısı ile değişimi (ACHENBACH 1968).

Silindirin yüzey pürüzlülüğünün ortalama sürüklenme kuvvetine etkisi

Kararlı akım ortamında yeralan pürüzlü bir silindiri etkileyen ortalama sürüklenme kuvveti, pürüzsüz silindirde olduğu gibi, yaklaşık olarak şekil direncinden oluşan kuvvete eşittir. Sürtünme sürüklenme kuvveti, pürüzlü silindirde de toplam ortalama sürüklenme kuvvetinin %2~3'ünü geçmez (Şekil 2.23).



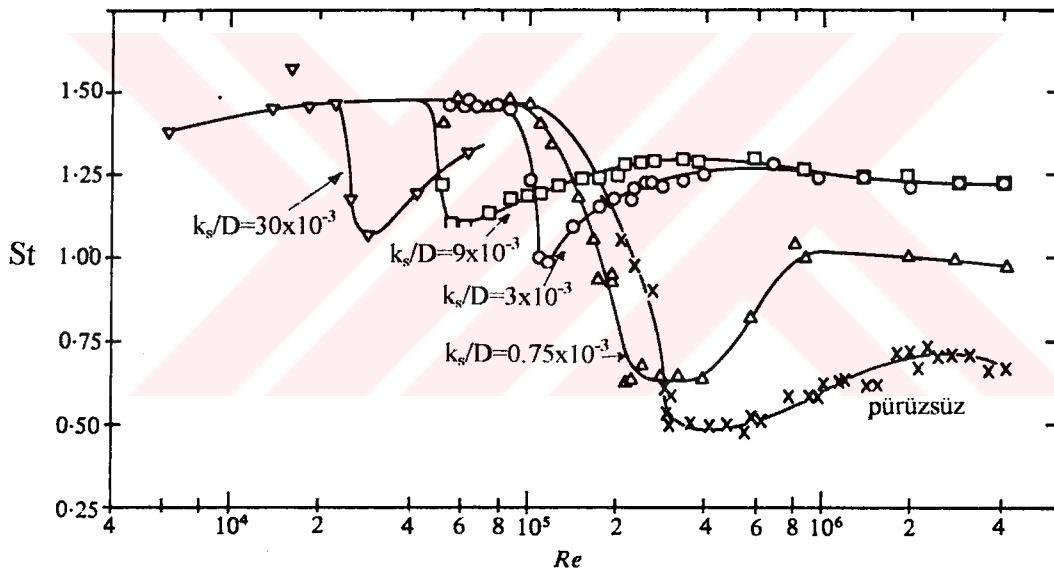
Şekil 2.23. Değişik pürüzlülüğe sahip silindirlere ortalama sürtünme sürüklenme kuvvetinin toplam sürüklenme kuvvetine oranının Re sayısı ile değişimi (ACHENBACH 1971).

Ortalama sürüklenme kuvveti katsayısı ($\overline{C}_D$), pürüzlü silindirde sadece Re sayısının fonksiyonu değildir. $\overline{C}_D$ üzerinde, k_s/D pürüzlülük parametresi de etkilidir (2.15).

$$C_D = f\left(Re, \frac{k_s}{D}\right) \quad (2.15)$$

İfadede k_s/D , silindir üzerindeki rölatif pürüzlülüklerin Nikuradse rölatif kum pürüzlülüğü olarak eşdeğeridir.

Şekil 2.24'de $\overline{C}_D$ 'nin Re sayısı ile değişimi, değişik pürüzlülüğe sahip (k_s/D) silindirler için verilmiştir.



Şekil 2.24. Ortalama sürüklenme kuvveti katsayısının ($\overline{C}_D$) değişik yüzey pürüzlülüklerinde (k_s/D) Re sayısı ile değişimi (ACHENBACH ve HEINCKE 1981)

Şekil 2.24'den görüldüğü gibi, silindir yüzeyi pürüzlü hale geçmesine rağmen, $\overline{C}_D$ pürüzsüz haldeki yapıyı korumaktadır. Bununla birlikte yüksek Re sayılarında ortaya çıkan iki akım rejimi, süper kritik ve üst geçiş bölgesi rejimleri, silindir pürüzlülüğü arttıkça birleşerek tek bir akım rejimi oluşturacak şekilde karışırlar. Şekil 2.24'den yola çıkarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;

1. Küçük Re sayılarında (örneğin alt kritik akım rejimi Re sayıları) $\overline{C}_D$, silindir pürüzlülüğü değişse de, pürüzsüz silindirdeki gibi 1.4 civarında sabittir.

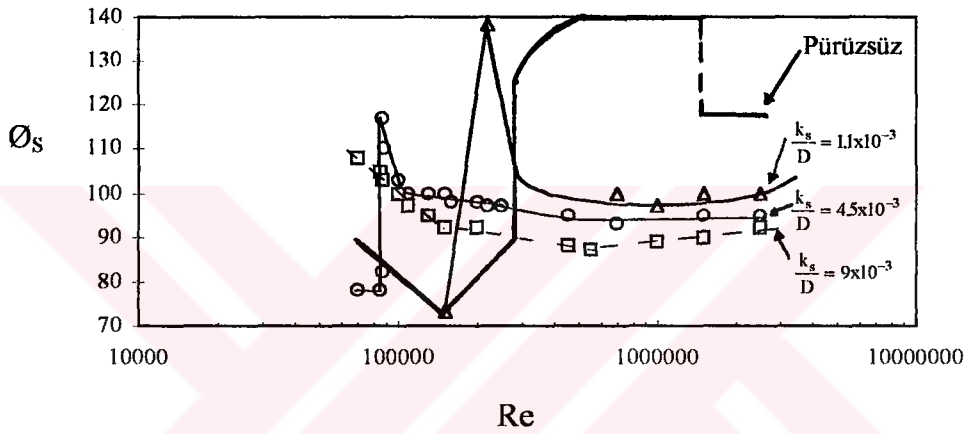
2. Şekil 2.24'den de görüldüğü gibi, $\overline{C}_D$ katsayısının Re sayısı ile değişiminde $\overline{C}_D$ 'nin minimum değerleri, pürüzlülüğün artışı ile daha düşük Re sayısı değerlerinde görülmektedir. Bunun sebebi, pürüzlülüğün artması ile sınır tabakasında türbülansın daha erken oluşmasıdır.

3. Sürüklemeye kuvveti katsayısının düşük değerler aldığı sürüklemeye krizi bölgesi, pürüzlü yüzeye sahip silindirde, cilalı (pürüzsüz) yüzeye sahip silindirdeki gibi değildir. Pürüzsüz yüzeyli silindirde, sürüklemeye krizi sonucunda $\overline{C}_D$ 'nin değeri 1.4' ten 0.4'e kadar düşmektedir. Silindir yüzeyi, pürüzlü yapıya sahip olduğunda ise bu düşüş bu kadar fazla olmamaktadır. Örneğin, rölatif Nikuradse pürüzlülüğü (k_s/D) 30×10^{-3} olan bir silindirde bu düşüş 1.4'ten 1.1'e inmektedir (Şekil 2.24). Bu tamamen ayrılma noktasının silindir üzerindeki yerinin silindir yüzeyinin pürüzlülüğü ile yer değiştirmesi ile ilgilidir. Şekil 2.25'de değişik pürüzlülüğe sahip silindirlerde ayrılma noktasının yeri, ayrılma açısına (ϕ_s) bağlı olarak görülmektedir. Şekil 2.25 incelendiğinde, pürüzsüz silindirde $\phi_s = 140^\circ$ iken, $k_s/D = 4.5 \times 10^{-3}$ olan pürüzlü silindirde ise $\phi_s = 115^\circ$ olmaktadır. Buna bağlı olarak Şekil 2.21b.'de görülen pürüzsüz silindirdeki basınç dağılımı değişecek, pürüzlü silindirde aynı Re sayısında, ayrılma sayısının değişmesiyle, Şekil 2.21a.'da görülene benzer bir basınç dağılımı ortaya çıkacak ve sürüklemeye kuvveti katsayısı aynı Re sayısında pürüzlü silindirde daha büyük değer alacaktır (Şekil 2.24).

Şekil 2.24'de ki transkritik akım rejimi incelendiğinde, silindirin yüzey pürüzlülüğü arttıkça, bu akım rejimi daha küçük Re sayılarında ortaya çıktığı görülmektedir. $\overline{C}_D$ sürüklemeye kuvveti katsayısı da pürüzlülüğün atmasıyla bu akım rejiminde daha büyük değerler alır (Tablo 2.1). Bu, sınır tabakasının bu akım rejimindeki davranışı ile ilgilidir (ACHENBACH 1968, 1971, 1977);(GÜVEN ve diğ. 1975, 1979); (REED ve diğ. 1990);(SÜMER 1992); (AVCI ve diğ. 1996) .

Tablo 2.1. Transkritik akım rejiminde sürüklenme kuvveti katsayısının ($\bar{C}_D$) Reynolds sayısı ile değişimi

k_s/D Silindir Pürüzlülüğü	Transkritik akım rejiminde Reynolds sayısının sınırları	Transkritik akım rejiminde $\bar{C}_D$ 'nin değerleri
0	$Re > (3-4) \times 10^6$	0.7
0.75×10^{-3}	$Re > 9 \times 10^5$	1.0
3×10^{-3}	$Re > 5 \times 10^5$	1.2
9×10^{-3}	$Re > 3 \times 10^5$	1.2
9×10^{-3}	$Re > (1-2) \times 10^5$	1.3-1.4



Şekil 2.25. Kararlı akım ortamındaki silindirde değişik yüzey pürüzlülüklerinde sınır tabakasından ayrılma noktasının silindir üzerindeki açılma yeri, (ACHENBACH 1971).

2.3.3. Karalı bir akım ortamında yeralan silindire etkiyen kuvvetlerin çalkantı bileşeni

Karalı bir akım ortamında yer alan silindir üzerinde $Re > 40$ olduğu zaman iz bölgesindeki akımın zamana bağlı olarak değiştiği deneylerle belirlenmiştir (Bölüm 2.1). Buna bağlı olarak ortaya çıkan çalkantı kuvvetlerini oluşturan neden ise çevri kopmasıdır. Silindir yüzeyindeki basınç dağılımının periyodik olarak değişmesine yol açan çevri kopması olayı Bölüm 2.1'de açıklanmıştır. Çevri kopmasının etkisi ile silindire etkiyen kuvvetlerdeki periyodik değişim Şekil 2.15'de görülebilir. Bu şekilden, ortalaması sıfır olan kaldırma kuvvetinin çalkantı bileşeninin periyodunun, çevri kopması frekansına eşit olduğu görülmektedir ($f_v = 1/T_v$). Sürüklenme kuvvetinin

çalkantı bileşeninin frekansının ise, çevri kopması frekansının iki katı olduğu ($2f_v$) yine Şekil 2.15'den görülmektedir. Burada açıklanması gereken en önemli konu, kaldırma kuvveti çalkantı bileşeninin frekansı çevri kopması frekansına eşit iken, sürüklenme kuvveti çalkantı bileşeninin frekansının, çevri kopması frekansının iki katı olduğudur. Bunun en basit açıklaması, çevri kopması meydana gelirken, bu kopmanın silindirin hangi tarafında meydana geldiğinin sürüklenme kuvvetini ilgilendirmemesidir. Bu yüzden, çevri silindirin hangi tarafından koparsa kopsun, sürüklenme kuvvetindeki salınım, çevri kopmasındaki salınımın iki katıdır.

Aynı şekilde, Şekil 2.15'den görüleceği gibi, çalkantıların genliği sabit seviyede olmamakta, bir periyoddan diğerine genlik değişmekte hatta bazı periyodlarda ise çalkantı görülmemektedir. Bu yüzden, yapılan çalışmalarda istatistiki parametrelerin (r.m.s. gibi) kullanılması uygundur.

Silindiri etkileyen sürüklenme kuvvetinin (F_D) çalkantı bileşeni (F_D');

$$F_D' = \frac{1}{2} \rho C_D' DU^2 \quad (2.16)$$

ve kaldırma kuvvetinin (F_L) çalkantı bileşeni (F_L');

$$F_L' = \frac{1}{2} \rho C_L' DU^2 \quad (2.17)$$

şeklinde yazılabilir. Sürüklenme kuvveti çalkantı bileşeni;

$$F_D' = F_D - \bar{F}_D \quad (2.18)$$

şeklindedir. Burada F_D toplam sürüklenme kuvveti, F_D' sürüklenme kuvvetinin çalkantı bileşeni, $\bar{F}_D$ sürüklenme kuvvetinin ortalama değeridir.

Benzer şekilde kaldırma kuvvetinin çalkantı bileşeni (F_L');

$$F_L' = F_L - \bar{F}_L = F_L - 0 = F_L \quad (2.19)$$

şeklinde olur. Bu ifadede, F_L toplam kaldırma kuvvetini, $\bar{F}_L$ ortalama kaldırma kuvvetini göstermektedir ($\bar{F}_L$, Şekil 2.15'den de görüleceği gibi sıfırdır).

2.4. Katı Cidar Yakınındaki Bir Silindir Üzerindeki Kuvvetler

Mühendislik uygulamalarında, özellikle deniz yada akarsu tabanına yerleştirilmiş bir boru hattının dizaynında, katı cidar yakınındaki bir silindire gelen kuvvetlerin belirlenmesi önemlidir. Özellikle oyulabilir (hareketli) bir tabana yerleştirilen boru hattının altı zaman zaman küçük açıklıklarda oyulup, boru asılmış halde kalabilir. Genelde boru hatlarında bu açıklık $D = 0 \sim 0.1'$ den $D = 1'$ e kadar değişebilir. Bu yüzden başlangıçta deniz yada akarsu tabanına yerleştirilmiş boru hattına, değişik taban yakınlığı mesafelerinde etkiyecek kuvvetlerin belirlenmesi yapının güvenli tasarımında önemli rol oynar.

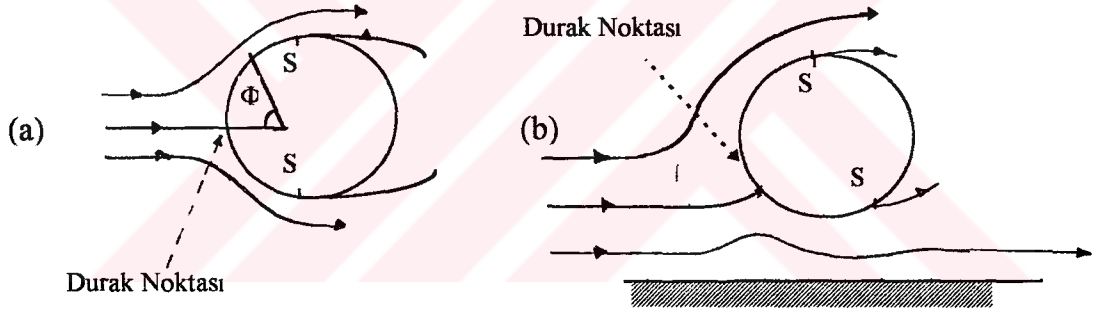
Silindir katı bir cidar yakınında yer aldığında, silindir etrafındaki akım yapısında bazı değişiklikler olur. Bu değişiklikler;

1. Taban ile silindir arasındaki açıklığın (e), silindir çapına (D) oranı (e/D), $0.3'$ ten küçük ise çevri kopması bastırılmış durumdadır (Bölüm 2.2.2.3).

2. Silindir tabana yaklaştığında, durak noktası silindirin alt kısmına ve tabana doğru kayar (Şekil 2.26). Bu durum silindir etrafındaki basınç dağılımı incelendiğinde daha rahat görülebilir (Şekil 2.27a-b-c). Bu şekilde, silindirin duvardan değişik üç uzaklıktaki durumu için silindir üzerindeki basınç dağılımları verilmiştir. $e/D = 1$ iken durak noktasının açısı (ϕ_D) = 0° iken, $e/D = 0.1$ olacak şekilde katı cidara yaklaştırıldığında durak noktası açısı (ϕ_D) -40° ye azalmakta ve tabana doğru kaymaktadır (Şekil 2.27b).

3. Silindirin taban yakınında olması durumunda ayrılma noktasının da yeri değişir. Silindirin tabandan uzak taraftaki ayrılma noktası tabanın etkisi ile daha yukarı doğru kayarken, silindirin taban tarafındaki ayrılma noktası ise aşağıya doğru (tabana doğru) hareket eder. Silindir tabandan bağımsız durumda ve taban yakınında iken durak noktasının ve ayrılma noktasının yerleri Şekil 2.26'da gösterilmiştir. Ayrılma noktalarında silindirin tabana yaklaşması ile meydana gelen değişim, ayrılma açısının değişimi belirlenerek, Şekil 2.28'de verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi, $e/D=0.1$ iken ayrılma açısı (ϕ_s), silindirin tabandan uzak kenarında $\cong 80^\circ$ olmakta, duvar tarafındaki ayrılma noktasının açısı ise (ϕ_s), $\cong 110^\circ$ olmaktadır. Şekilde Re sayısı, sabit ve 6×10^3 ' tür.

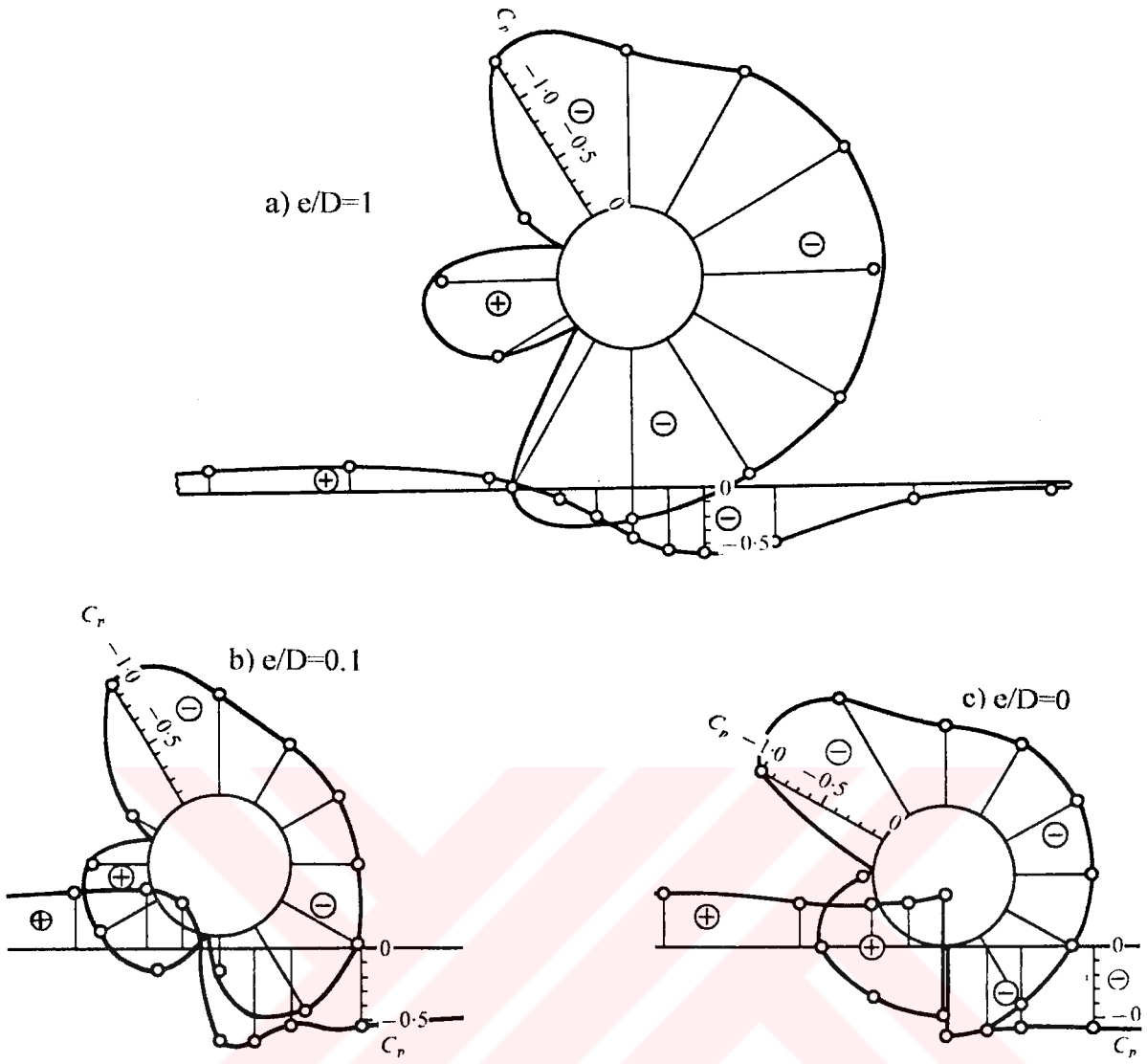
4. Silindirin duvardan uzak serbest kısmındaki emme (negatif basınç), duvar tarafındaki kısımdan daha büyük olmaktadır. Bu durum, Şekil 2.27b ve Şekil 2.27c'den görülebilmektedir. Silindir duvardan etkilenmeyecek kadar uzağa yerleştirilirse, bu etki yeniden simetrik hale dönüşür (Şekil 2.27a).



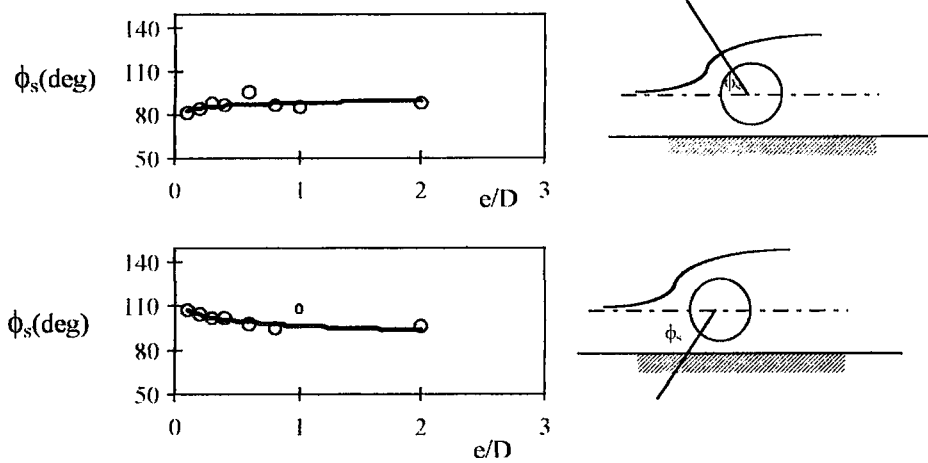
Şekil 2.26. Kararlı akım ortamında; a) cidardan bağımsız b) katı cidar yakınında durumdaki silindir üzerinde ayrılma noktasının yeri.

2.4.1. Duvar Yakınındaki Bir Silindire Etkiyen Sürüklenme Kuvveti

Daha önceki bölümden de görüleceği gibi, silindirin katı cidar yakınında yer alması silindir üzerindeki basınç dağılımını değiştirmektedir. Bu sebeple silindire etkiyen sürüklenme kuvveti de katı cidara yakınlığa bağlı olarak değişecektir. Şekil 2.29'da, deneysel olarak belirlenmiş ortalama sürüklenme kuvveti katsayılarının ($\bar{C}_D$),



Şekil 2.27. Duvar yakınında yer alan silindirde duvara değişik yakınlık durumlarına göre silindir üzerinde oluşacak basınç dağılımları, (BEARMAN ve ZDRAVKOVICH 1978).

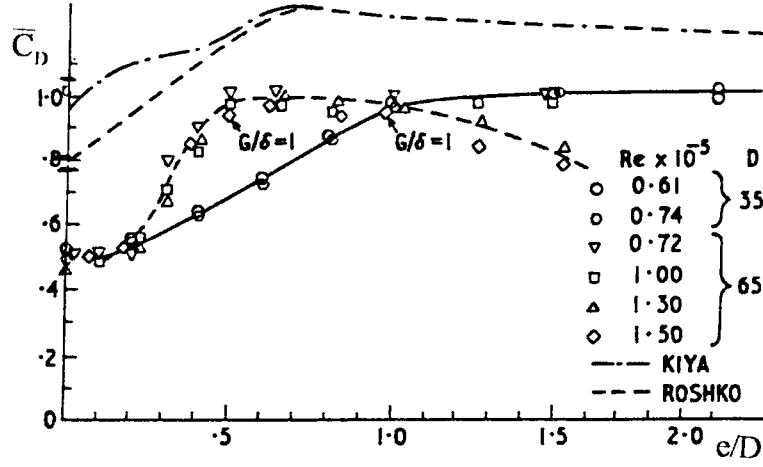


Şekil 2.28. Ayrılma açısının e/D ile değişimi, $Re=6 \times 10^3$ (JENSEN ve SÜMER 1986).

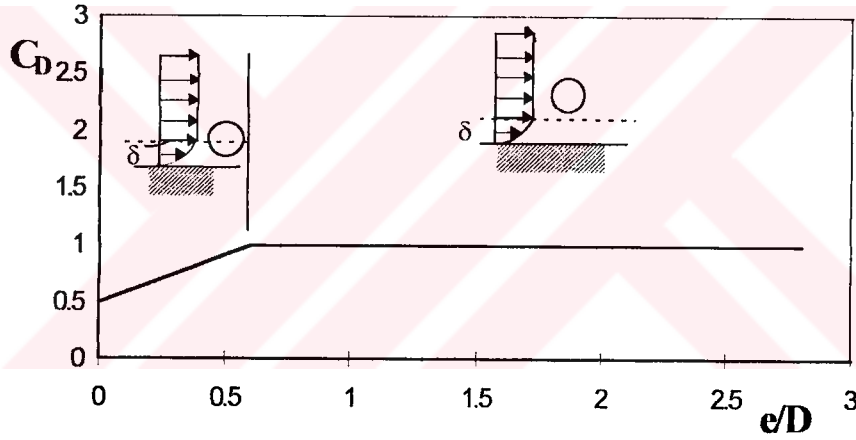
silindirin tabana olan yakınlığına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Burada ($\bar{C}_D$), (2.14) eşitliği kullanılarak belirlenmiştir.

Silindir katı cidara (tabana) yaklaştıkça, yani e/D oranı küçüldükçe ortalama sürüklenme kuvvet katsayısı da küçülmektedir. Bu özellik, Şekil 2.27'deki değişik e/D oranlarında silindir üzerindeki basınç dağılımları incelenerek gözlenebilir.

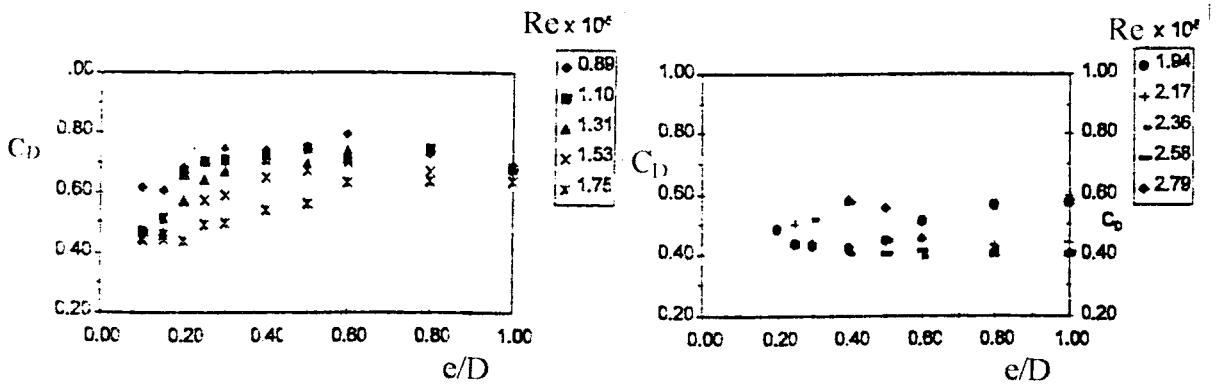
Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneyler $\bar{C}_D$ 'deki bu değişim üzerinde Re sayısının da etkisinin olabileceğini göstermiştir (ZDRAVKOVICH 1985). Bu değişimdeki en önemli nokta, şekilden de görüleceği gibi, e/D 'de belirli bir değere kadar olan artışa karşılık, $\bar{C}_D$ 'deki artış rutin bir şekilde olmaktadır. Belirli e/D değerinden sonra ise e/D 'nin artmasına karşılık, $\bar{C}_D$ sabit değerde kalmaktadır (Şekil 2.29 ve Şekil 2.30). Bu davranış ilk kez ZDRAVKOVICH tarafından belirlenmiş ve bunun nedeninin, silindiri etkileyen akımın sınır tabakasının kalınlığı olduğu gösterilmiştir. Silindir tabanda akımın oluşturduğu sınır tabakasının içinde kaldığı zaman, $\bar{C}_D$ düşük değerler almakta, sınır tabakasının dışında kaldığı zaman ise tabandan bağımsız, sonsuz karalı akım ortamında (potansiyel akım) bir silindirde belirlenen $\bar{C}_D$ değerleri görülmektedir (Şekil 2.29);(ZDRAVKOVICH 1985). Bu çalışmaya ait eğriler Şekil 2.29'da görülmektedir. Çalışmada, iki farklı sınır tabakası kalınlığı (δ) kullanılmış ve sınır tabakası kalınlığı silindir çapına oranlanarak (δ/D) boyutsuz hale getirilmiştir. Şekil 2.29'deki eğrilerde δ/D , 0.5 ve 1 değerindedir. Şekil 2.31'de alt kritik ve kritik akım koşullarında taban yakınındaki silindire ait sürüklenme katsayılarının e/D oranı ile değişimi görülmektedir (KALGHATGI ve SAYER 1997).



Şekil 2.29. Sürüklemeye kuvveti katsayısının e/D ile değişimi, (ZDRAVKOWICH 1985);(KIYA 1968);(ROSHKO ve diğ. 1975)



Şekil 2.30. Ortalama sürüklemeye kuvveti katsayısında ($\bar{C}_D$), katı cidar etkisi ile görülen değişim.



Şekil 2.31. Sürüklemeye kuvveti katsayısının e/D ile değişimi (KALGHATGI ve SAYER 1997).

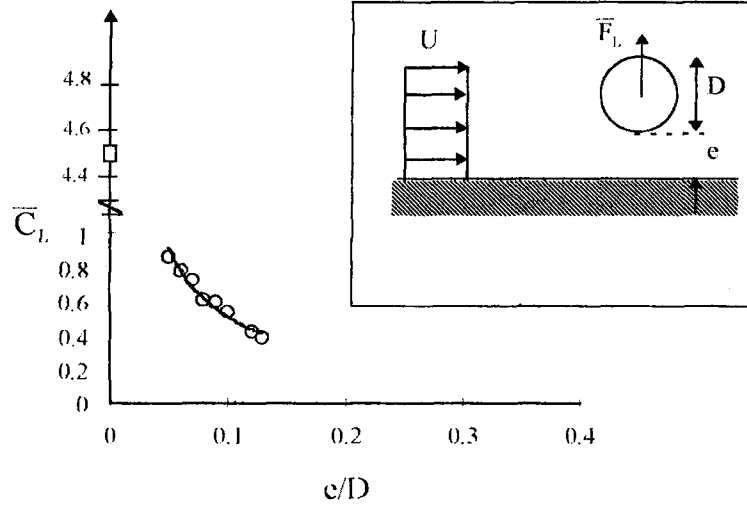
2.4.2. Duvar Yakınındaki Bir Silindire Etkiyen Kaldırma Kuvveti

Daha önceki bölümlerde, sonsuz bir kararlı akım ortamında yeralan silindire etkiyen akıma dik doğrultudaki kaldırma kuvvetinin ortalama değerinin sıfır olduğu ve bunun silindir etrafındaki akımın simetrisinden kaynaklandığı açıklanmıştır (Şekil 2.15). Fakat silindir katı bir cidara yaklaştığı zaman, silindir etrafındaki akımdaki bu simetri bozulur, bu yüzden silindire etkiyen kaldırma kuvvetinin ortalama değeri de sıfırdan farklı olur. Şekil 2.27'de ki katı cidar yakınında yeralan bir silindir üzerindeki basınç dağılımı incelenirse bu olay açıkça görülebilir. Bu şekilden görüleceği gibi, $e/D = 1$ değerinde basınç dağılımında, sonsuz akım ortamındaki silindirden pratik olarak bir fark görünmemekte, dolayısıyla kaldırma kuvvetinin ortalaması da yaklaşık olarak sıfır olmaktadır. Şekil 2.27'de $e/D = 0.1$ ve $e/D = 0$ değerleri incelendiğinde ise, silindir üzerindeki basınç dağılımında önemli değişiklik görülmekte ve bunun sonucunda kaldırma kuvvetinin ortalama değeri sıfırdan farklı olmaktadır. Basınç dağılımından da görüleceği gibi kaldırma kuvvetinin yönü duvardan yukarı doğrudur.

Kaldırma kuvvetinin, silindirin katı cidara yakınlığı ile değişimi Şekil 2.32'de görülmektedir. Bu şekil FREDSE (1985)' in yaptığı deneysel çalışmalar ile FREDSE ve HENSEN (1987)' in potansiyel akım kabulü ile yaptığı hesaplar baz alınarak oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada sakın su içerisindeki bir tablaya (katı cidar), silindir değişik açıklıklarda yerleştirilmiş ve katı cidar ile birlikte hareket ettirilerek silindir üzerindeki kaldırma kuvveti bulunmuştur. Burada katı cidarla silindir sakın su ortamı içerisinde birlikte hareket ettirilerek üniform hız dağılımı ile üniform akım sağlanmış ve böylece taban yakınında hızdaki değişim engellenmiştir. Bunun sebebi, potansiyel akım kabulü ile çözüm yapmaktadır. Şekilde, ortalama kaldırma kuvveti sabiti ($\bar{C}_L$);

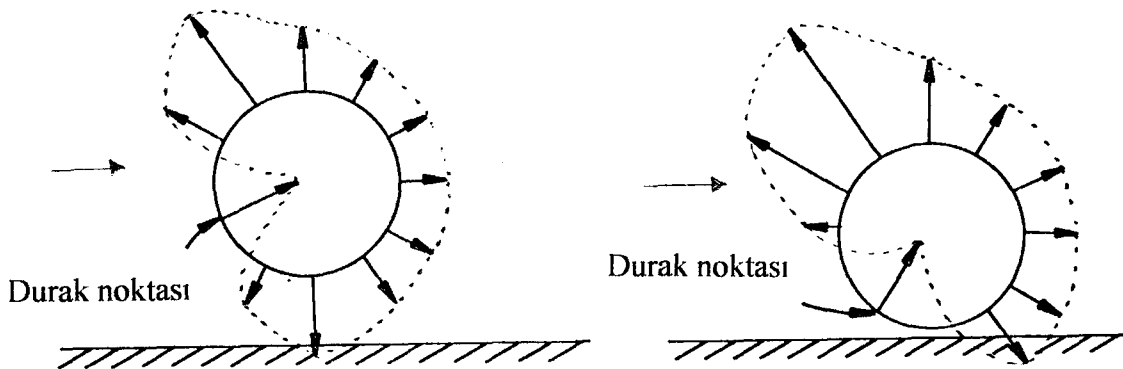
$$\bar{F}_L = \frac{1}{2} \rho \bar{C}_L D U^2 \quad (2.20)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. İfadede, ($\bar{F}_L$) silindire etkiyen ortalama kaldırma kuvvetidir.



Şekil 2.32. Üniform bir akım ortamında taban yakınındaki bir silindire etkiyen kaldırma kuvveti, ($10^4 < Re < 3 \times 10^4$); (FREDSE 1985)

Şekil 2.32'den görüldüğü gibi, $e/D = 0.2 \sim 0.3$ gibi oldukça küçük değerlerde kaldırma kuvveti önemsenmeyecek derecede küçüktür. Silindir katı cidara bu değerden daha fazla yaklaştığında, yani e/D küçüldüğünde kaldırma kuvveti de büyük bir hızla artar. Bunun ilk sebebi, silindir katı cidara yaklaştığında durak noktasının katı cidara doğru hareket etmesi ve yaklaşmasıdır (Şekil 2.33); diğer neden ise silindirin tabana uzak yüzeyindeki (akımla ilişkide bulunan yüzey) negatif basınçların (emme) çok büyük olması ve bunun silindirin tabana yaklaşması ile artmasıdır. Bu nedenlerden dolayı silindir üzerinde silindiri tabandan kaldırmaya çalışan önemli bir kuvvet oluşur.



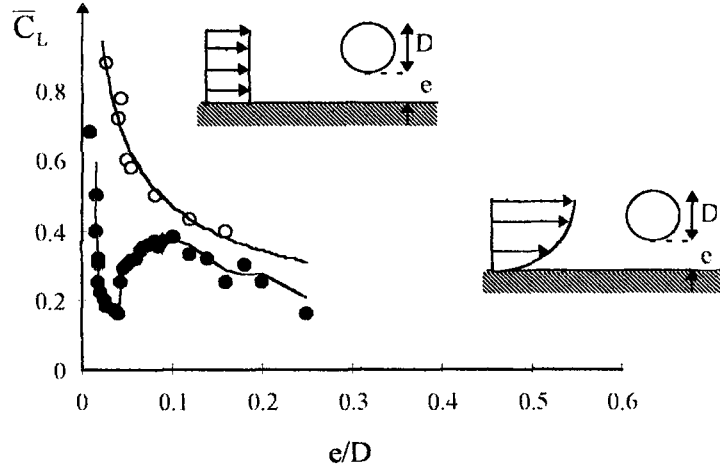
Şekil 2.33. Silindirin tabana yaklaşması durumunda durak noktasının yer değiştirmesi

Şekil 2.32'de potansiyel akım kabülü ile yapılan hesaplamalar ile $\bar{C}_L$ ' in e/D ile değişimi verilmiştir. VON MÜLLER (1929), çalışmasında tabana oturan ($e/D = 0$) bir silindir için kaldırma kuvvetini (F_L);

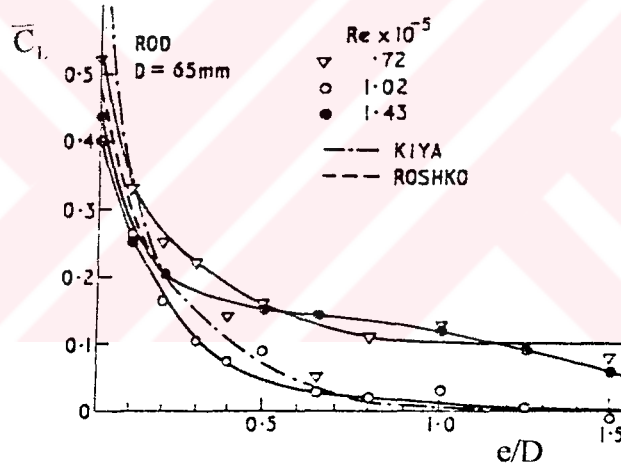
$$F_L = \rho U^2 D \pi (\pi^2 + 3) / 18 \quad (2.21)$$

olarak ifade etmiştir. Bu ifadeden $\bar{C}_L$ hesaplandığında değerinin $\bar{C}_L = 4.4$ olduğu görülmektedir. Bu da Şekil 2.32'deki eğri ile oldukça iyi uyuşmaktadır. Silindirin tabana çok yakın yerleştirildiği durumlarda, potansiyel akım çözümü negatif değerler verir (YAMAMOTO ve diğ. 1974). FREDSE ve HENSEN (1987), potansiyel akım kabülü ile yapılan bu çözümü silindir etrafındaki çevrinin de etkisini gözönüne alarak tekrar iyileştirmişlerdir. Yine FREDSE ve diğ. (1985)'in yaptıkları deneysel çalışma ile bu iyileştirilmiş potansiyel akım kabülü ile yapılan hesaplamaların sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların oldukça iyi olduğu Şekil 2.32'den görülmektedir.

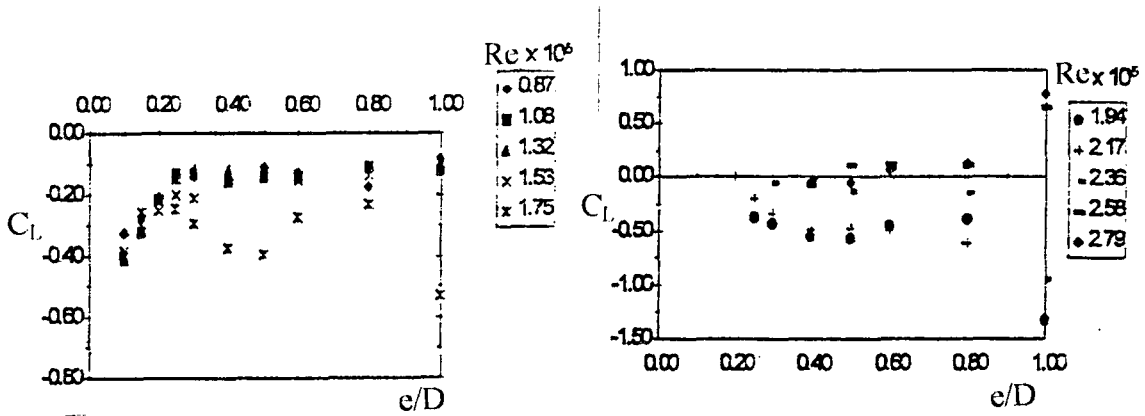
Kararlı akım ortamında tabana oturan silindir çevresindeki akımın tabanla etkileşmesi sonucunda, taban yakınında silindirin de içinde bulunduğu bölgede akım üniform olmamaktadır. Tabana yakın durumdaki bir silindire gelen ortalama kaldırma kuvveti katsayısının ($\bar{C}_L$), e/D ile değişimi, değişik araştırmacılar tarafından Şekil 2.34, Şekil 2.35 ve Şekil 2.36'da ki gibi verilmektedir. Çalışmalarda tanımlanan $\bar{C}_L$, (2.20) denkleminde, hız bileşeni U 'nun yerine silindirin eksenindeki hız (U_a) konularak hesaplanmıştır. Şekil 2.34'de görülen hızın üniform olmadığı duruma ait deney sonuçlarında, pratik olarak aynı Re sayısı ve silindir çapı hedef alınmıştır. Bu çalışmada seçilen Re sayısı ve D çapı üniform hız dağılımının olduğu Şekil 2.32'deki, çap ve Re sayılarına uygundur. Bu iki durum arasındaki fark; ilkinde silindir hareket eden bir mekanizma üzerinde cidara değişik açıklıklarda (e/D oranlarında) yerleştirilip cidarla birlikte sakin su içerisinde hareket ettirilirken, ikincisinde silindir kararlı akım olan bir açık kanalın tabanına yerleştirilmiş ve kaldırma kuvvetinin bu silindir üzerinde ölçülmüş olmasıdır. Her iki durumda da taban pürüzsüzdür.



Şekil 2.34. Hız dağılımının üniform olduğu ve hız dağılımının katı cidardan etkilendiği durumlarda $\bar{C}_L$ 'nin e/D ile değişimi
 $10^3 < Re < 3 \times 10^4$, $\delta/D = 5$, (FREDSE ve diğ. 1985).



Şekil 2.35. $\bar{C}_L$ 'nin e/D ile değişimi (ZDRAVKOVICH 1985);(KIYA 1968);
 (ROSHKO ve diğ. 1975)



Şekil 2.36. $\bar{C}_L$ 'nin e/D ile değişimi (KALGHATGI ve SAYER 1997)

Hız dağılımının üniform olduğu ve hız dağılımının katı cidar etkisi ile üniform olmadığı durumların $\bar{C}_L$ 'de meydana getireceği fark Şekil 2.34'de görülmektedir. Çok küçük e/D oranlarında $\bar{C}_L$ 'nin değerinde, tabandan etkilenen üniform olmayan hız dağılımına sahip akımda üniform akım durumuna göre önemli bir düşüş görülmektedir (Şekil 2.34). Bu değişimin nedeni FREDSE ve HENSEN (1987)'in yaptıkları çalışmada açıklanmıştır.

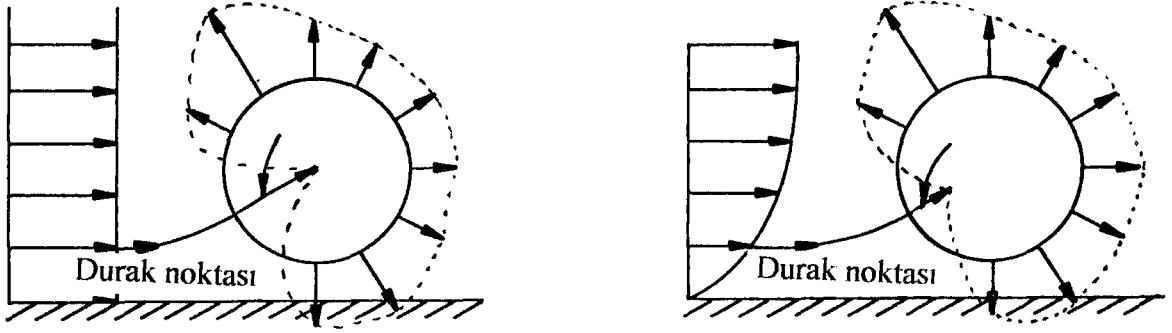
Akımın üniform olmaması nedeni ile meydana gelen değişim sonucunda , durak noktasının yeri, akımın üniform olduğu duruma göre belirgin bir değişiklik göstermemektedir. Bu yüzden akım üzerindeki basınç dağılımının yönlerinde de önemli değişiklik olmamaktadır. Burada göze çarpan en önemli fark, durak noktasındaki basıncın değerinin değişmesidir (Şekil 2.37). Durak noktasındaki basınç, üniform hız dağılımının meydana geldiği akımda;

$$p = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2.22)$$

iken, aynı noktadaki basınç, cidar etkisi ile hızdaki değişim nedeni ile;

$$p = \frac{1}{2} \rho U_s^2 \quad (2.23)$$

değerini almaktadır. Burada U_s durak noktası seviyesindeki hız değeridir. Şekil 2.37'den de izleneceği gibi (2.23) denkleminde hesaplanan p değeri (2.22) denklemindekinden hesaplanandan küçük olacaktır.



Şekil 2.37. Hız dağılımının üniform olduğu ve hız dağılımının katı cidar etkisi ile üniform olmadığı durumlarda durak noktasındaki basıncın karşılaştırılması.

Üniform olmayan akım durumunda silindir tabana daha da yaklaştırılırsa, yani e/D' nin çok çok küçük değerleri alırsa, silindir ile taban arasındaki bu çok küçük açıklıktan akışkan parçacıklarının silindirin arka tarafına geçişi duracaktır. Bu durumda silindirin arka tarafında basınç değeri düşecek, yani silindir yüzeyinde emme meydana gelecektir (Şekil 2.27c). Bu nedenle $\bar{C}_l$ 'nin değeri çok küçük e/D değerlerinde ($e/D \leq 0.03$ gibi) tekrar artacaktır. Burum Şekil 2.34'den de izlenebilir. Şekil 2.35'de değişik Re sayılarında, e/D ile $\bar{C}_l$ 'nin değişimi görülmektedir (THOMSCHKE 1971). Bu çalışmada da, Şekil 2.34'deki çalışmada belirlenen $\bar{C}_l$ değerleriyle aynı davranış görülmektedir (SÜMER ve FREDSE 1997).

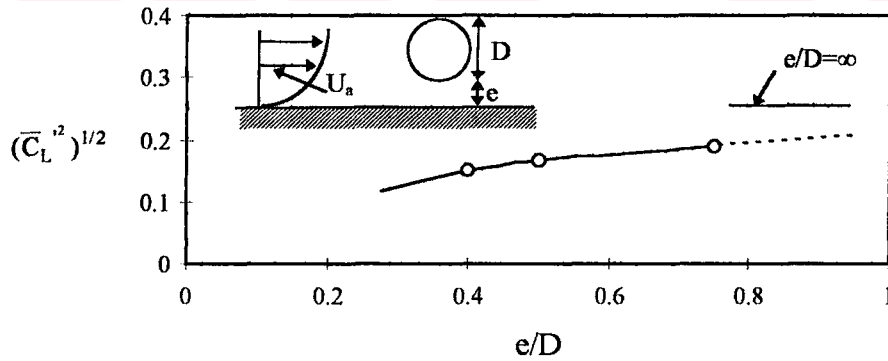
2.4.3. Katı Cidar Yakınındaki Silindire Etkiyen Kaldırma Kuvvetinin Çalkantı Bileşeni

Katı cidar yakınında yeralan bir silindirde e/D oranı 0.3'ten küçük olduğu zaman çevri kopmasının bastırıldığı, tabandan yeterince uzakta olan silindirde ise kaldırma ve sürüklenme kuvvetinde görülen çevri uyarımlı periyodik değişimin tabandan etkilendiği daha önce Bölüm 2.2.2.3'de anlatılmıştı.

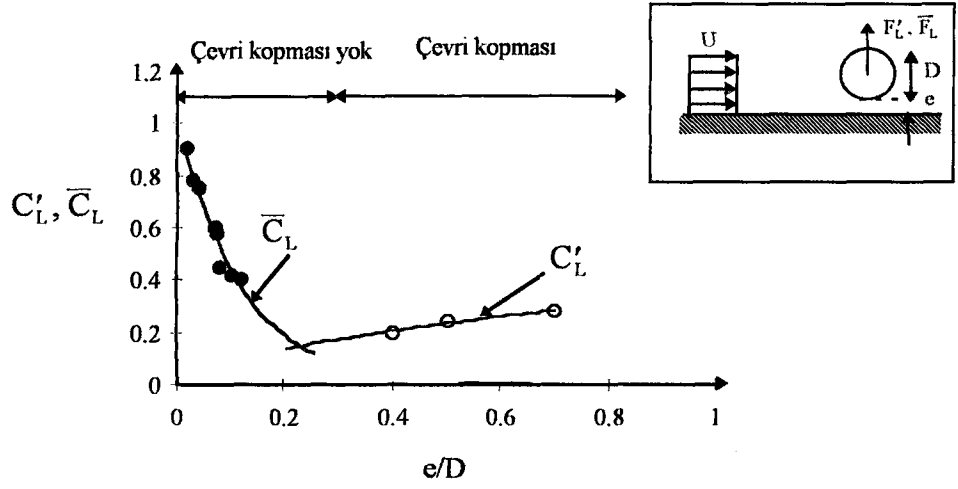
e/D' nin 0.3'ten büyük değerlerinde çevri kopması oluşmasına rağmen, bundan daha büyük değerlerinde de ($0.3 < e/D < 1$) silindir üzerindeki kuvvetlerin çalkantı bileşeninde duvarın etkisi görülür. e/D' nin yaklaşık 1 değerinden sonra ise daha

önceki bölümlerde görülen sonsuz akım durumundaki silindir durumuna dönüşür. Şekil 2.38'de, silindire etkiyen kaldırma kuvvetinin çalkantı bileşeninin karesel ortalama değerinin e/D ile değişimi görülmektedir. e/D azaldığında, yani silindir tabana yaklaştığında, kaldırma kuvvetinin çalkantı bileşeni (C'_L) buna bağlı olarak zayıflamaktadır. Buradan C'_L 'nin hesabında yine (2.17) denklemi kullanılmış, ancak denklemdeki U akım hızı için, hızın tabandan etkilenmesi nedeni ile silindir eksenindeki hız değeri (U_a) kullanılmıştır.

Sonuç olarak, Şekil 2.39'da çevri kopması uyarımlı salınlı kaldırma kuvvetinin, katı cidar etkisinde ortalama kaldırma kuvveti ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde, çevri etkisinde meydana gelen kaldırma kuvveti katsayısı C_L ile gösterilmiş ve C_L değeri olarak kaldırma kuvvetinin maksimum değerine karşı gelen kuvvet katsayısı alınmıştır. Şekilden görüldüğü gibi, $e/D = 0.3$ değerinde çevri etkisi ile oluşan kaldırma kuvvetinin maksimum değeri ile duvar etkisi ile silindir üzerinde meydana gelen kaldırma kuvvetinin ortalama değeri yaklaşık aynı değerde olmaktadır. e/D 'nin değeri azaltılırsa katı cidar etkisi ile silindirde oluşan kaldırma kuvveti artar. e/D 0.3'ten daha büyük değerler aldığı anda (0.4 ~ 0.5) bu iki etki (katı cidar etkisi ve çevri kopması) birlikte gözönüne alınabilir.



Şekil 2.38. Kaldırma kuvveti çalkantı bileşeninin karesel ortalama değerinin e/D ile değişimi (JENSEN ve diğ. 1990);(SCHEWE 1983).



Şekil 2.39. Ortalama kaldırma kuvveti katsayısı ($\bar{C}_L$) ve kaldırma kuvveti çalkantı bileşeni (C'_L)'nin e/D ile değişimi (C_L salınımlı kaldırma kuvvetinin maksimum değeri baz alınarak hesaplanmıştır).

BÖLÜM 3

DALGA ETKİSİ ALTINDA, SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIM VE SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ KUVVETLER

3.1 SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIM REJİMLERİ

Kararlı akım ortamında yer alan bir silindir etrafındaki hidrodinamik büyüklüklerin değişiminin Reynolds sayısına bağlı olduğu daha önceki bölümde belirtilmişti. Eğer silindir, dalga hareketi gibi bir salınımlı hareket etkisi altında kalırsa bu hidrodinamik büyüklükler sadece Reynolds sayısının (Re) değişimine bağlı olmaz, Keulegan-Carpenter sayısının (KC) değişimine de bağlı olur. Salınımlı hareketin gözlemlendiği bir akım ortamında Keulegan-Carpenter sayısı (KC) şu şekilde tanımlanır:

$$KC = \frac{U_m T_\omega}{D} \quad (3.1)$$

Burada U_m , salınımlı hareketle (oscillatory flow) oluşacak maksimum hız, T_ω ; salınımlı hareketin hakim periyodu, D ise silindirin çapıdır. Eğer akım sinüsoidal ise herhangi bir andaki hız,

$$U(t) = U_m \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

olur. Sinüsoidal akım için maksimum hız (U_m),

$$U_m = a \omega = \frac{2\pi a}{T_\omega} \quad (3.3)$$

olarak belirlenir. Burada a ; salınımlı hareketin genliği, ω ; hareketin açısal frekansıdır. Açısal frekans (ω);

$$\omega = 2\pi f_{\omega} = \frac{2\pi}{T_{\omega}} \quad (3.4)$$

sekinde ifade edilir. Burada f_{ω} ; salınımlı hareketin frekansdır. Sinüsoidal hareket durumunda Keulegan-Carpenter sayısı aşağıdaki şekle dönüşür;

$$KC = \frac{2\pi a}{D} \quad (3.5)$$

Keulegan-Carpenter sayısının fiziksel anlamı, (3.5) nolu denklem göz önüne alınarak kolayca açıklanabilir. Buna göre ifadenin sağ tarafı yani KC ile doğru orantılı olan kısmı, hareketin etkidiği genliği, ters orantılı olan D ise silindirin akımı etkileyen boyutunu ifade eder. Buradan da görüleceği gibi KC'nin küçük değerlerinde akışkan parçacıklarının hareketi silindir üzerinde yeterince büyük değildir. Hareket silindir üzerinde tam olarak gelişmez. Bu yüzden KC'nin küçük değerlerinde ayrılma görülmeyebilir.

Büyük KC değerlerinde ise, silindirin akımı etkileyen boyutuna göre akışkan parçacıklarının rölatif hareketi yeter derecede büyüktür. Bunun sonucunda ayrılma oluşmakta ve KC'nin yeterince büyük değerlerinde çevri kopması (vortex shedding) mümkün olabilmektedir. KC'nin çok büyük değerlerinde ($KC \rightarrow \infty$), salınımlı hareketin her yarı periyodunda hareket, kararlı akımdaki karakteristiklere bürünmektedir.

3.2. KEULEGAN-CARPENTER SAYISININ FONKSİYONU OLARAK AKIM REJİMLERİ

Keulegan-Carpenter sayısındaki artış ile akım rejimlerinde görülen değişimler Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu şekilde Re sayısının değeri 10^3 'tür. Burada Re sayısı;

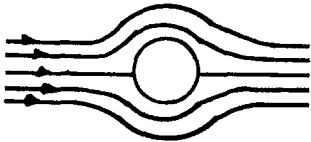
$$Re = \frac{D U_m}{\nu} \quad (3.6)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Reynolds sayısındaki değişimler, Şekil 3.1'de gösterilen rejimlerde verilen sınır KC değerleri üzerinde etkili olur. Salınlı akımda Re sayısının etkisi daha sonraki bölümlerde tekrar ele alınacağından, burada öncelikle akım rejimlerinin KC sayısı ile değişimi incelenecektir.

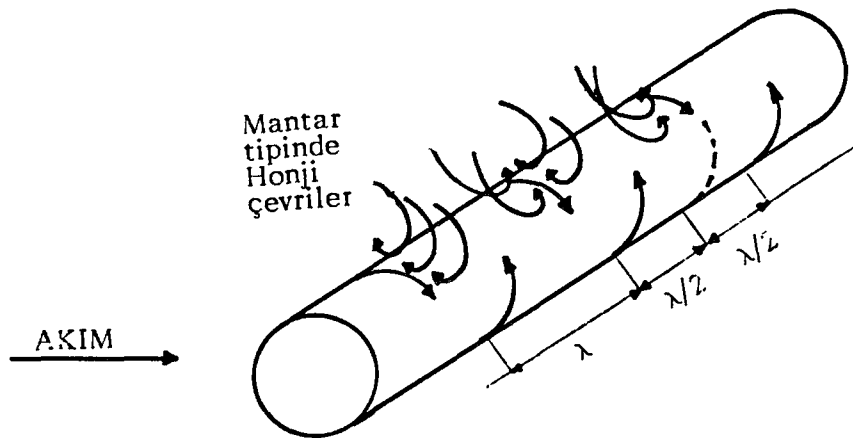
KC sayısının küçük değerlerinde akımda ayrılma görülmez. Akım silindirin üzerinden kayarak (yüzeyi yalayarak) geçer (Şekil 3.1.a). Ayrılma, ilk olarak $KC \approx 1.1$ değerine ulaştığında görülmeye başlar. Bu ayrılmaya Honji kararsızlığı denir (Şekil 3.1.b). Akım koşulları bu değere ulaştığında ($KC \approx 1.1$) silindir üzerinde akım iki boyutludan üç boyutlu hale geçer. Bu geçiş, akım izleme teknikleri ile gözlenebilir (HONJI 1981); (SARPKAYA 1986a). Yarım periyottaki hareketin sonucunda, geriye doğru hareket başladığında bunun bir önceki periyottaki akımla etkisi sonucunda mantar şeklinde üç boyutlu ayrılmalar ve çevriler görülür (Şekil 3.2). Oluşan bu çevriler akıma dik doğrultudadır.

Ayrılmanın Honji kararsızlığı şeklinde görüldüğü akım rejimi, $1.1 < KC < 1.6$ arasındaki dar bir aralıktadır (Şekil 3.1.b). KC sayısındaki artış ile akım rejimi değişir ve Şekil 3.1c ve 3.1d'de görüldüğü gibi $1.6 < KC < 4$ aralığında bir çift simetrik sabit çevri görülür. Bunun $2.1 < KC < 4$ alt aralığında silindir üzerinde türbülans oluşur. Burada sözü edilen akım rejimlerine ait alt ve üst KC limitleri, $Re = 10^3$ değerine aittir.

KC sayısının daha da artması ile birlikte simetrik iki çevri arasındaki simetriklik bozulur (Burada çevriler sabittir, yani kopup akım içerisinde hareket etmezler). Bu rejimin en önemli özelliği, KC'nin daha küçük değerlerinde görülmeyen akıma dik doğrultudaki kaldırma kuvvetinin, çevriler arasındaki asimetri sonucunda sıfırdan farklı değerler almasıdır. Bu akım rejimi $4 < KC < 7$ aralığında görülür.

a)		Ayrılma yok	$KC < 1.1$
b)		Honji çevrileri ile ayrılma	$1.1 < KC < 1.6$
c)		Simetrik çevri çifti	$1.6 < KC < 2.1$
d)		Simetrik çevri çifti Silindir üzerinde türbülans	$2.1 < KC < 4$
e)		Asimetrik vorteks çifti	$4 < KC < 7$
f)		Çevri kopması	$7 < KC$

Şekil 3.1. Yüzeyi cilalı (pürüzsüz) bir silindir etrafında oluşan akım rejimleri ($Re=10^4$), (SARPKAYA 1986a);(WILLIAMSON 1985).



Şekil 3.2. Mantar tipli Honji çevrileri

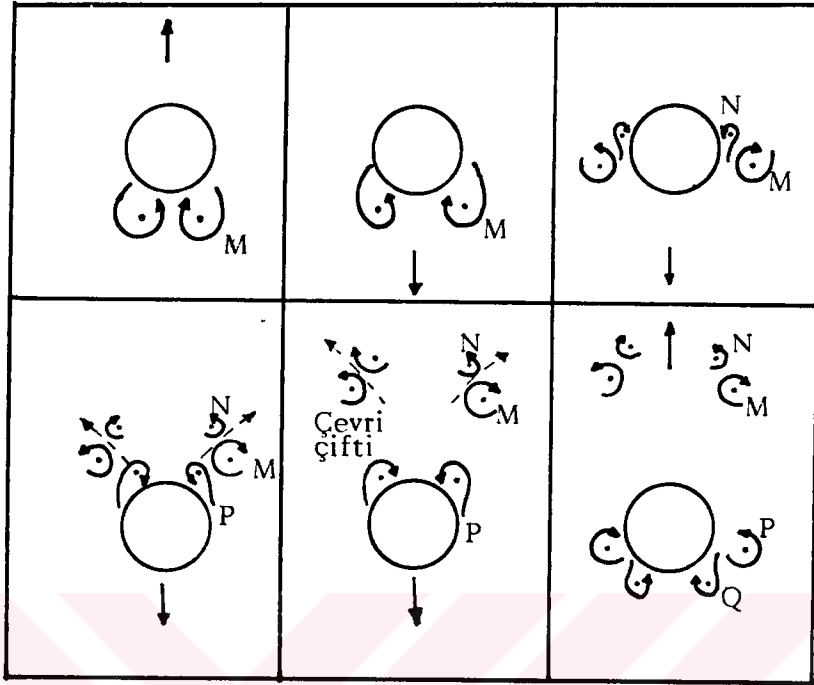
Bu olayı daha iyi açıklayabilmek için aşağıdaki örneği inceleyebiliriz. Şekil 3.3'de bir çift simetrik çevrinin görüldüğü akım rejiminde ($1.6 < KC < 4$) meydana gelen çevri hareketinin zamanla değişimi gösterilmiştir. Şekilde, salınlı hareket, sakin su içerisinde silindir hareket ettirilerek sağlanmıştır. Şekil üzerindeki oklar silindirin hareket yönünü göstermektedir. Silindir harekete başladığında ilk periyotta, iz bölgesinde silindirin hareketine ters yönde bir çift sabit çevri oluşur (Çevri M) (Şekil 3.3a). İlk yarı periyot bittiğinde silindir ters yönde harekete başlar (Şekil 3.3b). Çevri M ile silindir hareketi arasındaki etkileşim sonucunda yeni bir çevri meydana gelir (Çevri N). Bu yeni oluşan çevri (N), M çevrisinin yarattığı hız alanı ile silindir hareketine zıt yönde hareket eder (Şekil 3c,d). Silindir ikinci yarı periyotta hareket ederken sabit çevri çifti de oluşmaya başlar (Çevri P) (Şekil 3.3d,e.) aynı olay, silindir tekrar 1. yarı periyottaki yönde harekete başladığında, ters yönde meydana gelir (Şekil 3.3f).

Burada oklar, silindirin hareket yönünü göstermekte olup, çevriler, sabit bir kamera yardımıyla izlenmiştir.

3.2.1. Çevri Kopması Rejimleri

Çevri kopması rejimleri birçok araştırmacı tarafından oldukça geniş ve ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu konudaki çalışmalara; BEARMAN ve diğ. (1979), SINGH (1979), GRASS ve KEMP (1979), BEARMAN ve GRAHAM (1979), BEARMAN ve diğ. (1981) ve WILLIAMSON (1985) örnek olarak gösterilebilir. Özellikle WILLIAMSON'ın yaptığı çalışmalar, oldukça karmaşık yapıya sahip çevri hareketinin fiziksel yapısının açıklanmasında sistematik bir sunuş sağlama açısından önemlidir.

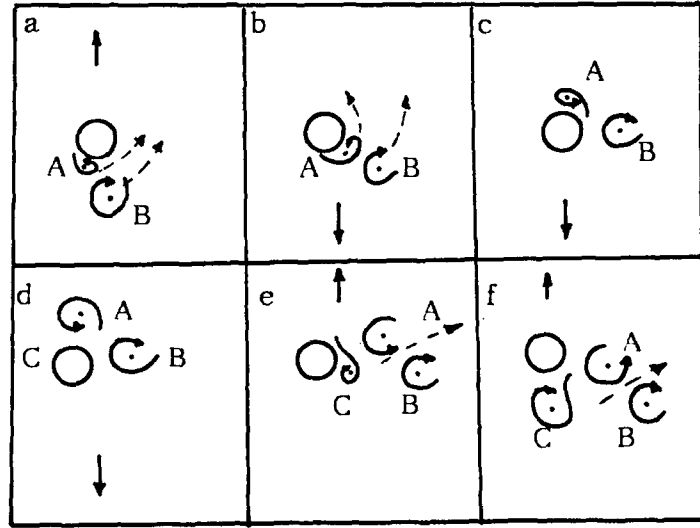
Çevri kopması rejimlerinin genel özelliği, salınlı akımın her bir periyodunda görülmesidir. KC sayısının değişimi ile, birkaç farklı rejimde çevri kopması farklı özelliklerde görülebilir. Bu rejimlere ait KC sayısı sınırları $7 < KC < 15$, $15 < KC < 24$, $24 < KC < 32$ ve $32 < KC < 40$ olarak verilebilir.



Şekil 3.3. $1.6 < KC < 4$ ve $Re = 1000$ değerleri için "sabit ve simetrik çevrili durumda" akım rejimlerinin oluşumu (WILLIAMSON 1985).

3.2.2. Tek Çevri Çiftinin Meydana Geldiği Çevri Kopması Rejimi ($7 < KC < 15$)

Bu rejimi $7 < KC < 13$ ve $13 < KC < 15$ olmak üzere iki alt grupta incelemek uygun olur. İlk alt kısım ($7 < KC < 13$), çapraz çevri caddesi rejimi olarak bilinir. Şekil 3.4'te, bu durumda çevri hareketinin zamanla değişimi görülmektedir. Şekil 3.4a' da, B çevrisinin henüz koptuğu ve silindirin diğer yüzünde A çevrisinin gelişmekte olduğu görülmektedir. Silindir, ilk yarı periyodundaki hareketini tamamlayıp ters yönde harekete başladığında iki çevri silindiri yalayarak arka tarafa geçerler (Şekil 3.4b, c). Yarım periyod sonucunda gelişmiş A çevrisi koparak serbest bir çevri olur ve B çevrisi ile bir çevri çifti oluştururlar (Şekil 3.4d). A-B çevri çifti kendi hız alanları etkisi ile silindirden uzaklaşırlar.

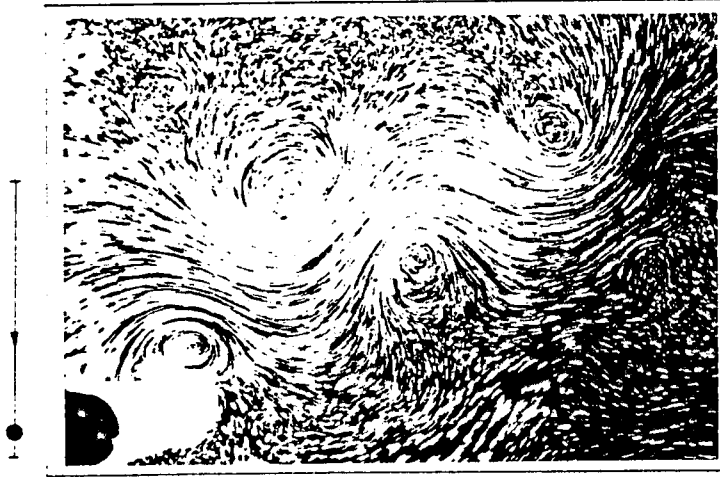


Şekil 3.4. Tek çevri çiftinin meydana geldiği akım rejimi ($7 < KC < 13$)
(oklar silindirin hareket yönünü göstermektedir).

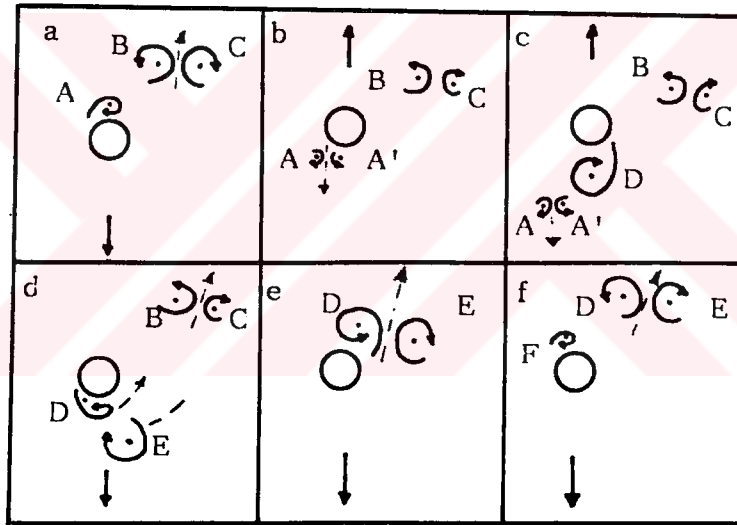
Çevri çifti, ters dönme yönlerine sahip iki çevrinin bir araya gelmesi ve her birinin diğerinin hız alanının etkisi altında hareket ettiği durumdur. Hareketin tam periyodu tamamlandığında silindirden bir çevri çiftinin uzaklaştığı görülmektedir.

Silindire akıma dik doğrultuda etkiyen kaldırma kuvveti bakımından çevri caddesinin silindire göre yeri önemlidir. Çevrilerin simetrisizliğinden dolayı bu akım rejiminde kaldırma kuvveti sıfırdan farklı bir değer alır. Çevri caddesinin yön değiştirmesi ile kaldırma kuvvetinin yönü de değişir. Bu duruma ait deney görüntüleri Şekil 3.5'de görülmektedir. Bu şekilde silindir, iz bölgesine göre 90° lik açıyla hareket ettirilmektedir.

Tek çevri çiftinin meydana geldiği akım rejiminin diğer alt aralığında da ($13 < KC < 15$) aynı şekilde çevriler oluşur. Fakat çevriler silindirden 45° lik açı ile uzaklaşır. Bu durumda sadece silindirin bir tarafında iz bölgesi oluşur (Şekil 3.6a,b,c,d,e).



Şekil 3.5. Çapraz iz bölgesi ($KC=12$) (WILLIAMSON 1985).

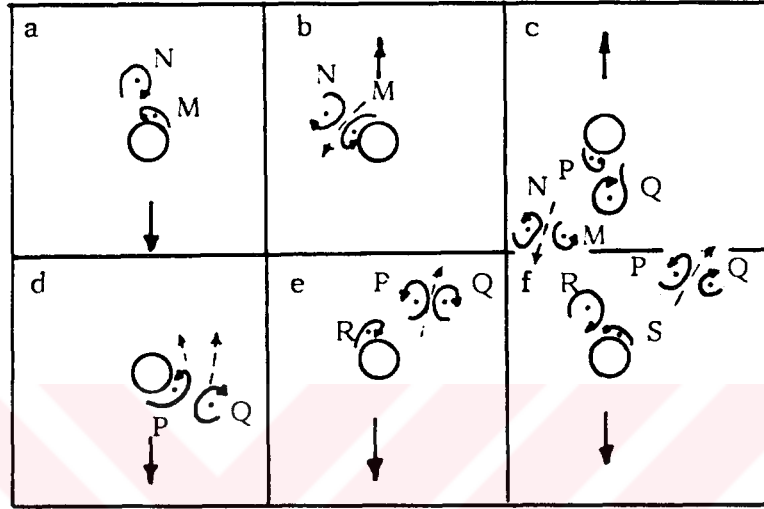


Şekil 3.6. Tek çevri çiftinin meydana geldiği akım rejimi ($13 < KC < 15$).

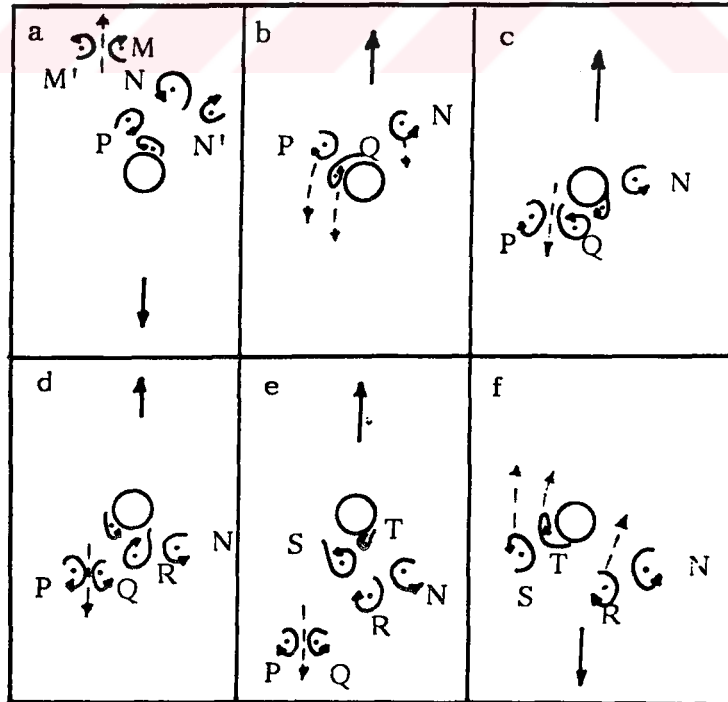
3.2.3. İki Veya Daha Fazla Çevri Çiftinin Oluştugu Rejim

Çevri hareketinin zaman içindeki oluşumu, $15 < KC < 24$ aralığı için Şekil 3.7'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi, bu aralıkta akımın her yarım periyodunda iz bölgesinde oluşan çevriler silindirin hareketine zıt yönde ve iz bölgesi içinde hareket ederek silindirden uzaklaşırlar (Örnek olarak M ve N çevrileri alınabilir).

Şekil 3.7'de, $15 < KC < 24$ aralığında silindirden iki çevri çifti ayrılırken, $27 < KC < 32$ aralığında aynı fiziksel özellikler gösteren üç çevri çifti silindirden ayrılıp iz bölgesine doğru hareket eder (Şekil 3.8). KC sayısı daha da artarsa, bu artış silindirden ayrılan çevri çifti sayısını artırır. Örneğin $32 < KC < 40$ aralığında çevri çifti sayısı 3, $40 < KC < 48$ aralığı için 5'tir



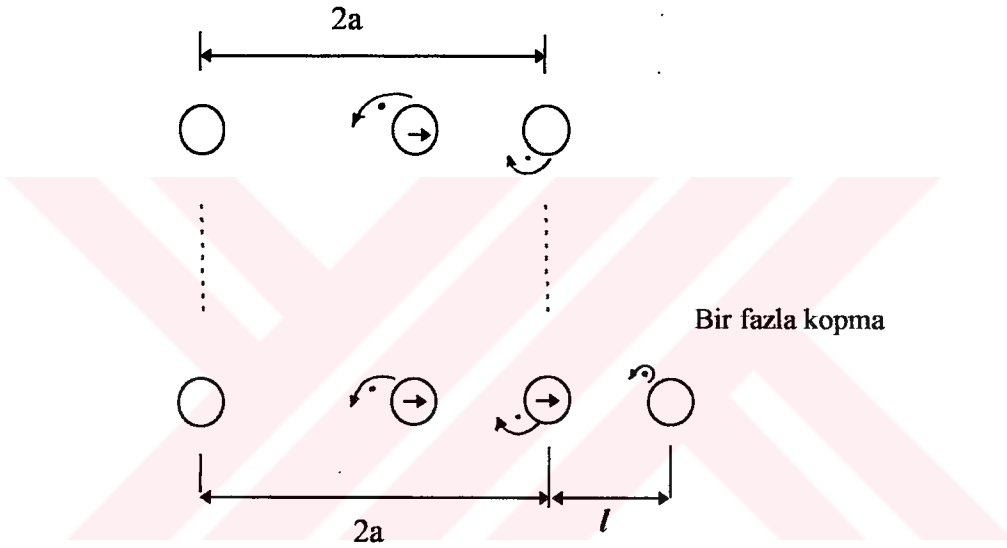
Şekil 3.7. $15 < KC < 24$ bölgesinde oluşan çevrilerin zamanla değişimi



Şekil 3.8. $24 < KC < 32$ bölgesinde oluşan çevrilerin zamanla değişimi

Bu sonuçlara göre bir tam periyot boyunca KC'nin bir üst aralığındaki çevri ayrılması, bir alt rejimdeki çevri ayrılmasından iki çevri fazladır. Bu sonuç Strouhal kanunun salınımlı akımlardaki uygulamasıyla açıklanabilir.

Strouhal kanununun açıklaması: Sinüzoidal akımlar için KC katsayısının ifadesi (3.5)'de verilmişti. KC sayısını $\Delta(KC)=8$ kadar arttırdığımızı düşünelim. KC katsayısındaki bu artışa karşılık tam bir periyotta iki çevri kopması oluşur (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Çevri kopması rejimlerinde salınımlı hareketin genliğinin artmasının çevri sayısına etkisi

Bu yeni durumda KC sayısı;

$$KC + \Delta KC = \frac{(2a + l)\pi}{D} \quad (3.7)$$

olur. Burada, l uzunluğu, salınımlı hareketin genliğindeki artıştır. Denklem (3.5) ve (3.7)'den;

$$l = \frac{8}{\pi} D \quad (3.8)$$

olarak elde edilir. $\Delta(KC)=8$ 'lik bir artışta salınımlı hareketin yarı periyodunda, bir çevrilik bir artış olacağı daha önce gösterilmişti. Buna göre salınının genliğinde l boyu kadar artış olduğunda, tam bir çevri ayrılması meydana gelecektir. Buradan da görüleceği gibi l uzunluğu boyunca silindirin hareketinin periyodu, çevri kopması periyodunun yarısına $[(1/2)T_v]$ eşit olmaktadır. Buna göre l boyu;

$$l = \left(\frac{1}{2}\right) T_v U \quad (3.9)$$

olacaktır. Burada U , silindirin hareketi boyunca (salınımlı hareket) ortalama hızıdır. (3.8) ve (3.9) ifadelerinden çevri kopmasının frekansı,

$$f_v = \frac{1}{T_v} \quad (3.10)$$

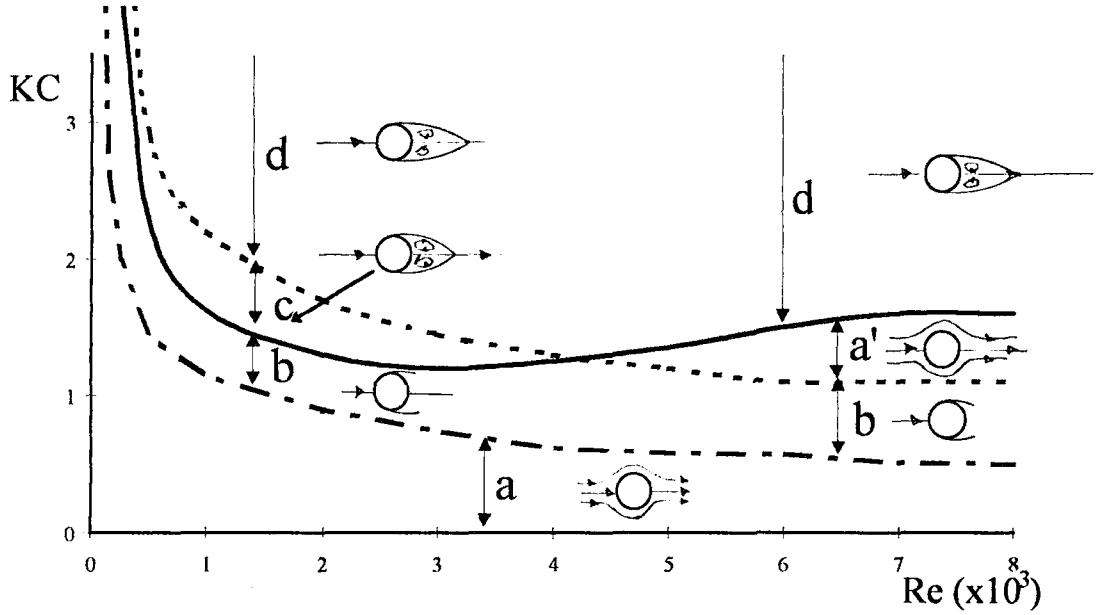
olur. Bu frekansı Strouhal sayısı ifadesinde yerine koyarsak,

$$St = \frac{f_v D}{U} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{8} = 0.2 \quad (3.11)$$

Bu değer de, Strouhal sayısının 0.2 olarak normalize edilmiş değeridir (SÜMER ve FREDSE).

3.3. SALINIMLI HAREKET AKIM REJİMLERİNDE REYNOLDS SAYISININ ETKİSİ

Reynolds sayısının akım rejimlerine olan etkisi, özellikle küçük KC sayısına sahip salınımlı hareketin görüldüğü akım rejimlerinde önem taşımaktadır. Reynolds sayısının değişimi, bu bölgede akım rejimlerinin sınırlarını önemli ölçüde değiştirir. Küçük KC sayılarında akım rejimlerinin sınırlarının Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 3.10'da görülmektedir.



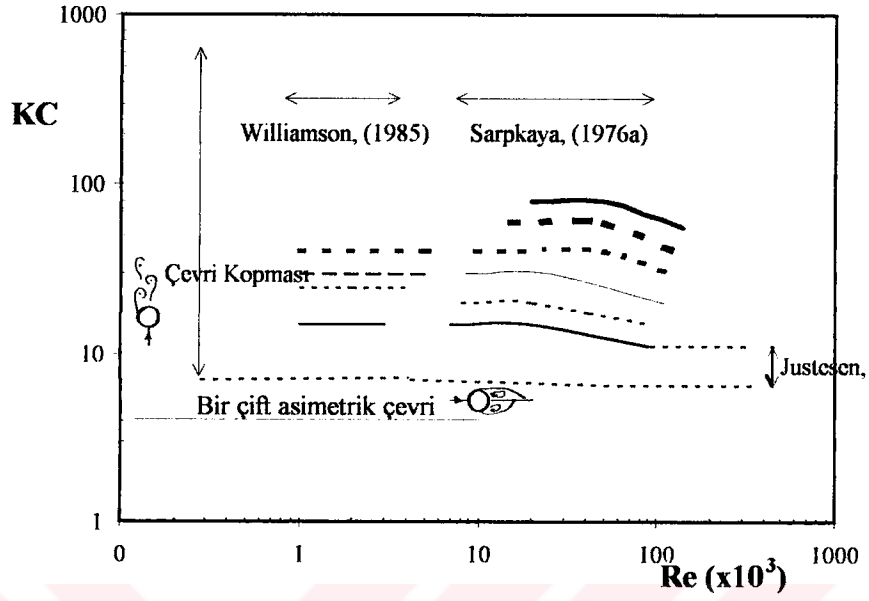
Şekil 3.10. Küçük KC sayılarında salınlı hareket durumunda akım rejimlerinin Re sayısı ile değişimi (SARPKAYA 1986a).

Şekilde (a) bölgesi, ayrılmanın olmadığı ve akımın silindir üzerinden kayarak geçtiği bölgeyi, (a') bölgesi sınır tabakasının türbülanslı olduğu ve ayrılma olmayan bölgeyi, (b) bölgesi Honji çevresi şeklinde ayrılmanın görüldüğü bölgeyi, (c) bölgesi sabit çevri çiftinin olduğu bölgeyi, (d) bölgesi ise silindir yüzeyinde türbülansın görüldüğü ve simetrik çevri çiftinin olduğu bölgeyi göstermektedir.

Şekilden de görüleceği gibi Reynolds sayısının çok küçük değerlerinde ($Re < 5$) ayrılmayı gösteren eğriler bu Re değerine asimptot olmaktadır. Re'nin bu değerine karşılık KC sayısı sonsuz değerini almakta ve bu durumda akım rejimi kararlı akım rejimine dönüşmektedir.

Reynolds sayısının daha büyük değerlerinde ($Re > 4 \times 10^3$), KC sayısının artması ile Honji tipi çevri ayrılmasının görüldüğü bölgeden sonra tekrar ayrılmanın görülmediği bölge görülebilir. Bunun nedeni sınır tabakasının türbülanslı hale geçmesidir. Sınır tabakasındaki türbülans ayrılmayı geciktirebileceği için, ayrılmanın olmadığı akım rejimi gözlenebilir. KC sayısının bir miktar daha artmasıyla çift simetrik çevrinin olduğu akım rejimine ulaşılır (Şekil 3.10).

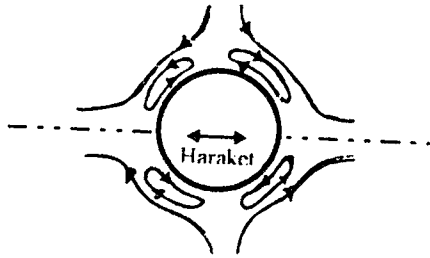
Çevri kopması rejimlerinde Re sayısının KC sayısı üzerindeki etkisi Şekil 3.11' de görülmektedir.



Şekil 3.11. Çevri kopması rejimlerinde akım üzerine Reynolds sayısının etkisi

3.4. İKİNCİL AKINTILAR (STREAMING)

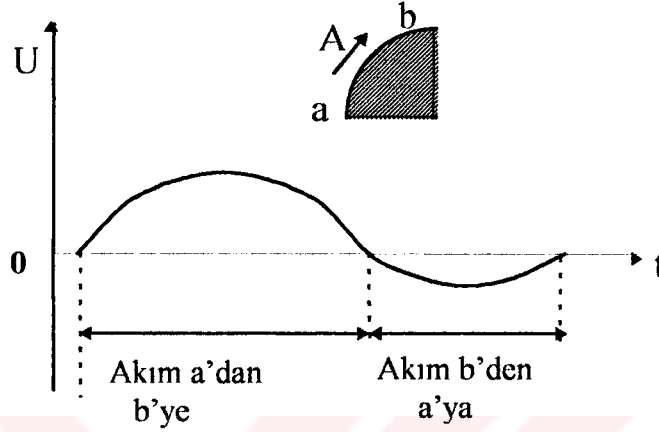
Silindir etrafında ayrılmanın olmadığı akım rejimlerinde, Şekil 3.12'de görüldüğü gibi, sabit bir hücre şeklinde ikincil akıntılar meydana gelir ve bunlar "streaming" olarak adlandırılır.



Şekil 3.12. Ayrılmanın görülmediği salınımlı akımlarda ikincil akıntılar.

Silindir üzerindeki bir A noktasında hız, akımın ardışık iki periyodu boyunca simetrik değildir (Şekil 3.13). Bu şekilde gösterildiği gibi, yaklaşım hızı noktanın bulunduğu yüzeye doğru iken, basınç gradyanı gereği bu noktadaki hız diğer ardışık periyottaki hızdan (rölatif olarak) daha büyüktür. Hızdaki bu simetrisizlik, silindirin alt ve üst

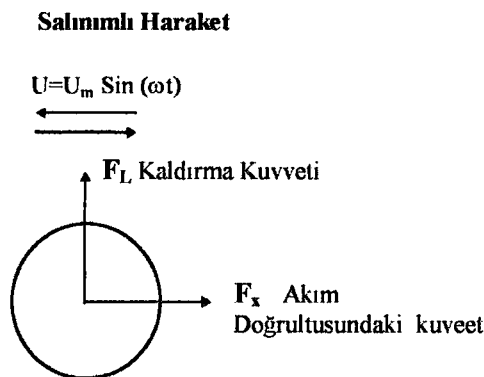
tarafına doğru ortalama hızı sıfırdan farklı yapmaktadır (Şekil 3.13). Hareketin doğası nedeni ile bu hareket iki yönlü olmaktadır. Salınlı hareketin etkisindeki açık deniz yapıları etrafında görülen (boru hattı, açık deniz platformu vb) oyulma ve yığılma olayları üzerindeki önemli etkisi nedeni ile bu ikincil akıntılar önem arz ederler.



Şekil 3.13. Salınlı hareketin yarı periyotlarında hız değişiminde görülen simetrisizliğin etkisi.

3.5. SALINIMLI AKIM ORTAMINDA BULUNAN SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ KUVVETLER

Kararlı akım durumuna benzer olarak salınlı hareketteki kuvvet de iki bileşenden meydana gelir: birincisi akım doğrultusundaki kuvvet, ikincisi ise akım doğrultusuna dik kaldırma kuvveti (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Salınlı akım ortamında silindirik bir yapıya etkiyen kuvvetler

3.5.1. Akım Doğrultusundaki Kuvvet

Kararlı akım ortamında yer alan silindire akım doğrultusunda etkiyen kuvvet;

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D U(t) |U(t)| \quad (3.12)$$

şeklindedir. Burada F , akım doğrultusunda birim uzunluğa etkiyen kuvvet; C_D , sürüklenme katsayısı; U , akım hızı ve ρ , özgül küttedir.

Daha önceki bölümde kararlı akım durumunda U^2 olarak gösterilen akım hızının burada $U(t)|U(t)|$ şeklinde verilmesinin sebebi, hız doğrultusunun zamana bağlı olarak yön değiştirmesi ve C_D katsayısının daima akım hızı yönünde olmasıdır.

Dalga etkisi altında (salınımlı akım durumu) akım doğrultusundaki toplam kuvveti bulurken, kararlı akımdaki kuvvete ek olarak iki bileşen daha katılır;

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D U(t) |U(t)| + C_m m' \dot{U}(t) + \rho V \dot{U}(t) \quad (3.13)$$

Burada $C_m m' U(t)$ bileşeni hidrodinamik-kütle kuvveti (ek kütle), $(\rho V U(t))$ bileşeni ise Froude-Krylov kuvveti olarak bilinir. Bu ifadede (m') ek kütle, (V) silindirin hacmidir. Silindirin hacmi, silindirin enkesit alanı (A) ile birim uzunluğunun çarpımıdır (JACOBSEN ve diğ. 1988);(CHAO ve diğ. 1989).

3.5.1.1. Ek kütle (hydrodynamic mass) kuvveti

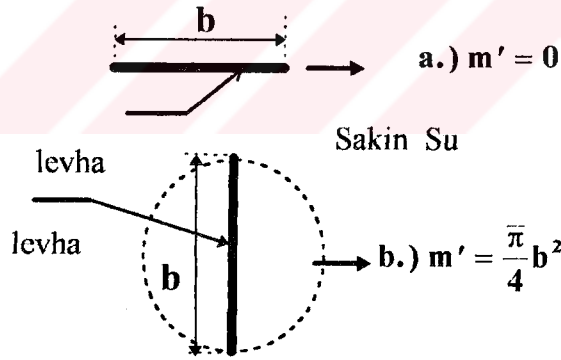
Ek kütleli bir örnek ile açıklarsak; b uzunluğunda ve kalınlığı çok az olan bir plakayı su içine yerleştiririz. Plakayı su içerisinde ani bir hareketle (b) uzunluğu yönünde hareket ettirirsek, harekete karşı oluşan direnç çok az olacak ve levha kolayca hareket edecektir (Şekil 3.15a). Daha sonra aynı plakayı aynı kuvvetle (b) uzunluğuna dik doğrultuda çekersek (Şekil 3.15b) levha harekete karşı büyük bir direnç

gösterecektir. Bunun sonucunda bir önceki durumdan farklı olarak sadece plaka hareket etmeyecek, aynı zamanda plakaya komşu akışkan parçacıkları da hareket edecektir. Burada ek kütle olarak bahsedilen, cismin kütlesi ile birlikte hareket eden akışkan kütlesidir. Bu ek kütle (m') ile gösterilirse, (m) de cismin kütlesi olmak üzere cisme etkiyen kuvvet;

$$F = (m + m')a \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. Burada a , hareket eden cismin ivmesidir.

Bir cismin ek kütlesi şu şekilde belirlenebilir: Öncelikle sakin su içerisine yerleştirilen cisim ek kütlelenin hesaplanacağı akım doğrultusunda hareketlendirilir. Bu hareketlenme cisim etrafında basınç gradienti meydana getirecek ve bunun sonucunda ek kütle kuvveti oluşacaktır. Daha sonra cisim etrafında akım alanı hesaplanır ve cisim üzerinde basınçlar belirlenerek buna bağlı olarak ek kütle kuvveti belirlenir.

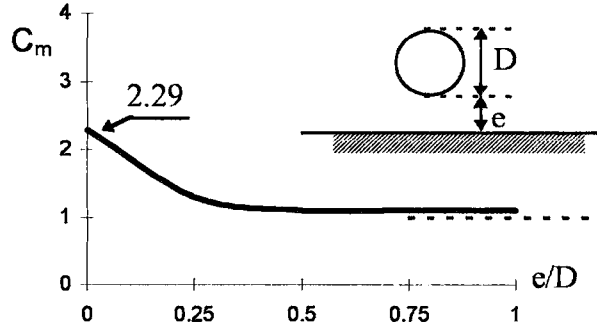


Şekil 3.15. Sakin su içerisindeki levhanın değişik konumlarda hareketi

Bundan başka diğer analitik yaklaşımla da ek hidrodinamik kütle kuvveti belirlenebilir (SÜMER ve FREDSE 1997).

Duvar yakınındaki bir silindir için ek kütle

Eğer silindir taban yakınında ya da tabana bitişik durumda ise (boru hattı) ek kütle duvarın etkisi ile değişir. Bunu YAMAMATO ve diğ. (1974)'in potansiyel akım kabulü ile yaptığı ve sonuçları Şekil 3.16'da verilen grafikten de açıkça görmek mümkündür.



Şekil 3.16. Ek kütle katsayısının e/D ile değişimi (YAMAMOTO 1974)

Bu şekilden görüleceği gibi, e/D değeri arttıkça, yani silindir duvardan uzaklaştıkça cidarın C_m üzerindeki etkisi kaybolur ve C_m , 1'e asimtot olur. Burada e/D 'nin 1'den büyük değerlerinde cidarın etkisinin olmadığı görülmektedir. Şekil 3.16'da C_m ek kütle sabitidir.

3.5.1.2. Froude-Krylov kuvveti

Daha önceki bölümde ek kütlenin belirlenmesinden bahsedilmişti. Ek kütlenin hesabında sakin su içerisinde a ivmesi ile hareket eden bir yapı etrafında ek kütle belirlenmişti. Eğer silindir sabit olarak durup, akım silindire doğru ivmelenen bir harekete sahipse, bu durumda ilk bölümde bahsedilen ek kütlenin yanında silindirin dışındaki akımla etrafındaki akımın etkileşiminin meydana getirdiği basınç değişiminin etkisiyle Froude-Krylov kuvveti denilen bir ek kuvvet daha silindire etkir. Bu basınç değişimi;

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.15)$$

şeklinde. Bu basınç dağılımını silindir yüzeyi üzerinde integre edersek bu kuvveti,

$$F_p = - \int_s p \, \bar{ds} \quad (3.16)$$

olarak belirleyebiliriz. Burada S, cismin yüzeyini göstermektedir. Gauss teoremi kullanılarak hacim integraline geçilirse bu kuvvet;

$$F_p = - \int_v \frac{\partial p}{\partial x} \, dV \quad (3.17)$$

olur. Bu integralin sonucu ise şu şekilde gösterilebilir:

$$F_p = \rho V \dot{U} \quad (3.18)$$

Bu ifadede V hacmi yerine cismin kesit alanı A ile birim boyu konulursa F_p kuvveti;

$$F_p = \rho A \dot{U} \quad (3.19)$$

şeklinde olur. Burada belirlenen Froude-Krylov kuvvet ifadesi silindirin birim boyu içindir.

3.6. DALGA KUVVETLERİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Dalga etkisi altındaki bir açık deniz yapısına gelen kuvvetlerin hesabı üç farklı yolla yapılabilir:

- . Morisson denklemi,
- . Froude-Krylov teorisi,
- . Difraksiyon teorisi.

Morrison denkleminde, yapıya akım doğrultusunda etkiyen kuvveti, atalet ve sürüklenme kuvvetlerinin lineer olarak meydana getirdiği göz önüne alınır. Bu ifadede ek kütle ve sürüklenme katsayıları deneysel olarak belirlenir. Morisson denklemleri yapının dalga boyu yanında çok küçük olduğu durumlarda geçerlidir. Bu denklem sürüklenme kuvvetinin dominant olduğu akımlarda daha çok tercih edilir.

Froude-Krylov teorisi sürüklenme kuvvetinin küçük, atalet kuvvetinin büyük olduğu, aynı zamanda yapının dalga boyundan daha küçük olduğu akım rejimlerinde kullanılır. Yapı etrafında ve yüzeyinde basınç dağılımı belirlenerek kuvvetler hesaplanır. Bu metodun avantajı, simetrik durumdaki şekli belirli cisimlerin kuvvet katsayılarının kolayca belirlenebilmesidir.

Eğer yapının boyutu dalga boyu ile karşılaştırılabilirse, bu durumda cismin akımı etkilemesi ile difraksiyon etkisi görülür. Bu durumlarda difraksiyon teorisi ile hesap yapmak gerekir (CHAKRABARTI 1987);(CHAKRABARTI 1990);(SOTBERG ve diğ. 1989);(MAZURKIEWICZ 1987).

Bu çalışmada Morrison denklemleri kullanılarak cisme etkiyen kuvvetlerin belirlenmesine çalışılacağından sadece Morrison denklemleri detaylı olarak anlatılacaktır.

3.6.1. Morrison Denklemleri

Salınımlı akım etkisi altındaki bir cisme etkiyen akım doğrultusundaki toplam kuvvet (F), sürüklenme kuvveti, ek kütle kuvveti ve Froude-Krylov kuvvetlerinin toplamından meydana gelmiştir. Bu kuvvet analitik olarak şu şekilde yazılabilir:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho C_D D U(t) |U(t)| + \rho C_m A \dot{U}(t) + \rho A \ddot{U}(t) \quad (3.20)$$

(3.20) denklemi aşağıdaki gibi yazılırsa,

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D U |U| + \rho (C_m + 1) A \dot{U} \quad (3.21)$$

şeklinde olur. Burada $(C_m + 1)$ terimi yerine yeni bir katsayı belirlersek;

$$C_M = C_m + 1 \quad (3.22)$$

(3.20)'deki toplam kuvveti veren ifade;

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D U |U| + \rho C_M A \dot{U} \quad (3.23)$$

şeklinde olur. Bu denklem Morrison denklemi olarak bilinir (MORRISON ve diğ. 1950).

Bu denklemdeki yeni bileşene ($\rho C_M A \dot{U}$) atalet kuvveti ve bu ifadedeki C_M katsayısına da atalet katsayısı denir. Eğer yapı sabit değilse ve akım doğrultusunda kendi hareketine de sahipse, (3.20) ifadesi:

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D (U - U_b) |U - U_b| + \rho C_m A \overline{(U - U_b)} + \rho A \dot{U} \quad (3.24)$$

şekline dönüşür. Burada U_b cismin akım doğrultusundaki kendi hareketidir. Bu durum cismin özellikle rijit olarak mesnetlenmediği koşullarda görülebilir. Froude-Krylov kuvvetinin hesabında ise $(U - U_b)$ yerine U alınmalıdır. Bunun nedeni, akışkanın hareketinin cismin hareketinden daha belirleyici olmasıdır (SÜMER ve FREDSE 1997).

3.6.2. Sürüklemeye Kuvveti ile Atalet Kuvvetinin Karşılaştırılması

Morrison Denklemi (3.23) incelenirse, sürüklemeye kuvvetinin hız ile, atalet kuvvetinin ise ivme ile değiştiği görülür. Bu yüzden bu iki kuvvetin maximum değerleri arasında 90°'lik bir faz farkı vardır. Bu şematik olarak Şekil 3.16' da gösterilmiştir. Bu faz farkı eğer sadece kuvvetin max değerleri ile ilgileniliyorsa göz önüne alınmalıdır.

Her iki kuvvetin oranının belirlenmesi istenirse, (3.23)'deki değerleri gözönüne alınarak aralarındaki oran;

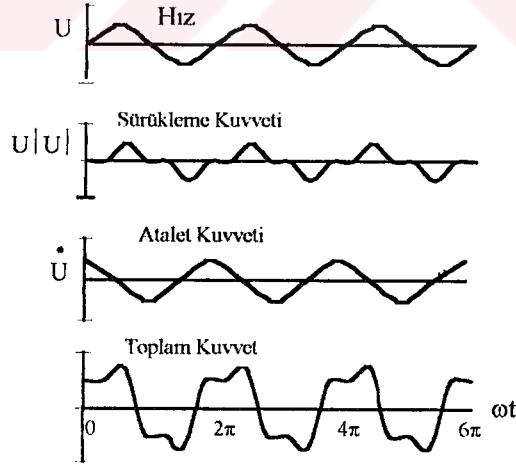
$$\frac{F_{\text{atalet,max}}}{F_{\text{sürüklemeye,max}}} = \frac{C_M \frac{\pi}{4} D^2 \omega U_m}{\frac{1}{2} C_D D U_m^2} = \frac{C_M \frac{\pi}{4} D^2 \frac{2\pi}{T} U_m}{\frac{1}{2} C_D D U_m^2} = \pi^2 \frac{D}{U_m T} \frac{C_M}{C_D} = \frac{\pi^2}{KC} \frac{C_M}{C_D} \quad (3.25)$$

şeklinde olur. Atalet katsayısının (C_M), (C_m+1) şeklinde olduğu daha önce Bölüm 3.5.1.1'de gösterilmiştir. C_m 'in yaklaşık olarak 1 değerini aldığı çeşitli çalışmalarla (SÜMER 1990) belirlenmiştir. Buna göre $C_M \cong 2$ değerini almaktadır. Sürüklemeye katsayısı C_D değeri de kabaca 1 olarak alınırsa (SARPKAYA 1987), (3.25) ifadesinden atalet kuvvetlerinin sürüklemeye kuvvetlerine oranı:

$$\frac{F_{\text{atalet,max}}}{F_{\text{sürüklemeye,max}}} = \frac{20}{KC} \quad (3.26)$$

olarak gösterilebilir.

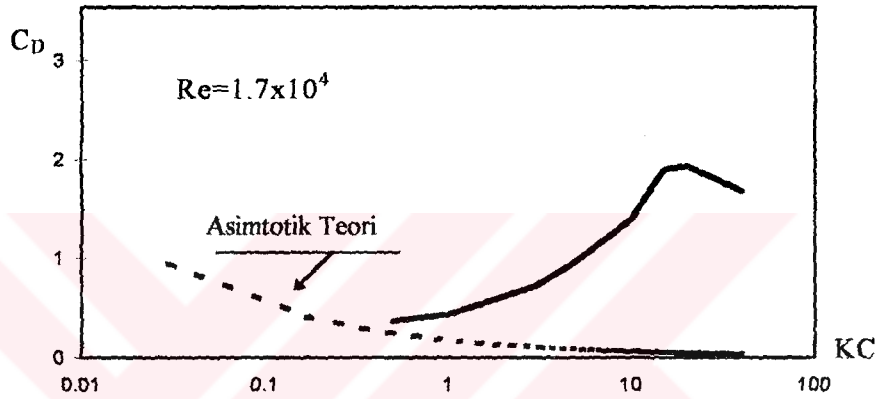
Bu da, KC'nin küçük değerleri için akım doğrultusundaki kuvvet üzerinde atalet kuvveti bileşeninin etkin rol oynadığını gösterir. Bu yüzden sürüklemeye kuvveti, küçük KC sayılarında ihmal edilebilir. Bununla birlikte KC arttırıldığında ve ayrılmalar meydana gelmeye başladığında, sürüklemeye kuvvetinde önemli artış olmaktadır. Buna göre $0 < KC < 20-30$ aralığındaki akım rejimleri atalet kuvveti dominant rejimler, $KC > 20-30$ değerindeki rejimler ise sürüklemeye kuvveti dominant rejimlerdir. Bu sınırları silindirik yüzeyinin pürüzlülüğü bir miktar değiştirebilir.



Şekil 3.17. Sürüklemeye ve atalet kuvvetlerinin zamanla değişimi

3.6.3. Akım Doğrultusundaki Kuvvet Katsayılarının (C_D , C_M), KC İle Değişimi

C_D ve C_M 'in KC ile değişimi Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da verilmiştir. Bu şekilde salınlımlı akım ortamında yeralan bir silindir üzerine etkiyen akım doğrultusundaki kuvvete ait kuvvet katsayılarının değişimi, pratikte anlamlı olabilecek oldukça geniş bir aralıkta ($0 < KC < 60$) verilmiştir. Bu aralıkta Re , sabit ve değeri 1.7×10^4 'dür.



Şekil 3.18. Sürüklenme kuvveti katsayısının (C_D), KC ile değişimi

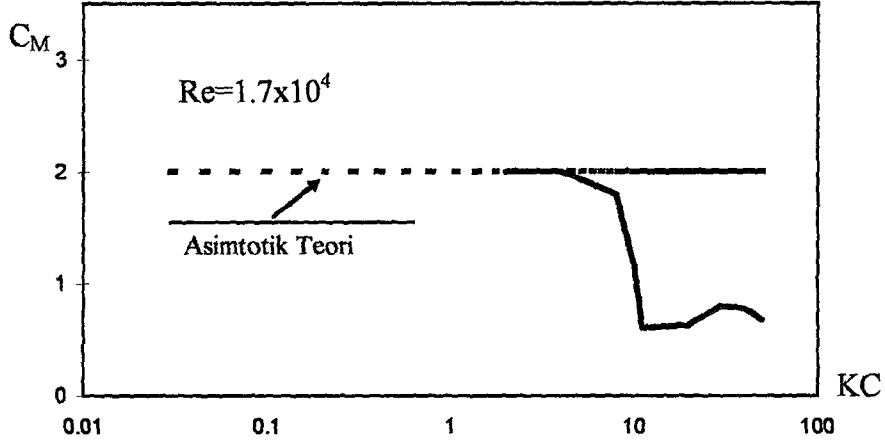
Öncelikle, ilk grafikteki (Şekil 3.18) C_D 'nin KC ile değişimi incelenirse, üç farklı bölge ile karşılaşılır. Şekilde bu bölgelerin sınırları, $KC < 0.3$, $0.3 < KC < 13$, $KC > 13$ olarak görülmektedir. KC 'nin çok küçük değerlerinin olduğu ilk bölgede ($KC < 0.3$), Re Sayısı da yeterli derecede büyük ise, oluşacak akım rejimi Şekil 3.10'da görülmektedir. Bu akım rejiminde akım doğrultusundaki kuvvetlerin belirlenmesi için literatürde daha önce belirlenmiş deney sonuçları mevcut değildir. Asimptotik teori gibi hesap yöntemleri kullanılarak bu aralıktaki sürüklenme katsayısı yaklaşık olarak belirlenebilir. İkinci bölgede ($0.3 < KC < 13$), $KC \approx 0.3$ olduğu andan itibaren akımda ayrılma görülür. Ayrılmanın başlamasıyla birlikte sürüklenme katsayısında önemli değişiklikler görülür ve bu değişiklik $KC \approx 13$ oluncaya kadar sürer (Şekil 3.10). KC 'nin 13'den büyük değerlerinin olduğu üçüncü bölgede çevri kopması rejimleri görülmeye başlar. İz bölgesinde asimetrik çevri çiftinin oluşturduğu çevri caddesi görülür. KC 'nin 13'den büyük olduğu akım rejimleri aynı özelliği gösterdiğinden sürüklenme katsayısında bir

stabilizasyon görülür ve $C_D \approx 2$ değeri etrafında önemli bir değişiklik görülmez (Şekil 3.18).

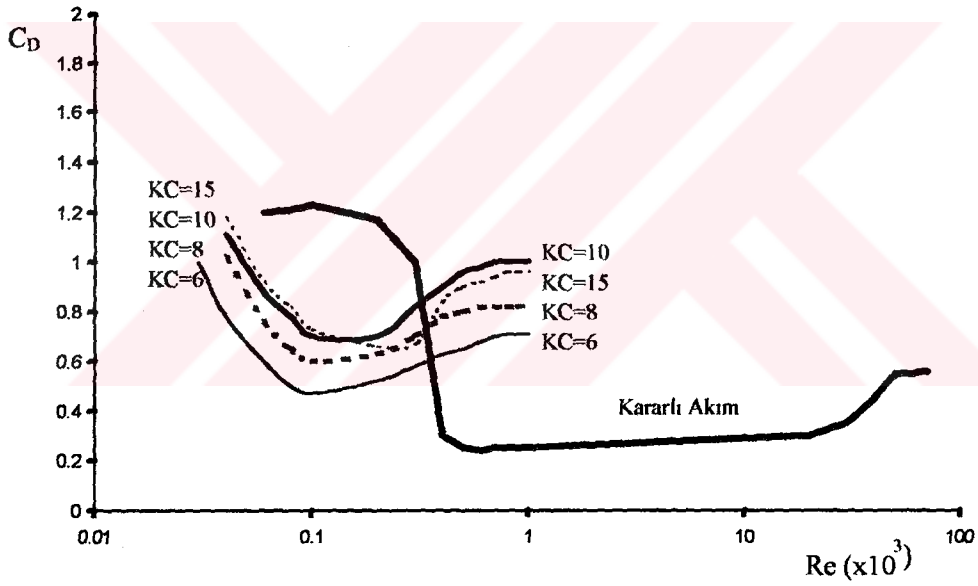
Atalet katsayısının (C_M) KC ile değişimi Şekil 3.19'da görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere atalet katsayısının değişimi de üç bölgede incelenebilir. Şekilde bu bölgelerin sınırları, $KC < 6$, $6 < KC < 13$, $KC > 13$ olarak görülmektedir. Bu üç aralığı akım rejimlerindeki değişim meydana getirir. C_M 'in ilk aralığında ($KC < 6$) atalet katsayısının toplam kuvvet üzerine etkisi, sürüklenme katsayısından (C_D) çok daha büyüktür. Bu aralıkta C_M 'in değeri asimptotik teori gibi analitik yöntemler yardımıyla belirlenebilir. KC sayısı yaklaşık olarak 6 değeri civarında olunca C_M 'de ani bir değişme görülür ve hızla ani olarak azalmaya başlar. Bu ani düşme $KC \approx 13$ değerine kadar sürer. KC'nin 6'ya eşit olduğu değer çevri kopması rejimlerinin görüldüğü alt limittir. Bu nedenle atalet katsayısındaki ani düşüşe sebep olarak çevri kopması gösterilebilir. Çevri kopması ve akım-yapı etkileşimi ile meydana gelen hidrodinamik olayların ek kütle ile etkileşimi sonucunda, ek kütledeki azalma nedeniyle C_M 'de azalma görülür. Bu konuda yeterli deneysel sonuç olmamasına rağmen akım izleme teknikleriyle yapılan gözlemler bu sonucu desteklemektedir. Atalet katsayısındaki bu ani ve büyük azalma sırasında Froude-Krylov kuvvetlerinin gözönüne alınmaması durumunda $0 < KC < 10$ aralığında atalet katsayısının zaman zaman negatif değerler dahi alabildiği görülebilir. Kopan çevrilerin oluşturduğu tam gelişmiş çevri caddesinin olduğu üçüncü aralıkta ($KC > 13$) C_M katsayısında artış meydana gelmekte, fakat bu artış çok fazla olmamaktadır (Şekil 3.19);(SARPKAYA ve RAJABI 1979);(JENSEN ve diğ. 1988);(BRYNDUM ve diğ. 1988);(OTSUKA ve diğ. 1990);(KLOPMAN ve KOSTENSE 1989);(DAVIES ve diğ. 1990).

3.6.4. Reynolds Sayısının (Re), Akım Doğrultusundaki Kuvvet Katsayıları (C_D , C_M) Üzerindeki Etkisi

Şekil 3.20'de, salınımlı hareket etkisinde, akım doğrultusundaki sürüklenme kuvveti katsayısının (C_D) Reynolds sayısı ile değişimi görülmektedir. Kararlı akım ile salınımlı hareketli akım durumunun karşılaştırılması amacı ile Şekil 3.20'de kararlı akım



Şekil 3.19. C_M atalet kuvveti katsayısının KC ile Değişimi



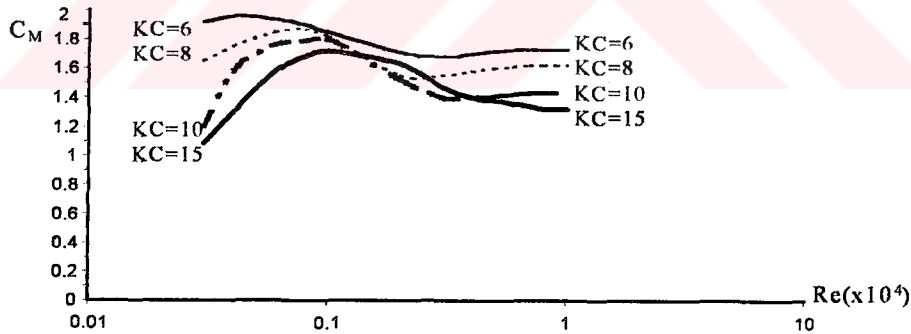
Şekil 3.20. Kararlı ve salınımlı akım durumları için sürüklenme kuvveti katsayısının (C_D)'nin Re ile değişimi (JUSTESEN 1989).

durumundaki $C_D = f(Re)$ değişimi de verilmiştir. Bu şekil, JUSTESEN 1989'deki çalışma temel alınarak hazırlanmıştır.

Şekilden de görüleceği gibi, C_D sürüklenme kuvveti katsayısındaki değişme, kararlı akımdaki değişmeye benzer şekilde olmakta, fakat kararlı akımda en alt kritik akım

rejiminden süper kritik akım rejimine geçerken görülen ve kararlı akımda *sürüklenme kuvveti krizi* olarak da adlandırılan sürüklenme kuvvetindeki ani düşme, dalga hareketinde kararlı akımdaki kadar kesin ve ani olmamakta, daha yumuşak bir geçiş gözlenmektedir. Kararlı akımdakine benzer olarak, bu aralıktaki rejimler sürüklenme kuvveti açısından kritik (düşük geçiş bölgesi) rejim olarak yorumlanabilir. KC sayısı sabit tutulurken Re sayısı daha arttırılırsa, sürüklenme kuvveti katsayısı yaklaşık olarak sabit bir değere gelir. Bu durumdaki rejimin de, kararlı akımda üst geçiş bölgesi akım rejimine karşı geldiği söylenebilir. Re sayısının daha da arttırılması sonucunda C_D katsayısı artık sabit bir değer alır ve katsayıda değişim gözlenmez. Bu durum da, kararlı akımdaki karşılığı, transcritical rejim gibi değerlendirilebilir.

Şekil 3.21'deki atalet kuvveti katsayısının (C_M)'in Re sayısı ile değişimi incelendiğinde, sürüklenme kuvveti katsayısına zıt bir değişim görülmektedir. Sürüklenme kuvveti katsayısının düşük değerler aldığı kısımlarda atalet kuvveti katsayısı artmakta ve büyük değerler almaktadır. Bu bölgede C_M 'de görülen artış, süperkritik ve üst geçiş bölgesi rejimlerinde yer alan zayıf çevri kopması ile açıklanabilir.

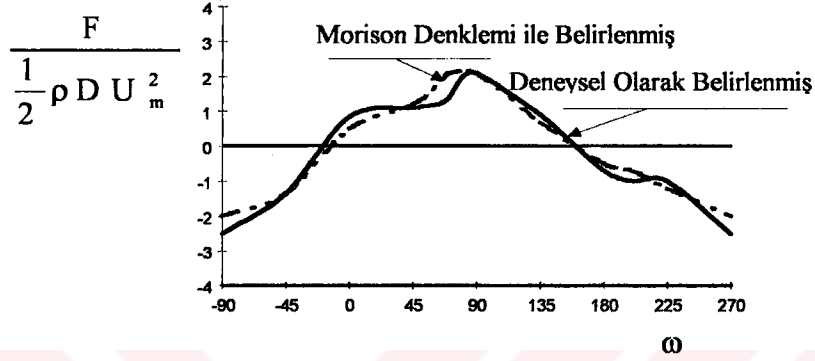


Şekil 3.21. Atalet kuvveti katsayısının (C_M), Re ile değişimi (JUSTESEN 1989).

3.6.5. Dalga Kuvvetlerinin Hesabında Morison Denkleminin Uygunluğu

Morisson denklemi kullanılarak silindir üzerinde belirlenen akım doğrultusundaki kuvvetin değişimi ile deneysel olarak ölçülmüş akım doğrultusundaki kuvvet değişimi

Şekil 3.22'de görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi Morisson denklemi kullanılarak bulunan kuvvet ile ölçülmüş kuvvet arasında mükemmel bir benzeşim yoktur. Morisson denklemi ile ölçülmüş kuvvet arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmalara örnek olarak, SARP KAYA ve ISACSON'un 1981'deki çalışmaları verilebilir.

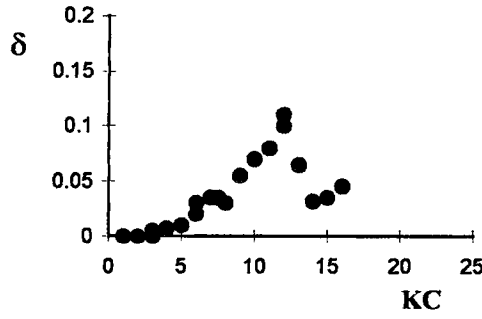


Şekil 3.22 Morisson denklemleri ile elde edilmiş akım doğrultusundaki kuvvet ile deneysel olarak ölçülmüş kuvvetin karşılaştırılması, ($KC=14$, $Re=2.8 \times 10^4$); (SARP KAYA ve ISAACSON 1981).

Morisson denkleminden elde edilen kuvvet ile ölçülen kuvvet arasındaki uyumun belirlenmesi için bir uyum katsayısının tanımlanması gereklidir. Uyum katsayısı (δ);

$$\delta = \frac{\int_0^{T_1} (F_m - F_p)^2 dt}{\int_0^{T_1} F_m^2 dt}$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadede, F_p , Morisson denklemlerinden belirlenen kuvveti, F_m , ölçülmüş kuvveti, T_1 de toplam veri toplama süresini göstermektedir. Şekil 3.23'de δ uyum katsayısının KC ile değişimi görülmektedir. Şekilde, atalet kuvvetlerinin etkin olduğu küçük KC sayılarında, Morisson denklemi ile elde edilen akım doğrultusundaki kuvvetin, ölçülen kuvvet değerine yakın değerler aldığı görülmektedir. KC 'nin değeri 12'ye yaklaştığında uyum katsayısında yükselme görülmekte ve bu yükseliş $KC=12$ 'de bir pik değere ulaştıktan sonra tekrar azalmaktadır.

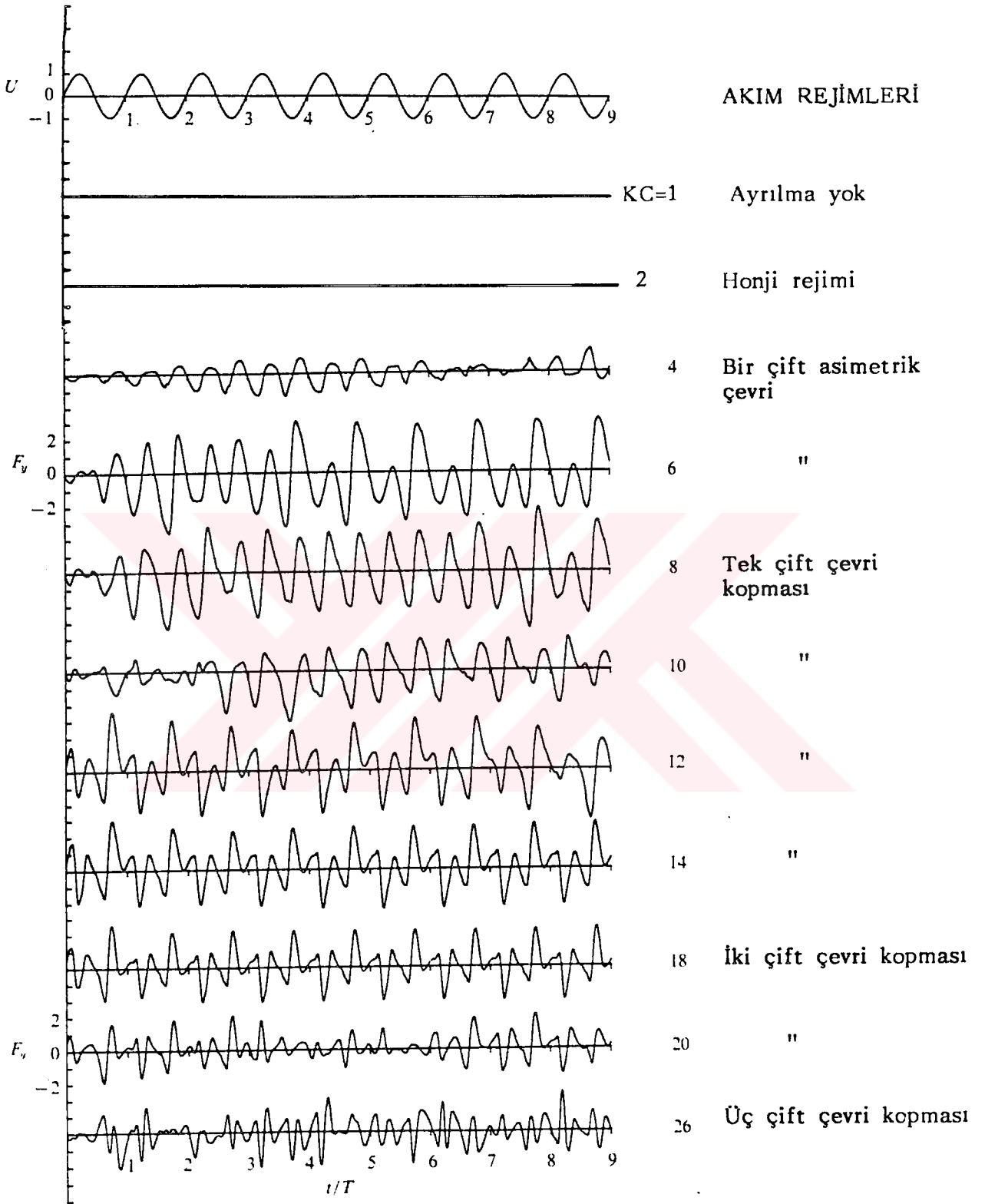


Şekil 3.23. Uyum parametresinin (δ)'nın KC ile değişimi $Re=5 \times 10^5$ (JUSTESEN 1989).

Sonuç olarak, atalet kuvvetinin dominant olduğu akım rejimlerinde, uyum katsayısı (δ) ihmal edilebilecek derecede küçük kalmaktadır. Akımda ayrılma görülmeye başlandığında ise Morisson denklemi kuvvetin değişimini tam anlamı ile verememektedir (SARPKAYA ve ISAACSON 1981).

3.6.6. Dalga Hareketinin Oluşturduğu Kaldırma Kuvveti

Dalga hareketinin örnek gösterilebileceği bir salınlı akım ortamında yeralan silindir üzerine, akım doğrultusuna dik doğrultuda kaldırma kuvveti de etkir. Oluşan bu kaldırma kuvvetinin değişim frekansı, salınlı hareketin frekansından farklı değerler alır. Kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi, doğrudan salınlı hareket etkisiyle silindir etrafında oluşacak çevrilerin hareketi ile ilgilidir. Bu nedenle ayrılmanın olmadığı küçük KC sayılı akım rejimlerinde kaldırma kuvveti oluşmaz. Şekil 3.24'te KC'nin 0'dan itibaren artırılmasıyla kaldırma kuvvetinde görülen değişimler görülmektedir. KC'nin 4'ten küçük değerlerinde kaldırma kuvveti görülmemekte, $KC=4$ olduğunda ise iz bölgesinde asimetrik bir çift sabit vorteksin oluşması ile meydana gelen fark nedeniyle, kaldırma kuvveti görülmeye başlamaktadır. Kaldırma kuvvetinde görülen en büyük değerler ise, KC'nin 6, 7 ve 8 olduğu değerlere karşı gelmektedir. Bu değerlerde kaldırma kuvvetinin değişimi de en büyük olmaktadır. Çevri kopması rejimlerinin görüldüğü KC sayılarında ise kaldırma kuvveti, bu aralıktaki değerlerden bir miktar daha küçüktür (Şekil 3.24);(PEARCEY 1990);(PRESER 1992);(JUSTESEN 1991).



Şekil 3.24. KC ve akım rejimleri ile kaldırma kuvvetinde görülen değişimler ($Re/KC=196$);(JUSTESEN 1991).

Silindire etkiyen kaldırma kuvveti incelenirken iki önemli parametre, kaldırma kuvvetinin frekansı ve büyüklüğüdür. Tablo 3.1'de çevri kopması rejimlerinde KC ile hareketin herbir periyodundaki kaldırma kuvveti frekansının değişimi görülmektedir.

Tablo 3.1 Normalize edilmiş kaldırma kuvveti frekansları (WILLIAMSON 1985).

Akım rejimi	KC sınırları	Re	N_L
Bir çift çevri	$7 < KC < 15$	$1.8-3.8 \times 10^3$	2
İki çift çevri	$15 < KC < 24$	$3.8-6.1 \times 10^3$	3
Üç çift çevri	$24 < KC < 32$	$6.1 \times 10^3-8.2 \times 10^3$	4
Dört çift çevri	$32 < KC < 40$	$8.2 \times 10^3-10 \times 10^3$	5

Tabloda N_L , kaldırma kuvveti frekansının (f_L), salınımlı hareketin frekansına (f_w) oranı olarak elde edilen (Normalize edilmiş) kaldırma kuvveti frekansını göstermektedir. Buna göre N_L ,

$$N_L = \frac{f_L}{f_w} \quad (3.27)$$

olarak belirlenir.

Silindire etkiyen kaldırma kuvvetinin büyüklüğünün belirlenmesinde, incelenecek problemin özelliğine göre iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. İlk yaklaşımda, akım doğrultusuna dik kuvvetin maksimum değeri gözönüne alınmakta ve bu maksimum kuvvete göre kaldırma kuvveti katsayısı (C_L) belirlenmektedir. Bu durumda silindire etkiyen kaldırma kuvveti;

$$F_{L,max} = \frac{1}{2} \rho C_{L,max} D U_m^2 \quad (3.28)$$

şeklinde olur. Kaldırma kuvvetinin değerlendirilmesindeki bir diğer yaklaşım da, kaldırma kuvvetinin karesel ortalama değerinin (RMS) kullanılmasıdır. Son ifade bu durumda;

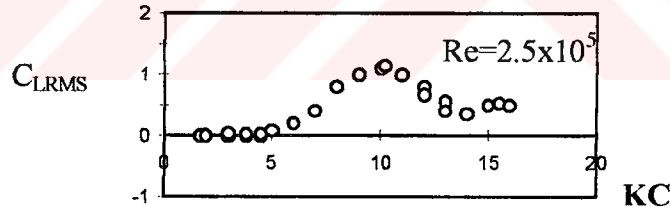
$$F_{L_{RMS}} = \frac{1}{2} \rho C_{L_{RMS}} D U_m^2 \quad (3.29)$$

olarak yazılır. Denklemlerde $F_{L_{max}}$, maksimum kaldırma kuvveti değerini, $F_{L_{RMS}}$ kaldırma kuvvetinin karesel ortalama değerini, $C_{L_{max}}$ ve $C_{L_{RMS}}$ bu kuvvetlere karşı gelen kaldırma kuvveti katsayılarını göstermektedir. Eğer silindire etkiyen kaldırma kuvveti yaklaşık olarak sinüsoidal ise bu durumda $C_{L_{max}}$ ve $C_{L_{RMS}}$ arasında;

$$C_{L_{max}} = \sqrt{2} C_{L_{RMS}} \quad (3.30)$$

şeklinde bir ilişki vardır. Akım doğrultusundakine benzer şekilde boyut analizi yapılırsa, $C_{L_{max}}$ ve $C_{L_{RMS}}$ 'in salınımlı akımda KC ve Re sayılarına bağlı olduğu görülebilir.

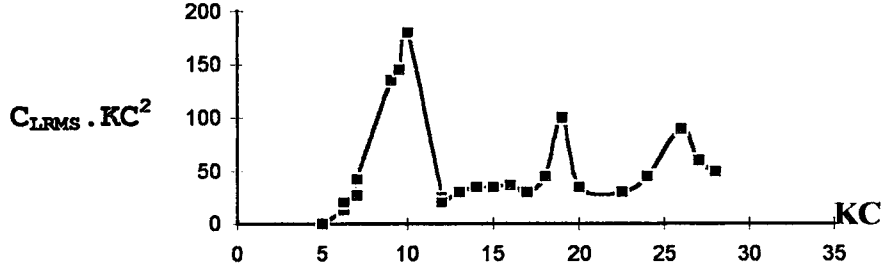
$C_{L_{RMS}}$ 'in KC ile değişimi incelendiğinde (Şekil 3.25), KC sayısının 6~7'den küçük değerlerinde kaldırma kuvvetinin olmadığı, $KC \approx 10$ ve $KC \approx 16$ değerlerinde de $C_{L_{RMS}}$ 'in iki kez pik değere ulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.25. $C_{L_{RMS}}$ 'in KC ile değişimi (JUNSTENSEN 1989).

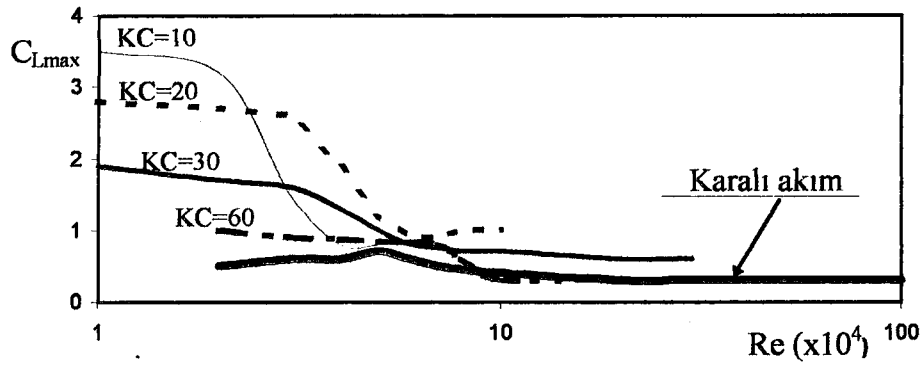
Kaldırma kuvvetinin ulaştığı bu pik değerlerin daha belirgin olarak görülebilmesi için KC ile $(C_{L_{RMS}} \cdot KC^2)$ 'nin değişimine de bakılabilir. Şekil 3.26'da görülen bu değişimde $KC \approx 11, 18$ ve 26 değerlerinde $C_{L_{RMS}}$ 'in pik değerlere ulaştığı görülmektedir (WILLIAMSON 1985). $C_{L_{RMS}}$ 'deki bu pikler, çevri kopması rejimlerinde görülen tek çift çevri kopması ($7 < KC < 15$), iki çift çevri kopması ($15 < KC < 24$) ve üç çift çevri kopması ($24 < KC < 32$) alt rejimlerde meydana gelmektedir.

Bu da, rejimlerin bu pikler üzerinde etkili olduklarını göstermektedir. Pik değerler, rejimler için verilen sınırların uzağında ve genellikle orta kısımlarında gözlenmektedir. Bunun sebebi, sınır değerleri, bir önceki veya bir sonraki komşu rejimden etkilenerek C_{LRMS} değerini etkilemiştir.



Şekil 3.26. Kaldırma kuvveti katsayısı ($C_{LRMS}.KC^2$) ile KC'nin değişimi (WILLIAMSON 1985).

C_L kaldırma kuvveti katsayısının Re sayısı ile değişimi incelendiğinde ise, kuvvet katsayısında azalma olduğu Şekil 3.27'den görülmektedir. Grafikte Re sayısındaki artışa karşılık C_{Lmax} 'den görülen azalma, büyük Re değerlerinde kararlı akımda gözlenen değerlerle uygunluk göstermektedir. Bu değişim, Re sayısının artmasıyla Re sayısına bağlı olarak akım rejimlerinde görülen alt kritik akım, düşük geçiş bölgesi akımı, süper kritik akım, üst geçiş bölgesi akımı gibi değişik akım şartlarının olay üzerindeki etkisi ile açıklanabilir.



Şekil 3.27. Kaldırma kuvveti katsayısının (C_{Lmax}) Re sayısı ile değişimi (SARPKAYA 1976a).

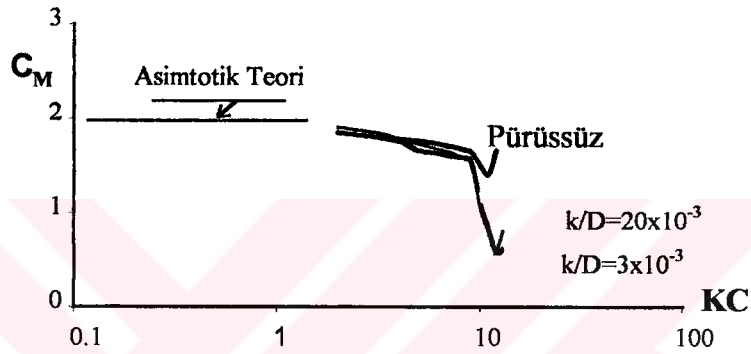
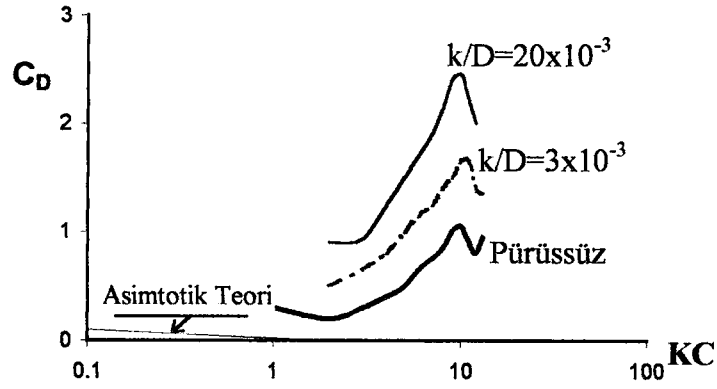
3.7. SİLİNDİRİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ETKİSİ

Salınımlı akım ortamında yer alan silindirin üzeri çeşitli etkiler sonucunda pürüzlü hale gelebilir. Bu durumda, pürüzlülüğün etkisi ile akımda çevri kopması ve çevriler arası etkileşimler, hidrodinamik kararsızlıklar, ayrılmanın değişik açılarda oluşması (yüzeydeki kararsızlık nedeniyle), türbülans şiddetinin değişmesi gibi çeşitli etkiler meydana gelir. Bu tip etkilere, pürüzlülüğün silindirin çap değerini de değiştirmesi (bir miktar arttırması) eklenebilir. Bu etkiler nedeni ile yüzey pürüzlülüğü silindire etkileyen kuvvetler üzerinde önemli rol oynar.

Yüzey pürüzlülüğünün akım doğrultusundaki kuvvet katsayıları üzerindeki etkisi Şekil 3.28'de görülmektedir. Şekilde, silindir üzerindeki pürüzlülüğün değişmesi ile C_D ve C_M 'deki değişimler, KC 'ye bağlı olarak görülmektedir. Pürüzlülüğün değişmesi ile elde edilen üç eğri de, aynı akım koşullarının sağlandığı ve aynı deney kanalında yapılan deneylerin sonucudur (JUSTESEN 1989). Şekil incelendiğinde, C_D sürüklenme katsayısının, yüzey pürüzlülüğünün cilalıdan-pürüzlüye doğru değişmesiyle, yani pürüzlülüğün artmasıyla arttığı, atalet katsayısının (C_M) ise azaldığı gözlenmektedir. Sürüklenme katsayısındaki artış net olarak görülmekte, buna karşılık atalet katsayısındaki azalma özellikle silindir pürüzlü halde iken bu kadar net olmamakta, buna karşılık pürüzsüz yüzey ile pürüzlü yüzey arasında daha büyük değişim görülmektedir. Salınımlı hareketteki hidrodinamik değişim ile ortaya çıkan ek kütle, yüzey pürüzlülüğü nedeni ile çevri kopması rejimlerinde azalacak, bu nedenle C_M pürüzlü durumda cilalı silindire göre daha küçük değerler alacaktır.

Akım doğrultusundaki C_D ve C_M kuvvet katsayılarının çeşitli pürüzlülüklere karşı Re sayısı ile değişimleri KC sayısı sabit tutularak ($KC=20$) Şekil 3.29'da verilmiştir. Bu değişimler kararlı akımdaki değişim ile paralellik taşımaktadır.

Yüzey pürüzlülüğünün kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi incelendiğinde ise, genellikle silindir pürüzlülüğü cilalıdan daha pürüzlüye göre sıralandığında bir artış söz konusudur (Şekil 3.30);(SARPKAYA 1990).



Şekil 3.28 Akım doğrultusundaki kuvvet katsayıları üzerinde pürüzsüzlüğünün etkisi (JUSTESEN 1989).

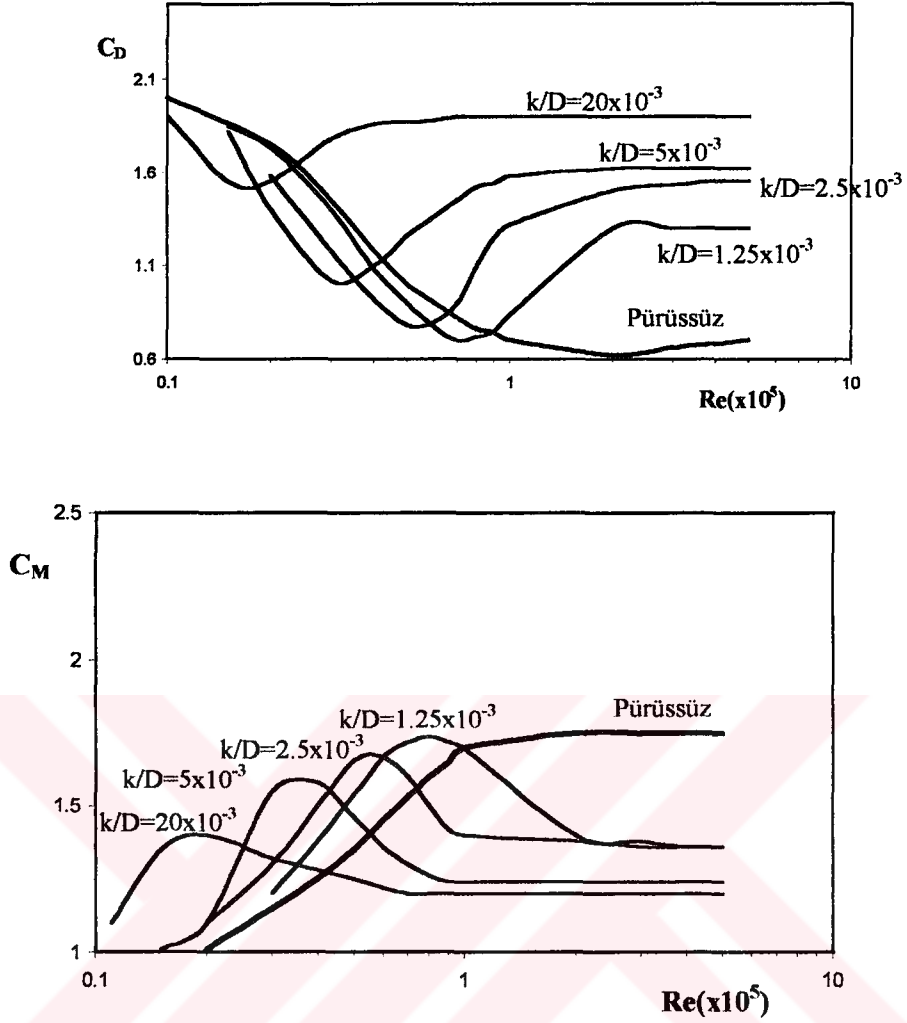
3.8. AKIM DOĞRULTUSUNDA KUVVET SABİTLERİNİN BELİRLENMESİ

Salınımlı harekete sahip bir akım ortamında akım doğrultusundaki C_D ve C_M kuvvet sabitleri, akımın iki bağımsız değişkeni olan Reynolds sayısı ve Keulegan Carpenter katsayısına bağlıdır. Akım doğrultusundaki kuvvet üzerinde etkili parametreler (3.31) nolu ifadede olduğu gibi belirlenir ve boyut analizi yapılırsa, kuvvet katsayılarının (3.32) nolu ifadede gösterilen değişkenlere bağlı olduğu gösterilebilir.

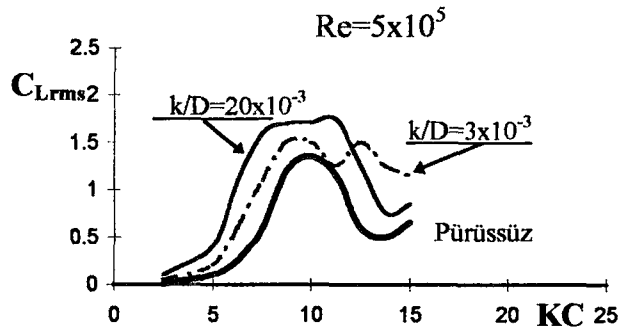
$$F_{\text{akım doğrultusundaki kuvvet}} = f(D, \mu, a, U_m, h, g) \quad (3.31)$$

$$C_{C,M} = \left(\frac{\rho U_M D}{\mu}, \frac{a}{D}, \frac{h}{D} \right) \quad (3.32)$$

$\uparrow$ $\uparrow$
 Re KC



Şekil 3.29. Akım doğrultusundaki kuvvet katsayıları üzerinde pürüzsüzlüğünün etkisi ($KC=20$);(SARPKAYA 1976a);(SARPKAYA 1986b).



Şekil 3.30. Kaldırma kuvveti katsayısı üzerine pürüzlülüğün etkisi (JUSTESEN 1989).

Bu katsayıların hesabında özellikle salınımlı sonsuz akım ortamında yeralan silindir için asimtotik teori yardımıyla çözüm yapılabilir. Fakat bu çözümler sadece çok küçük KC sayılarında ve Re sayısının yeterince büyük olduğu durumlarda iyi sonuç vermektedir. Bunun dışında salınımlı harekette katsayıların hesabı için birkaç nümerik model geliştirilmesine karşın, bunlar bir bütünlük arzetmemekte ve sadece tanımlandıkları konfigürasyonlarda (duvar yakınındaki yapı, pürüzlü silindir vb) ve tanımlandıkları KC ve Re aralıklarında sonuç vermektedir. Bu nedenle akım doğrultusunda kuvvet katsayıları (C_D , C_M) genel olarak deneysel olarak F kuvvetinin ölçülmesi yoluyla belirlenmektedir.

Kuvvet katsayılarının deneysel olarak belirlenmesinde birçok teknik kullanılmaktadır. Periyodik akım etkisindeki bir cisime ait kuvvet katsayılarının belirlenmesinde en çok kullanılan metod, en küçük kareler metodudur. Bu metod, tahmin edilen (Morrison denklemiyle belirlenen) kuvvetle, deneysel olarak ölçülen kuvvet arasındaki farkın karesinin minimum olması ilkesi ile C_D ve C_M 'in belirlenmesidir. Bu metod aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Akım doğrultusundaki kuvvetin zamanla değişimi ölçülmüş olsun. Bu kuvvetin herhangi bir t anındaki değeri $F_m(t)$ olmak üzere, bu kuvvete karşı gelen akım doğrultusunda Morrison denkleminde tahmin edilen değeri $F_p(t)$ ile gösterilirse bu kuvvet;

$$F_p(t) = \underbrace{\frac{1}{2}\rho C_D D U(t)|U(t)|}_1 + \underbrace{\rho C_M A \dot{U}(t)}_2 \quad (3.33)$$

şeklinde olacaktır. Bu ifadedeki (1) ve (2) nolu kısımlardan oluşan çarpanlar birer sabit değerlerdir. Bunlar sırası ile A ve B ile gösterilirse, (3.33) ifadesi,

$$F_p(t) = A U(t)|U(t)| + B \dot{U}(t) \quad (3.34)$$

şeklinde yazılabilir.

Anlık değerlerde, F_p ile F_m arasındaki farkların karelerinin toplamlarına ε^2 diyelim ve bu toplamı toplam kayıt uzunluğu kadar hesaplayalım. Buna göre ε^2 ;

$$\varepsilon^2 = \sum [F_p(t) - F_m(t)]^2 \quad (3.35)$$

olur. $F_p(t)$ yerine (3.34)'deki ifadeleri koyarsak: Bu karesel toplam,

$$\varepsilon^2 = \sum [A U(t) | U(t) | + B \dot{U}(t) - F_m(t)]^2 \quad (3.36)$$

olarak gösterilebilir. Deneysel olarak ölçülen ve denklemden belirlenen kuvvetlerin farkının minimum olması için bu toplamın minimum olması gereklidir. İfadenin minimum olması için,

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial A} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial B} = 0 \quad (3.37)$$

a

b

olmalıdır. Bu türevleri alırsak ilk ifadedden, ilk denklem (3.37a)

$$A(\sum U^4(t)) + B(\sum U(t) | U(t) | \dot{U}(t)) = \sum U(t) U(t) F_m(t) \quad (3.38)$$

ikinci denklem (3.37b);

$$A(\sum U(t) | U(t) | \dot{U}(t)) + B(\sum \dot{U}^2(t)) = \sum \dot{U}(t) F_m(t) \quad (3.39)$$

şeklinde olur. Buradaki toplamların hepsi toplam kayıt boyunca yapılmalıdır. Bu toplamlar belirlendikten sonra (3.38) ve (3.39) nolu denklemlerden A ve B çekilerek belirlenir. Belirlenen A ve B değerleri (3.33)'deki değerlerine eşitlenerek akım doğrultusundaki kuvvet katsayıları (C_D ve C_M) belirlenir.

Eğer akım koşulları sinüsoidal ise, bunun sonucunda katsayıların hesabı da bir miktar kolaylaşır ve kuvvet katsayılarını veren C_D ve C_M ifadeleri şu şekle dönüşür;

$$C_D = \frac{8}{3\pi} \frac{1}{\rho D U_m^2} \int_0^{2\pi} F_m \cos(\omega t) |\cos(\omega t)| d(\omega t) \quad (3.40)$$

$$C_M = -\frac{2KC}{\pi^3} \frac{1}{\rho D U_m^2} \int_0^{2\pi} F_m \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (3.41)$$

Bu ifadelerden, sinüsoidal akım için ölçülen akım doğrultusundaki kuvvete (F_m) bağlı olarak C_D ve C_M belirlenir.

Deneysel olarak C_D ve C_M 'in belirlenmesinde kullanılan bir diğer yol da bunların Fourier analizi ile belirlenmesidir. Bu yöntem ile kuvvet katsayıları belirlendiğinde, C_M , en küçük kareler yöntemi ile belirlenen ile aynı olmakta, fakat C_D bir miktar farklı sonuçlar vermektedir (SARPKAYA ve ISAACSON 1981).

C_D ve C_M katsayılarının deneysel olarak belirlenmesi ilk olarak KEULEGAN ve CARPENTER tarafından 1958'de gerçek dalga etkisi altındaki silindir için belirlenmeye çalışılmıştır. Daha sonra özellikle Sarpkaya tarafından U tüpte yaratılan salınımlı hareket etkisi altında çeşitli Reynolds ve Keulegan-Carpenter katsayılarında ve silindirin değişik durumlarında (pürüzlü, cilalı silindir, değişik akım koşulları vb) çok sayıda deney yapılarak bu katsayılar belirlenmiştir (SARPKAYA 1976a);(SÜMER ve diğ. 1990).

3.9. AKIM VE DALGA ETKİSİNİN BİRLİKTE GÖRÜLDÜĞÜ AKIM ETKİSİNDE SİLİNDİRE ETKİYEN KUVVETLER

Doğada kararlı akım ile dalganın birlikte görülmesi oldukça sık rastlanan bir durumdur. Dalga etkisinin yarattığı salınımlı akım ile kararlı akımın etkileşimi üzerine günümüze kadar pek çok çalışma yapılmıştır. PEREGRINE (1976), JENSEN ve diğ. (1990), SOLSBY ve diğ. (1993); VAN RIJN ve diğ. (1993);(JONSSON 1990)'nın yaptığı çalışmalar buna örnek olarak gösterilebilir.

Bu bölümde salınımlı hareket ile benzeştirilmeye çalışılan dalga hareketi üzerinde, ortamda gözlenen kararlı akımın etkisi açıklanmaya çalışılmıştır. Akım ortamındaki

silindire, akım+dalga etkisinde gelen kuvvetler KC ve Re sayılarının yanında, kararlı akım hızının (U_c), salınımlı harekette meydana gelen maksimum hıza (U_m) oranı ile belirtilen α parametresine de bağlıdır. Olaya etkiyen parametreler (3.42) göz önüne alınarak boyut analizi yapılırsa α 'nın etkisi görülebilir (3.43). Bunun sebebi, salınımlı harekette tanımlanan Re ve KC sayılarının, kararlı akım ve salınımlı hareketin birlikte görülmesi durumunda hem kararlı akıma hem de salınımlı harekete bağlı değişimi ile farklı koşullarda aynı değerleri almalarıdır.

$$F = f(U_c, D, \mu, \rho, a, U_m, h, g) \quad (3.42)$$

$$F = f\left(\underbrace{\frac{\rho U_c D}{\mu}}_{Re}, \underbrace{\frac{a}{D}}_{KC}, \underbrace{\frac{U_c}{U_m}}_{\alpha}, \frac{h}{D}, \underbrace{\frac{U_c}{\sqrt{g h}}}_{\frac{U_c}{U_*}}\right) \quad (3.43)$$

Kararlı akım ile dalga etkisinin ortamda birlikte görülmesi durumunda, akım ortamında yeralan silindir üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvetlerde gerek sadece dalga etkisinin görülmesi durumuna, gerekse kararlı akım durumuna göre önemli değişiklikler görülür. Bu konudaki çalışmalara, MOE ve VERLEY (1980), SARP KAYA ve STORM (1985), JUSTESEN ve diğ. (1987), BEARMAN ve OBSAJU (1989), LAMMERT ve diğ. (1989), SÜMER ve diğ. (1992) ve AVCI ve diğ. (1996) örnek olarak gösterilebilir.

Kararlı akım ve dalganın birlikte etkimesi durumunda, akım ortamında yeralan silindire etkiyen kuvvetlerdeki değişim Şekil 3.31'de görülebilir. SÜMER ve diğ. (1992) çalışmasından alınan bu şekilde kararlı akım, kanalda su sirkülasyonu sağlanarak, dalga hareketi ise silindirin bağlandığı bir arabanın su içerisinde hareket ettirilmesi ile sağlanmıştır.

Bu şeklin incelenmesinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

1) Akım doğrultusundaki kuvvetin zamanla değişimi (F_x), farklı kararlı akım-salınımlı akım oranları (α) gözönüne alınarak incelendiğinde, bu değişimin aynı α değeri için hızda görülen değişime benzediği görülür.

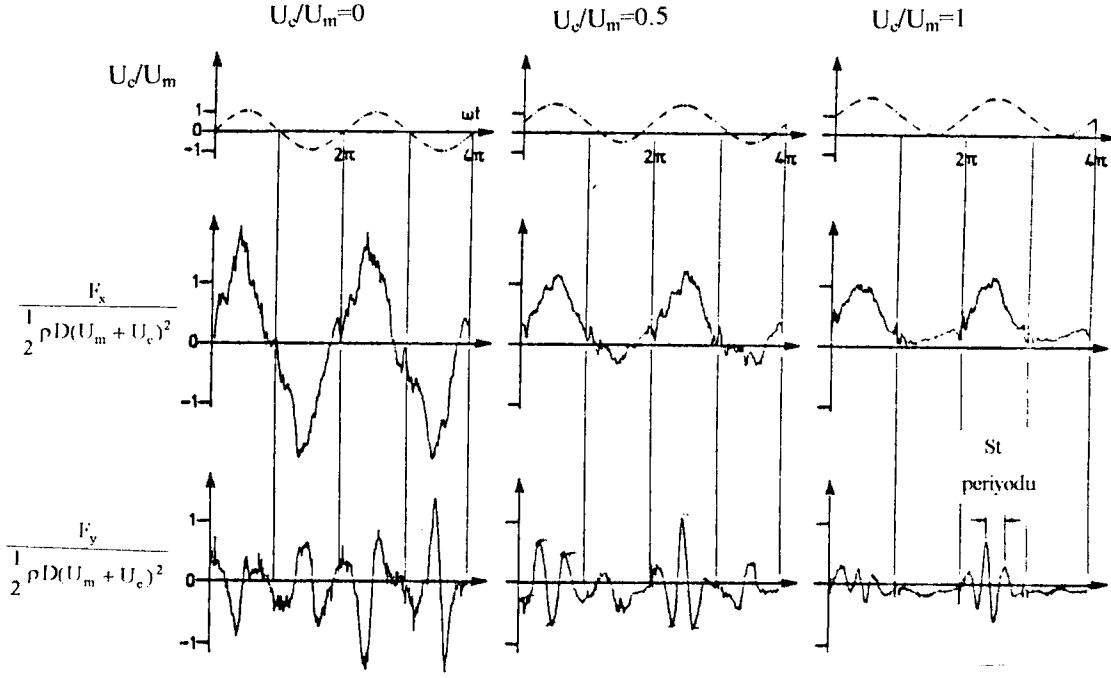
2) Şekilde α' nın üç değeri için (0, 0.5 ve 1) kaldırma kuvvetinin (F_y) zamanla değişimi görülmektedir. Şekilden görülen; salt dalga durumunda ($\alpha = 0$) salınımlı hareketin her iki periyodunda çevri kopması meydana gelmekte ve her yarı periyodda negatif ve pozitif kaldırma kuvvetinin pik olduğu platolar görülmektedir. $\alpha = 0.5$ değerinde, salınımlı hareketin kararlı akımın yönüne zıt doğrultudaki hareketinde, hız negatif değerlere ($U < 0$) düşmektedir. $\alpha = 0.5$ değerinde bu geri dönüş, henüz bu doğrultuda çevri kopmasını sağlayacak kadar uzundur. Silindirin alt ve üst tarafından birer çevri oluşmaktadır. Bu durum, bu yarı periyodda kaldırma kuvvetinde görülen bir negatif ve pozitif pik ile açıklanabilir (Şekil 3.31). $\alpha = 1$ değerinde ise, salınımlı harekette yaratılan geri dönüş, kararlı akım hızını frenleyememektedir. Bu nedenle bu yarı periyodda (salınımlı hareketin doğrultusunun, kararlı akımın yönüne zıt yönde olduğu periyod) çevri kopması oluşmaz. Bu durum, bu periyodda kaldırma kuvvetinin çalkantı bileşeni olmamasından da ileri gelebilir (Şekil 3.31). Bu durumda kararlı akım, ters yönde hareket ederek salınımlı hareket etkisini sağlayan silindirin iz bölgesinde alt ve üst tarafta oluşacak çevrilerin birbirlerini etkilemesini engeller; bu nedenle, bu periyodda çevri kopması meydana gelmez.

3) Çevri kopmasının olduğu yarı periyodda normalize edilmiş çevri kopması frekansına karşı gelen Strouhal sayısı (St);

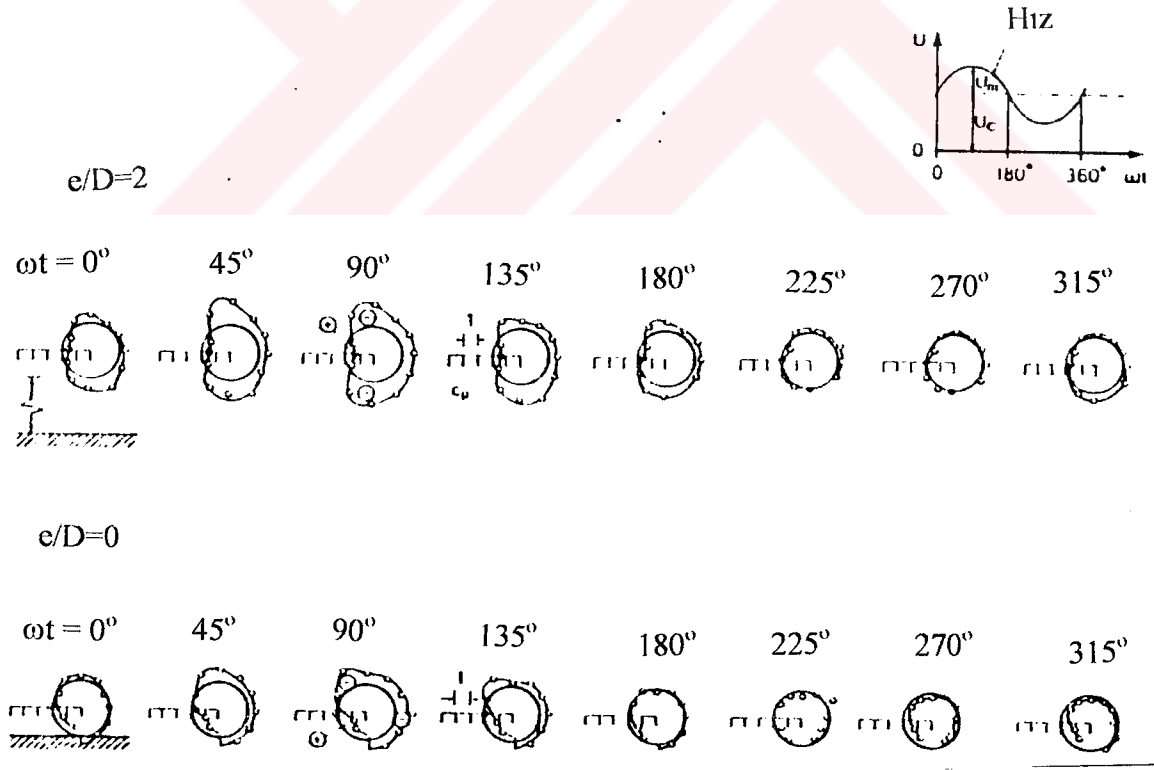
$$St = \frac{f_v D}{(U_c + U_m)} \quad (3.44)$$

şeklindedir. Strouhal sayısındaki hız bileşeni, denklemden de görüldüğü gibi kararlı akım hızı (U_c) ile dalganın yarattığı akım hızının toplamına eşittir.

Şekil 3.32'de, kararlı akım ve dalga etkisinin ortamda birlikte görülmesi durumunda $KC = 20$ değerinde silindir üzerindeki basınç dağılımı görülmektedir. Bu basınç dağılımlarına bağlı olarak silindire etkiyen kuvvetler belirlenebilir.



Şekil 3.31. Kararlı akım + dalga etkisinde silindire etkiyen kuvvetin zamanla değişimi ($KC = 20$); (SÜMER ve diğ. 1992).



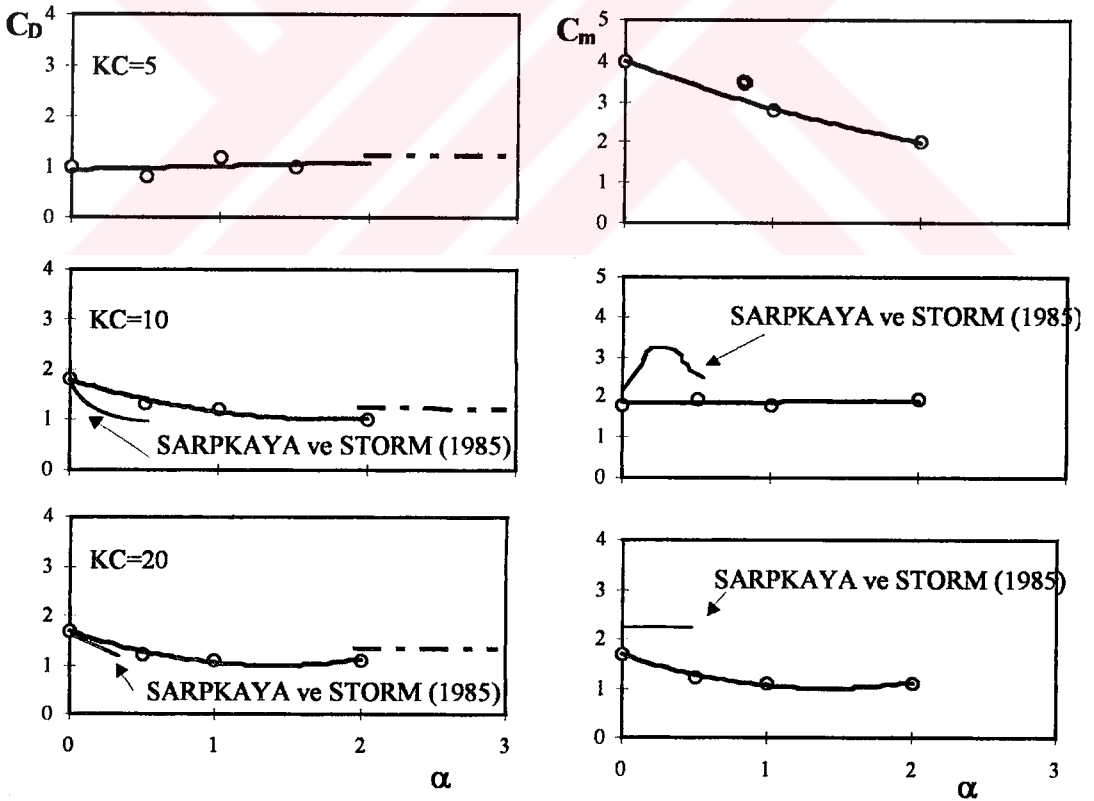
Şekil 3.32. Kararlı akım ve dalganın birlikte etkimesi durumunda silindir üzerindeki basınç dağılımının zamanla değişimi ($KC = 10$); (SÜMER ve diğ. 1992).

Akım doğrultusundaki kuvvet katsayılarının (C_D , C_M) hesabında, akım ve dalganın birlikte etkimesi durumunda, (3.23) denklemi ile verilen Morrison denklemleri kullanılabilir. Morrison denklemleri ile C_D ve C_M ' in hesabında denklemin hız teriminin akım + dalga durumuna göre uyarlanması gereklidir. Akım + dalga durumunda, belirli bir t anındaki hız (U_t);

$$U(t) = U_c + U_m \sin(\omega t) \quad (3.45)$$

şeklindedir.

Şekil 3.33'de C_D ve C_M ' in, sabit KC sayılarında (5, 10, 20), $\alpha(U_c/U_m)$ ile değişimi görülmektedir. Şekilden görülen, α değerleri arttırıldığında, C_D ' nin genel olarak azaldığıdır. Değişimin asimtot olduğu değerler (grafikte kesikli çizgi ile gösterilen)



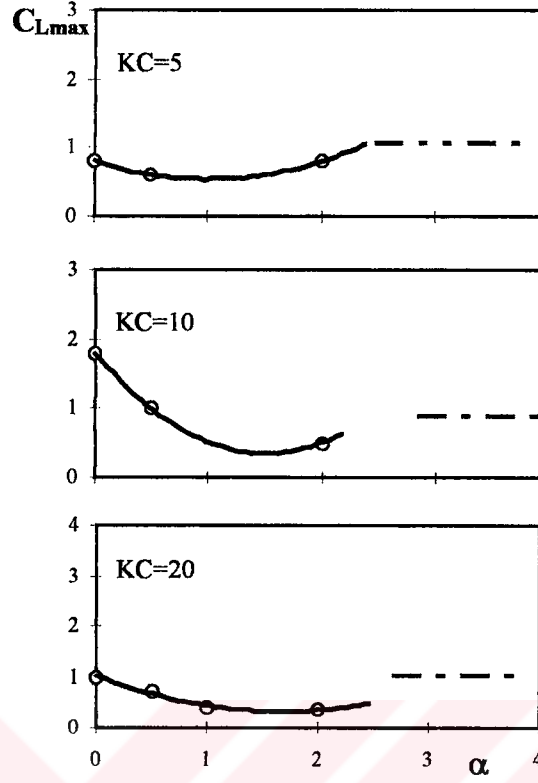
Şekil 3.33. Kararlı akım ve dalganın birlikte etkimesi durumunda, akım doğrultusundaki kuvvet katsayılarındaki değişim (SÜMER ve diğ. 1992);(SARPKAYA ve STORM 1985);(ACHENBACH ve HEINCHE 1981).

sadece kararlı akım etkisinde, aynı pürüzlülük ve Re sayısına sahip ($k/D = 4 \times 10^{-3}$, $k_s/D = 10 \times 10^{-3}$, $Re = 3 \times 10^4$) silindirdeki C_D değerleridir (ACHENBACH ve HEINCHE 1981). $KC = 10$ ve $KC = 20$ değerlerine sahip grafiklerde, nokta-nokta görülen değerler ise SARP KAYA ve STROM (1985)' un çalışmasından alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan silindirin yüzeyi pürüzsüz, Re sayısı 1.8×10^4 tür. Şekilde temel alınan çalışma ise SÜMER ve diğ. (1992) çalışmasıdır.

Akım doğrultusundaki diğer C_M kuvvet katsayısının α ile değişimi incelendiğinde ise, $KC = 5$ durumu hariç, C_M' de α ' nın değişmesi ile dikkate alınacak bir değişme görülmemektedir (Şekil 3.33). Şekilde nokta-nokta olarak gösterilen SARP KAYA ve STORM (1985)' un yaptığı çalışma ile bu çalışma arasında gözlenen farklılıklar, Re sayısının ve yüzey pürüzlülüğünün iki çalışmada farklı değerler alması nedeniyledir.

Kararlı akım ve dalganın birlikte etki ettiği durumda C_{LMAX} kaldırma kuvveti katsayısının α ile değişimi de sabit KC değerleri için Şekil 3.34'de verilmektedir. Burada kaldırma kuvveti katsayısı (C_{LMAX}), (2.78) denkleminde U_m yerine, $U_c + U_m$ konularak belirlenmiştir. Burada görüldüğü gibi, α arttıkça (C_{LMAX})'ın önemli ölçüde azalmaktadır. α değeri daha da arttırıldığında ve kararlı akım değerlerine yaklaştığında ise C_{LMAX} bir miktar artarak kararlı akımdaki C_{LMAX} değerine asimptot olur.

Bu sonuçlara göre, $\alpha = 1 \sim 2$ değerlerinde kuvvet katsayılarında genel olarak $\alpha = 0$ (sadece dalga durumu) durumuna göre bir azalma olduğu ve daha büyük α değerlerinde ise kararlı akımın, dalganın geri dönüş etkisini engellemesi ile birlikte kuvvet katsayılarının, kararlı akımdaki değerlere asimptot olduğu söylenebilir.



Şekil 3.34. Kararlı akım ve dalganın birlikte etkimesi durumunda, kaldırma kuvveti katsayısındaki değişim (SÜMER ve diğ. 1992).

3.10. DALGA ETKİSİNDE KATI CİDAR YAKININDAKİ SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIM ALANI VE SİLİNDİRE ETKİYEN KUVVETLER

Kararlı akım ortamında yeralan bir silindir (boru hattı, ulaştırma tüneli vb.) katı cidar yakınında yer aldığı anda, etrafındaki akım simetrikliğinin bozulması, çevri kopmasının bastırılması, akımın üniformluğunun bozulması gibi etkiler nedeni ile, etrafındaki akım alanında ve üzerine etkiyen kuvvetlerde değişiklikler meydana geldiği Bölüm 2' de belirtilmişti.

Bu tip etkiler, silindir salınımlı akım ile benzeştirilen dalga etkisi altında kaldığında da ortaya çıkar. Bu durumda oluşacak akım alanı ve silindir üzerindeki kuvvetler SÜMER ve diğ. (1991)'in çalışması temel alınarak açıklanmaya çalışılacaktır. Baz alınan bu çalışmada, akım izleme tekniklerinin kullanıldığı (flow visualization)

deneylerde Re sayısı 10^3 - 10^4 aralığında, kuvvet ölçümlerinin ele alındığı deneylerdeki Re sayısı ise 0.4×10^5 - 1.1×10^5 aralığında değişmektedir. Gözönüne alınan silindirin pürüzlülüğü k_s/D 10×10^{-3} tür.

3.10.1. Akım Rejimleri

4 < KC < 7 aralığındaki akım rejimi

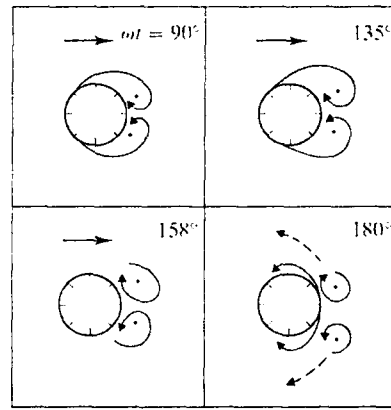
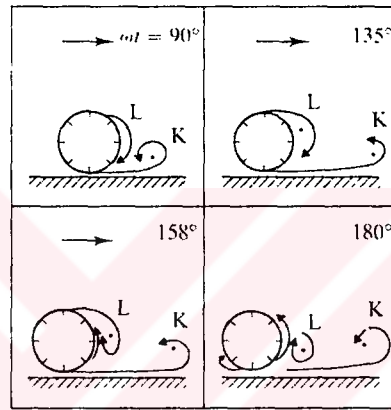
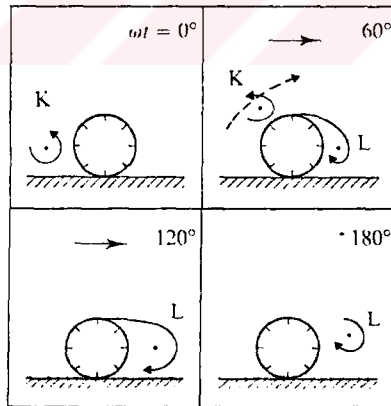
Şekil 3.35'de $KC = 4$ değeri için üç değişik duvara yakınlık durumunda ($e/D = 2, 0.1, 0$), silindir etrafındaki akım şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 3.35'de ($e/D = 2$) çevri oluşumundan da görüldüğü gibi akımda simetri vardır. Fakat aynı simetri Şekil 3.35b'de ($e/D = 0.1$) görülmemektedir. Bu durum Şekil 3.36'da verilen silindire etkileyen kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi incelendiğinde de görülmektedir. Şekil 3.36'dan görülen, $e/D = 2$ iken kaldırma kuvveti görülmezken, $e/D = 0.1$ değerini aldığı anda kaldırma kuvveti sıfırdan farklı değerler aldığıdır. Şekildeki kaldırma kuvveti katsayısı (C_L), (3.46)'daki ifade ile belirlenmiştir.

$$F_y = \frac{1}{2} \rho C_L D U_m^2 \quad (3.46)$$

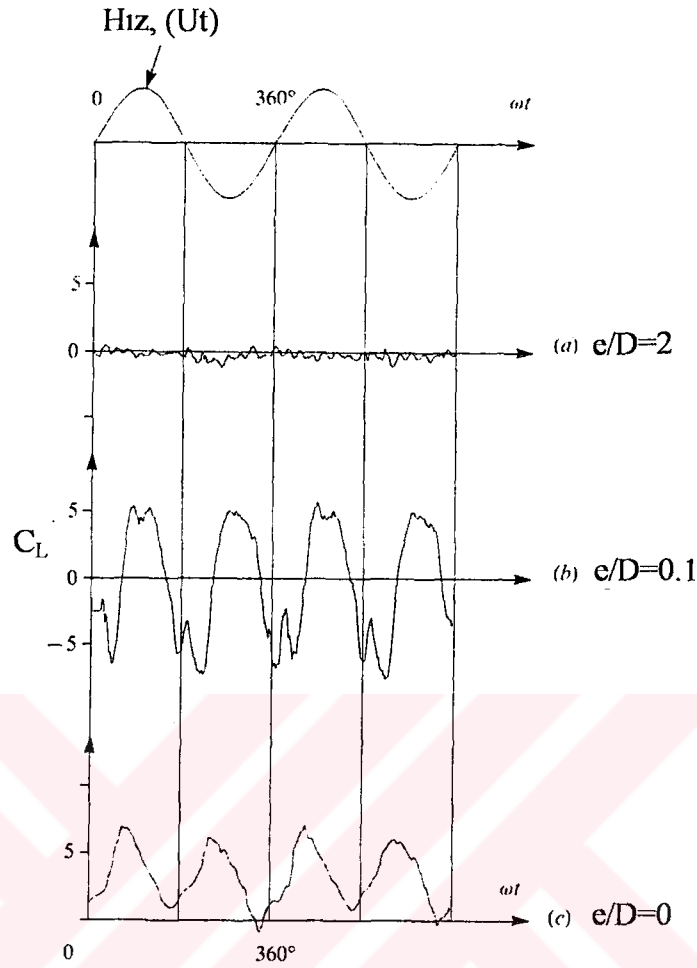
Tabana oturmuş silindir ($e/D = 0$) etrafındaki çevri oluşumu Şekil 3.35c'den görülebilir. Her yarı periyotta silindirin arka bölgesinde oluşan çevri, bir sonraki periyodun etkisi ile silindirden sökülerek uzaklaşır. Şekil 3.36c'den bu duruma ait ($e/D=0$) kaldırma kuvvetindeki değişim izlenebilir. Kaldırma kuvvetinde, bu çevrilerin silindirden kopması ile (Çevri K ve L) her yarı periyotta pik değerler oluşmaktadır (SÜMER ve diğ. 1991);(JENSEN ve diğ. 1989).

7 < KC < 15 aralığındaki akım rejimi

Silindirin katı cidardan etkilenmediği durumda bu aralıktaki akım rejiminde görülen en önemli yapı, çapraz çevri caddesidir. Bu durumda çevri caddesi akım yönüne dik


 $e/D=2$

 $e/D=0.1$

 $e/D=0$

Şekil 3.35. Silindir etrafında çevri hareketleri ($KC = 4$);(SÜMER ve diğ. 1991).



Şekil 3.36. Dalga etkisinde silindire etkiyen kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi, ($KC=4$);(SÜMER ve diğ. 1991).

doğrultuda gelişir (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). Fakat silindir katı cidara (tabana) çapından (D) daha az bir yakınlıkta yer aldığı bu çapraz çevri caddesi görülmez.

Şekil 3.37a ve Şekil 3.37b' den de görüleceği gibi, silindir tabana çap kadar yaklaştığında ($e/D = 1$) iki durum ortaya çıkar. Birincisinde e/D değeri kritik değerin üzerinde kalabilir, bu durumda çapraz iz bölgesi rejimi ortaya çıkar. İkincisi yine bu açıklık durumunda ($e/D = 1$) Şekil 3.37b' de görülen durum meydana gelebilir. Bu durumda çapraz çevri caddesi, iz bölgesinde akıma paralel doğrultuda gelişir. Değişik e/D durumlarında akımdaki yapı incelenirse;

a) Şekil 3.38a'da, $e/D = 1$ değeri için salınımlı hareketin bir yarı periyodunda, silindir etrafındaki çevri hareketi zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 3.39b' den de bu durumda kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi görülebilir. Şekil 3.38a' da salınımlı hareketin yarı periyodunda sadece bir çevrinin (Çevri L) meydana geldiği görülmektedir. Kaldırma kuvvetinde, bu yarı periyodda görülen negatif pik (B noktası) K çevrisinin $\omega t = 0^\circ \sim 45^\circ$ değerleri arasındaki gelişmesi sonucunda ortaya çıkar (MAULL ve MILLINER 1978). K çevrisi silindir üzerinden koptuğu anda silindire etkileyen kaldırma kuvveti pozitif değerler almaya başlar. L çevrisinin gelişmesi ile pozitif kaldırma kuvveti değerleri de büyür ve kaldırma kuvveti maksimum değerine ulaşır (Şekil 3.39b, C noktası). L çevrisi silindirden kopup uzaklaşmaya başladığında ($\omega t = 135^\circ \sim 150^\circ$), kaldırma kuvvetinin pozitif değerleri de küçülmeye başlar.

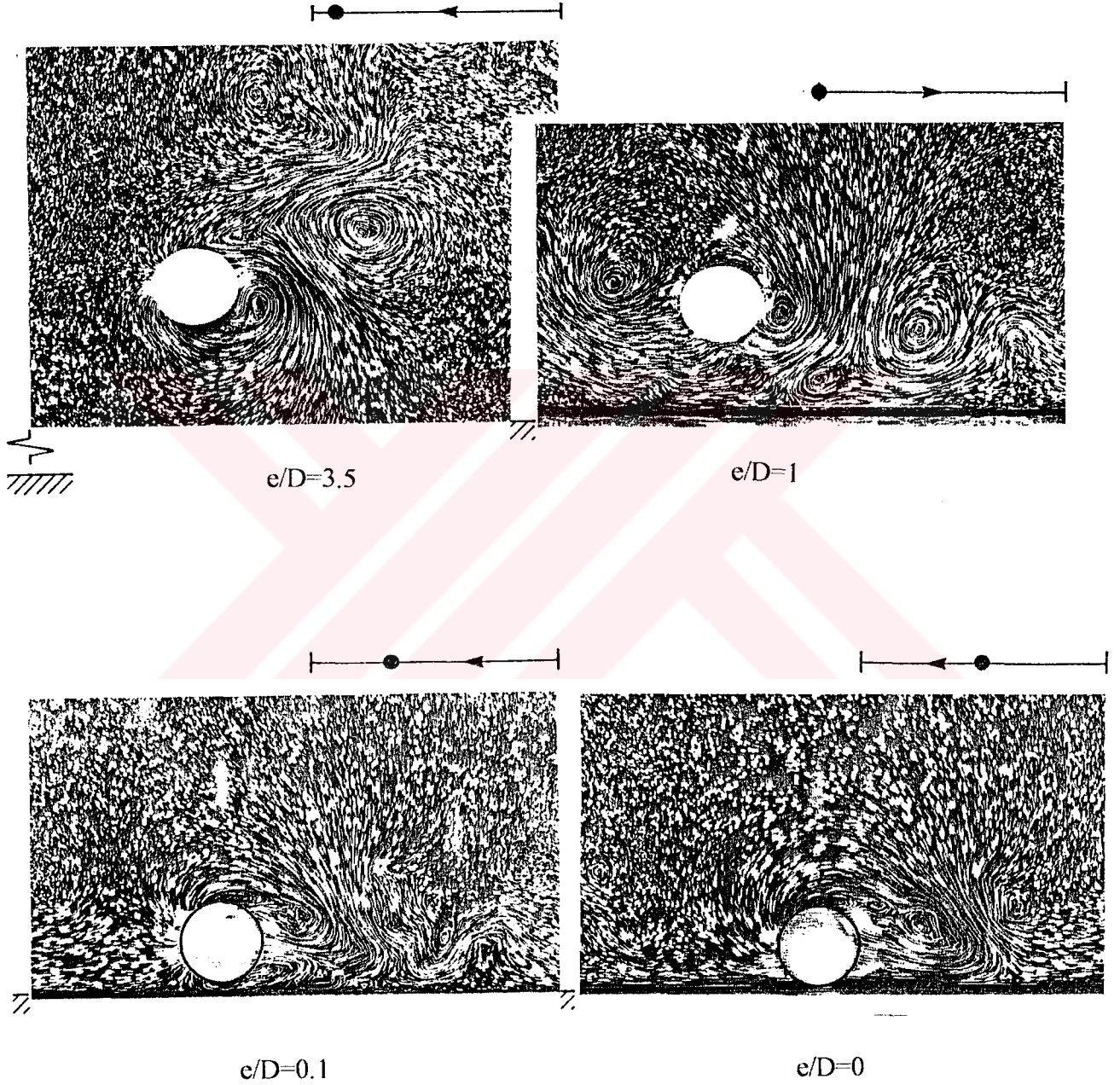
$e/D = 1$ ve $7 < KC < 15$ koşullarındaki kaldırma kuvvetinin zamanla değişiminin, $e/D = \infty$ ve $7 < KC < 13$ koşullarındaki kaldırma kuvvetinin zamanla değişiminden farklıdır (Şekil 3.39a). Bunun nedeni bu iki durumda çevri hareketlerinin tamamem farklı durumda olmasıdır.

b) $e/D = 0.1$ durumu: bir önceki duruma göre ($e/D = 1$) bu durumdaki en büyük fark, burada katı cidar tarafındaki çevrinin (Çevri N) daha çabuk oluşmasıdır. Daha önceki çevrinin (Çevri L), serbest yüzdeki çevri tarafından (Çevri M) koparılıp silindirden uzaklaşması ile bu yeni çevri oluşmaya başlar (Çevri N);(Şekil 3.38b).

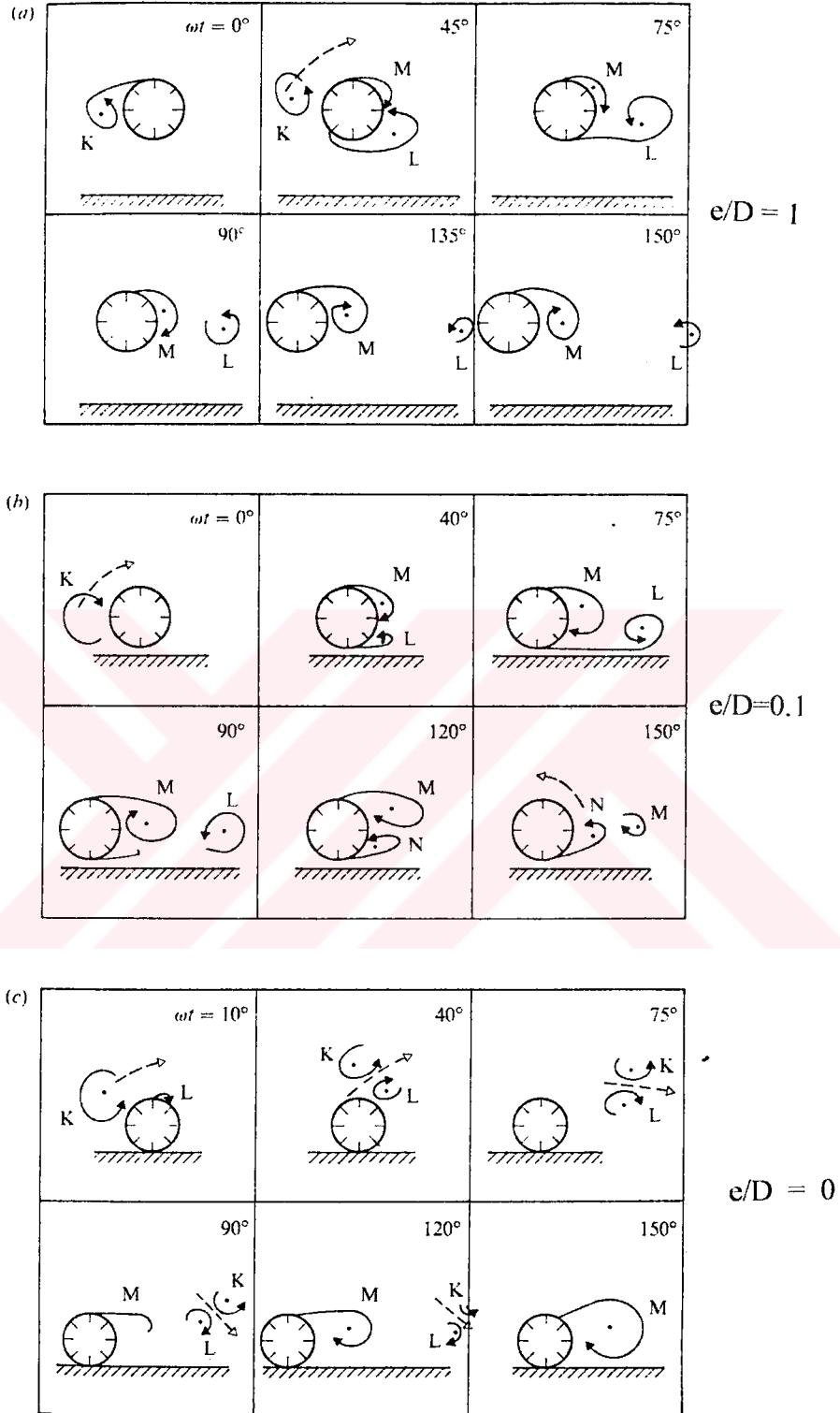
$e/D = 0.1$ durumunda, kaldırma kuvvetinin zamanla değişmesinde görülen pozitif pik değer (Şekil 3.39c, D noktası) L çevrisinin gelişmesi sonucunda görülür. Şekildeki negatif pik değerinin (Şekil 3.39c, E noktası) sebebi ise, çevri gelişirken çevrinin tabana yakınlık nedeniyle taban ile silindir arasında meydana gelecek yüksek hızlar ile birlikte davranmasıdır.

c) $e/D = 0$ durumu: bu durumda bir önceki periyodda silindirin arka kısmında gelişmiş olan çevri (Çevri K) ile yeni oluşmaya başlayan çevri (Çevri L) bir çevri

çifti oluşturarak kendi yarattıkları hız alanı ile birlikte silindir mansabına doğru kararlı bir şekilde hareket ederler (Şekil 3.38c, $\omega t = 40^\circ \sim 120^\circ$). L çevrisi ile aynı yönde yeni bir çevri (Çevri M) silindirin arka kısmında gelişmeye başlar ($\omega t = 90^\circ \sim 150^\circ$).



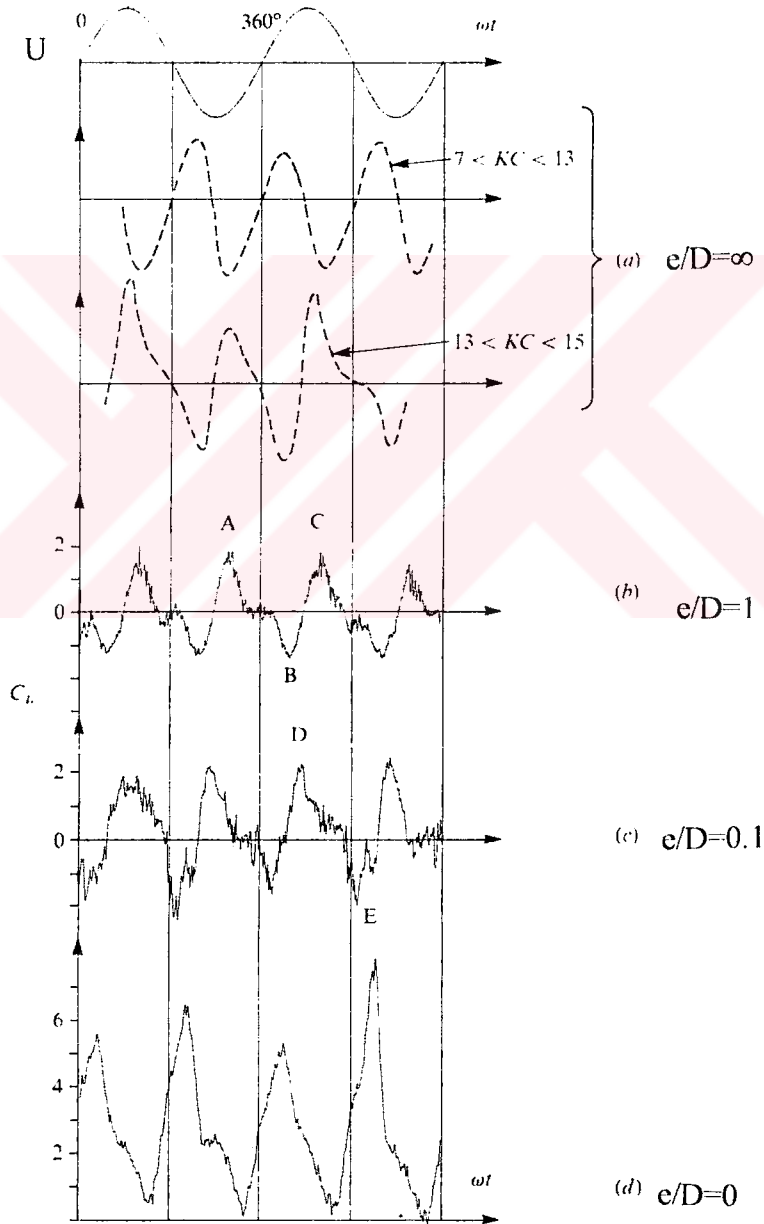
Şekil 3.37. Silindirin katı cidara göre değişik konumlarında çevri hareketleri ($KC = 10$);(SÜMER ve diğ. 1991).



Şekil 3.38. $7 < KC < 15$ arası akım rejimlerinde silindir etrafında çevri hareketleri ($KC = 10$); (SÜMER ve diğ. 1991).

Akım izleme teknikleri ile yapılan gözlemler, katı cidara oturmuş silindir ($e/D = 0$) durumunda, silindir etrafındaki akımın KC sayısının değişimi ile önemli bir değişikliğe uğramadığını göstermektedir. Bununla birlikte farklı KC sayılarında bazı değişiklikler (çevri çiftinin oluşma şekli ve farklı ωt değerlerinde görülmeleri gibi) görülebilir.

$e/D = 0$ durumunda, kaldırma kuvvetinde görülen pik, K çevrisinin silindir üzerinden geçmekte iken oluşmaktadır (Şekil 3.39d).



Şekil 3.39. $7 < KC < 15$ arası akım rejimlerinde kaldırma kuvvetinin değişik e/D oranlarında değişimi ($KC = 10$); (SÜMER ve diğ. 1991); (WILLIAMSON 1985).

15 < KC < 24 aralığındaki akım rejimi

a) $e/D = 1$ durumu: bu KC rejiminde, silindir katı cidardan bağımsız ($e/D = \infty$) olduğu sürece salınımlı hareketin herbir yarı periyodu arasında çevri oluşumunda simetri yoktur (Şekil 3.7). Aynı durum $e/D = 1'$ de söz konusudur (Şekil 3.40a). Bu akım rejiminde, hareketin herbir yarı periyodunda, silindirin katı cidar ve cidardan uzak tarafında bir çevri meydana gelerek silindirden sökülür (Şekil 3.40a).

Kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi de bu asimetrik çevri kopması durumunu desteklemektedir (Şekil 3.41b).

b) $e/D = 0.1$ durumu: bu durumda, bir önceki durumda gözlenen herbir yarı periyod arasındaki asimetrik oluşum gözlenmez. Katı cidar tarafında oluşan çevri (Şekil 3.40b Çevri P), akımın ikinci yarı periyodda ters yönde harekete başlamadan önce silindirden kopar.

$e/D = 0.1$ durumunda silindire etkiyen kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi Şekil 3.41c'den incelendiğinde, bu kuvvetin çoğunlukla duvardan yukarı doğru olduğu görülür. Aynı zamanda kaldırma kuvvetinde kısa zaman aralığında ardarda pik değerler görülür (Şekil 3.41c. F ve G noktaları). Akım izleme deneyleri sonucunda bu pik değerlerin, duvar tarafındaki çevri kopması ile ilişkili olduğu gözlenmiştir. Kaldırma kuvvetinde görülen pik değerlerin duvar tarafında çevri oluşması sırasında görülmesi bu yüzdendir (Şekil 3.40b, $\omega t = 50-60$ ve $\omega t = 80-93$).

Şekil 3.42'de kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi, değişik e/D oranları ($0.05 \leq e/D \leq 0.4$) için görülmektedir. Silindirin katı cidara yakınlık oranı (e/D), yaklaşık olarak 0.3' ten daha küçük değerler aldığı anda, kaldırma kuvveti asimetrik olmaya ve duvardan yukarıya doğru değerler almaya başlar. Kaldırma kuvvetinde, bu durumda ($e/D \leq 0.3$) kısa zaman aralığında pik değerler görülür. Bu pik değerleri, çok belirgin olmamakla birlikte $e/D = 0.05$ değerinde bile görülmektedir. Bu kısa zaman aralık piklerin görülmesi, dalga hareketinde (salınımlı hareket) çok küçük yakınlık

oranlarında ($e/D = 0.1$) çevri kopmasının görülebileceğini göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken konu, kararlı akım etkisi altında taban yakındaki bir silindirde $e/D = 0.3$ değerinden daha küçük yakınlık oranlarında çevri kopmasının meydana gelmediği ve bastırıldığıdır (Bölüm 2.2.2).

c) $e/D = 0$ durumu: Şekil 3.40c' den de görüleceği gibi, bu durumda akımdaki değişim bir önceki KC rejimi ($7 < KC < 15$) ile tamamen aynıdır (Şekil 3.38c ve Şekil 3.40c).

Bununla birlikte, oluşan çevri çiftinin akım içindeki hareketi diğer KC rejimine göre daha büyük olmaktadır.

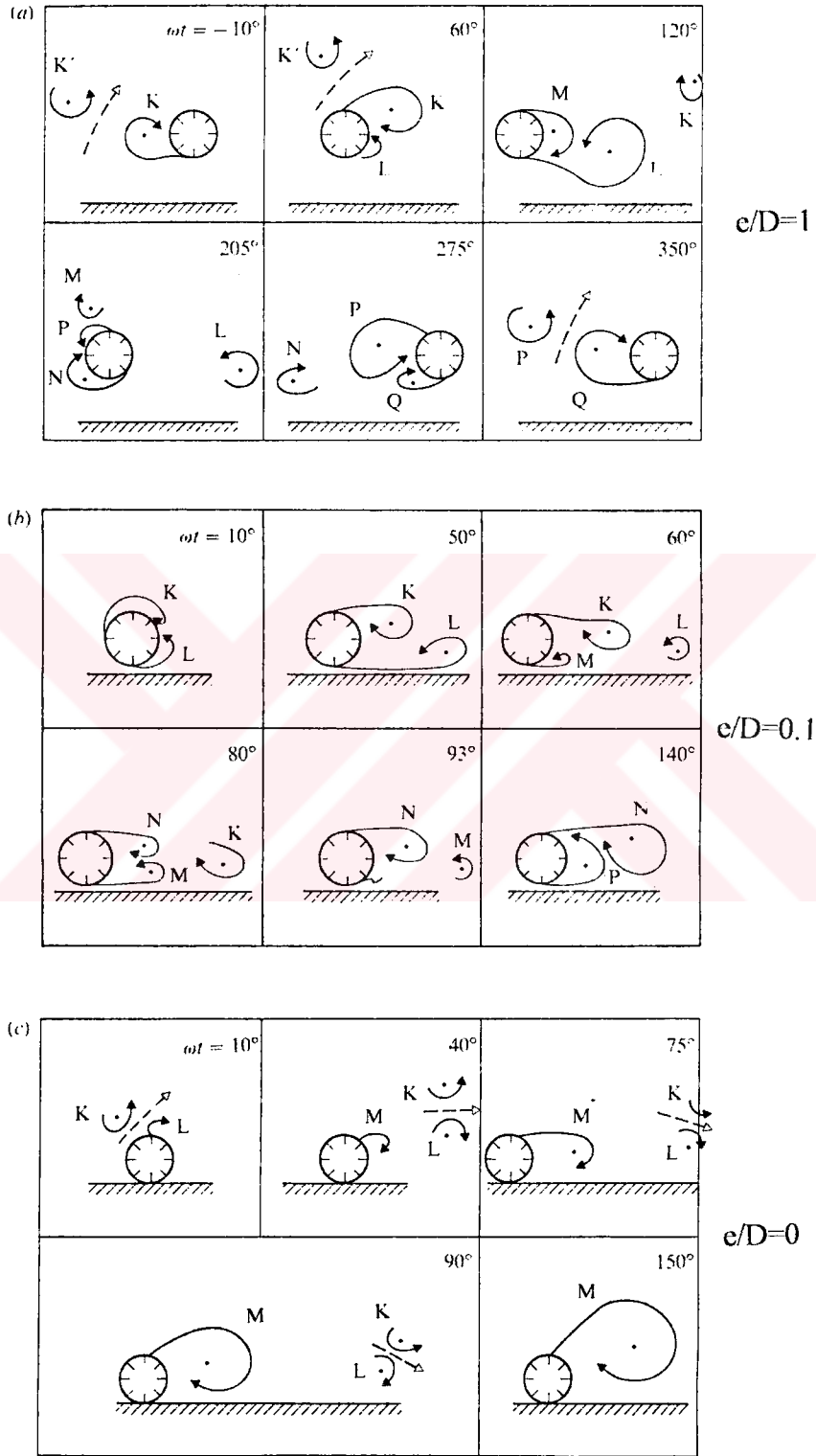
$e/D = 0$ durumunda silindire etkiyen kaldırma kuvveti, $e/D = 0$ ve $7 < KC < 15$ aralığında silindire etkiyen kaldırma kuvvetiyle aynı özelliği taşımaktadır (Şekil 3.39d ve Şekil 3.41d). Arada göze çarpan en önemli fark, bu akım rejiminde ($15 < KC < 24$) kaldırma kuvvetindeki piklerin rejime göre daha erken görülmesidir.

KC > 24 aralığındaki akım rejimi

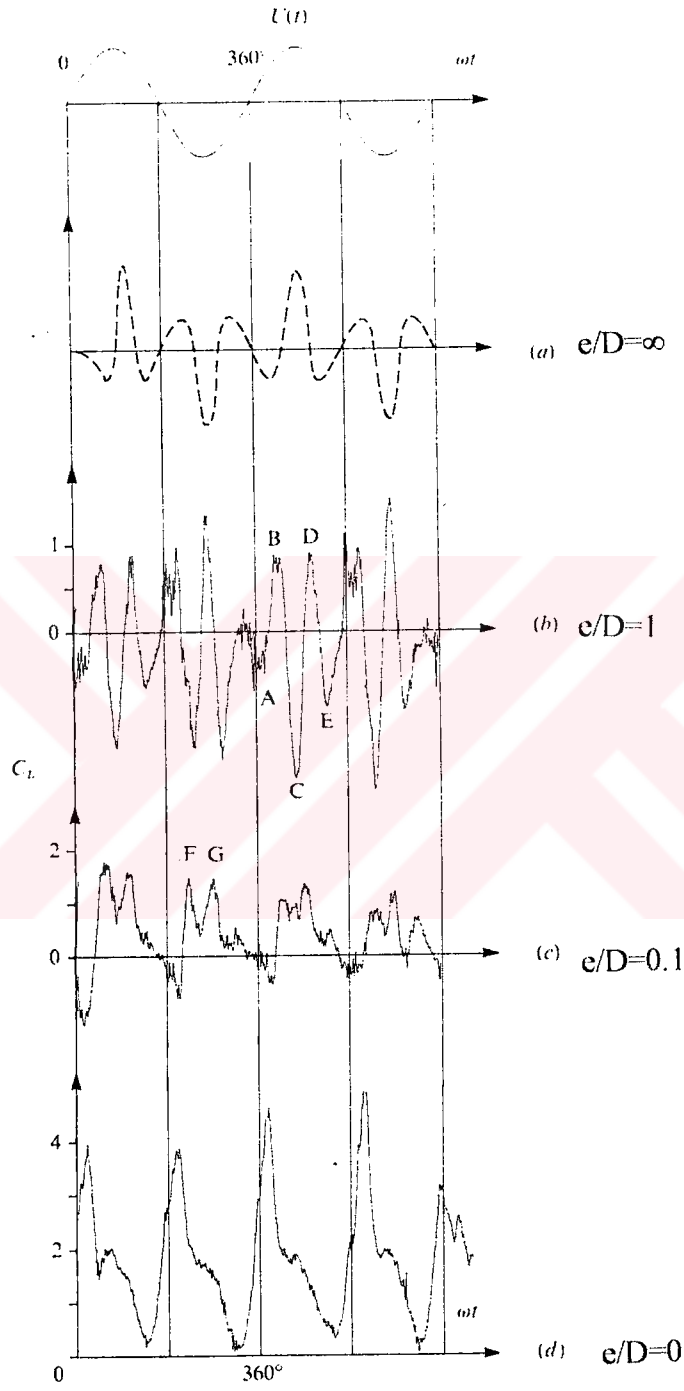
Akım izleme teknikleri ile yapılan deneyler, $KC = 24$ değerinden büyük KC sayılarında, akım yapısındaki farkın sadece kopan çevri sayısının değişiminden ibaret olduğunu ve bunun dışında akımın temel yapısında bir değişiklik olmadığını göstermektedir (SÜMER ve diğ. 1991);(WILLIAMSON 1985).

Çevri Kopması

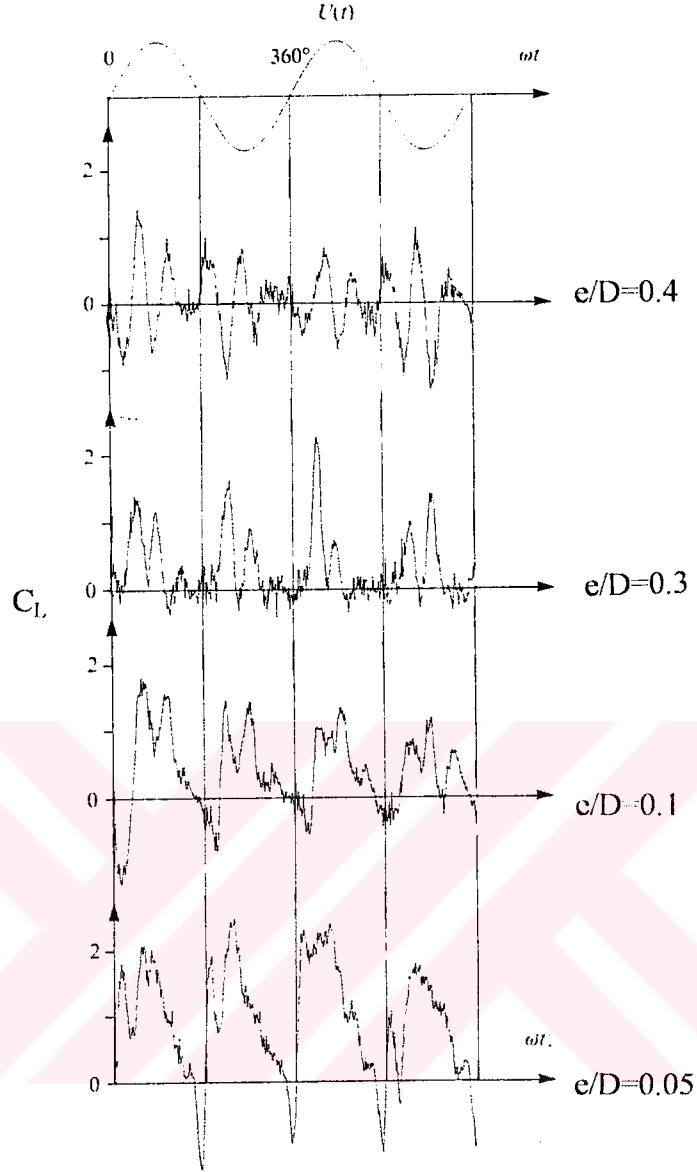
Akım izleme tekniklerinin kullanıldığı görüntüler ve kaldırma kuvvetinin değişimi incelenerek, küçük açıklık oranlarında (e/D) çevri kopmasının bastırıldığı görülebilir. Şekil 3.43'te bu gözlem sonuçlarına göre çevri kopmasının olduğu yada bastırıldığı bölgeler belirtilmiştir (SÜMER ve diğ. 1991);(BEARMAN ve ZDRAVKOVICH 1978);(GRASS ve diğ. 1984). Bu şekil incelenerek salınlı harekette e/D oranı ile çevri kopması arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde açıklanabilir.



Şekil 3.40. $15 < KC < 24$ aralığında çevri hareketleri ($KC = 20$); (SÜMER ve diğ. 1992).



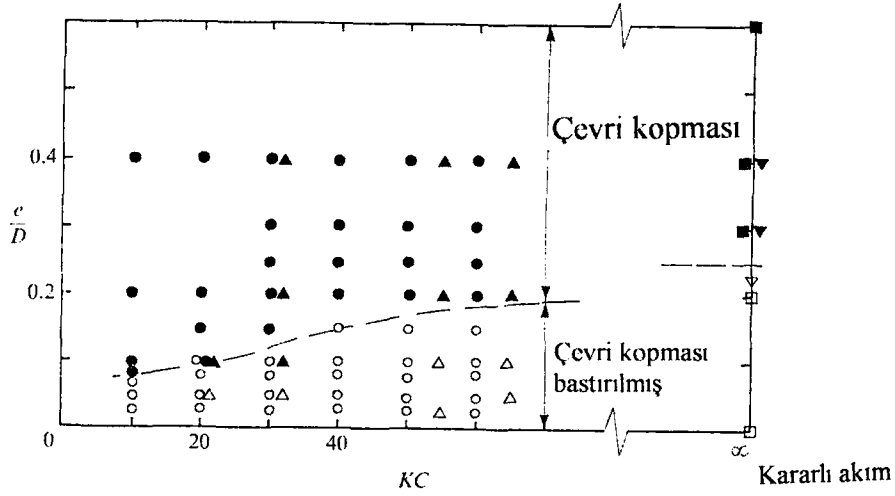
Şekil 3.41. $15 < KC < 24$ arası akım rejimlerinde kaldırma kuvvetinin değişimi ($KC = 20$); (SÜMER ve diğ. 1992).



Şekil 3.42. $0.05 \leq e/D \leq 0.4$ ve $15 < KC < 24$ arası akım rejimlerinde kaldırma kuvvetinin değişimi, (SÜMER ve diğ. 1992).

a) Büyük KC sayılarında kritik değer olarak $e/D = 0.25$ değeri görülmektedir. Bu değer altında çevri kopması bastırılmakta, bundan büyük değerlerde ise çevri kopması oluşmaktadır. Bu değer BEARMAN ve ZDRAVKOVICH (1978) ve GRASS ve diğ. (1984)'ün kararlı akım ile belirledikleri kritik değere yakındır.

b) Şekil 3.43'de görülen ve çevri kopması ile çevri kopmasının bastırıldığı rejimleri gösteren ayırım çizgisi bu kadar kesin bir çizgi şeklinde değildir. Bununla birlikte



Şekil 3.43. e/D ve KC ' nin değişimi ile çevri kopmasının bastırıldığı bölgeler (SÜMER ve diğ. 1991).

genel eğilim, KC ' nin değeri küçüldükçe, çevri kopması daha küçük yakınlık oranlarında (e/D) meydana gelmektedir. Çevri kopması, $KC = 10 \sim 20$ arasında oldukça küçük sayılabilecek, $e/D = 0.1$ gibi değerlerde bile meydana gelebilir.

Şekil 3.37c'de akımdaki değişim ve Şekil 3.42c'de kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi birlikte değerlendirildiğinde, gözlenen kısa periyodlu kaldırma kuvvetindeki piklerin nedeninin, çevri kopması olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi, küçük KC sayılarında duvar ile silindirin arasından kararlı akım durumuna göre daha fazla akışkan geçişi olmasıdır (debi artar). Çünkü küçük KC sayılarında dalganın oluşturacağı sınır tabakasının kalınlığı daha incedir. Bu çalışmada dalganın yaratacağı sınır tabakası kalınlığı oranı (δ/D) 0.01 ile 0.16 arasındadır (SÜMER ve diğ. 1991).

Çevri kopması frekansının, e/D ile değişim grafiği Şekil 3.44'de görülmektedir. Şekilde Strouhal sayısının hesabında hız olarak salınımlı hareketteki maksimum hız değeri (U_m) alınmıştır. Burada Strouhal sayısında belirli olan periyod (dalga periyodu) üzerindeki kısa zamanlı piklerin frekansı (f_v) gözönüne alınmıştır.

Strouhal sayısı bu durum için aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

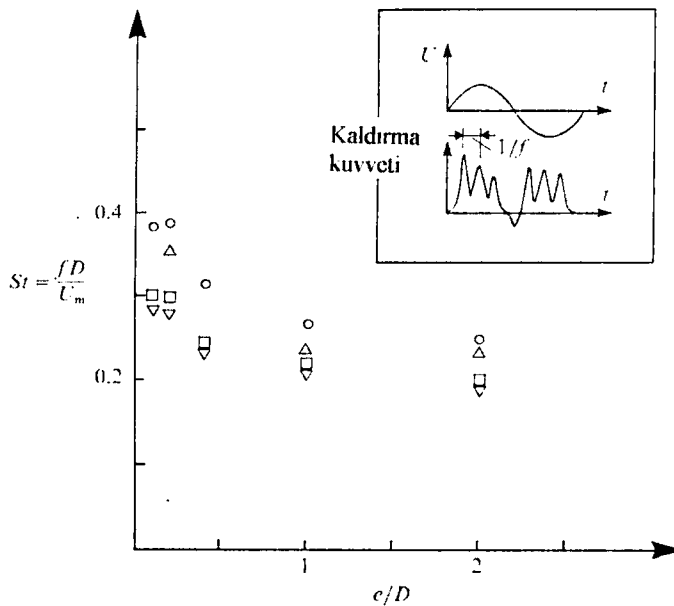
$$St = \frac{f_v D}{U_m} \quad (3.47)$$

Şekil 3.45'de, GRASS ve diğ. (1984), RAVEN ve diğ. (1985) ve SÜMER ve diğ. (1991)' in çalışmalarında Strouhal sayısının (St), büyük KC sayılarında ($KC = 20, 30, 55, 65$), duvardan uzak silindir durumundaki Strouhal sayısına (St_0) oranının e/D ile değişimi görülmektedir. Şekilde görülen GRASS ve diğ. (1984) ve RAVEN ve diğ. (1985)' in çalışmalarındaki St sayısı kararlı akım durumu içindir.

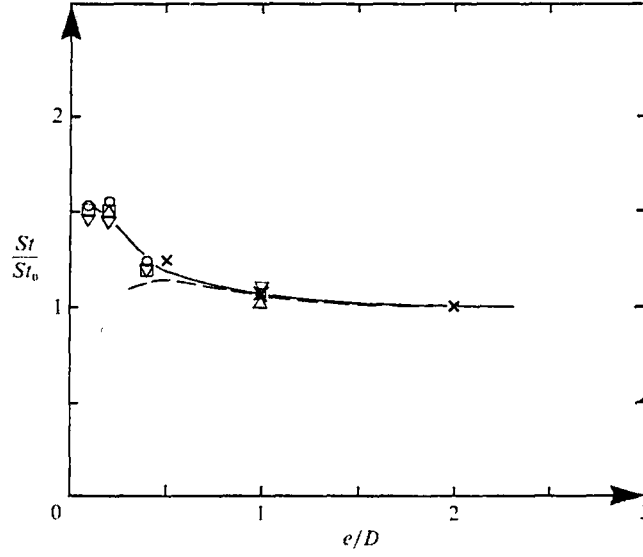
Şekil 3.44 ve Şekil 3.45 incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

a) Belirli bir e/D oranında, St sayısı artarken, KC sayısında azalma görülmektedir (Şekil 3.44).

b) Şekil 3.45'de, e/D oranı azaldıkça St sayısının değeri artmaktadır. St sayısındaki bu artış, $e/D = 2$ durumuna göre %50 kadar daha büyüktür (Şekil 3.45). Bunun sebebi, $e/D = 0.1 \sim 0.2$ gibi değerler ile duvar tarafında oluşan çevrinin serbest taraftaki çevri ile daha çabuk etkileşmesidir. Bu hızlı etkileşim St sayısının değerini artırır.



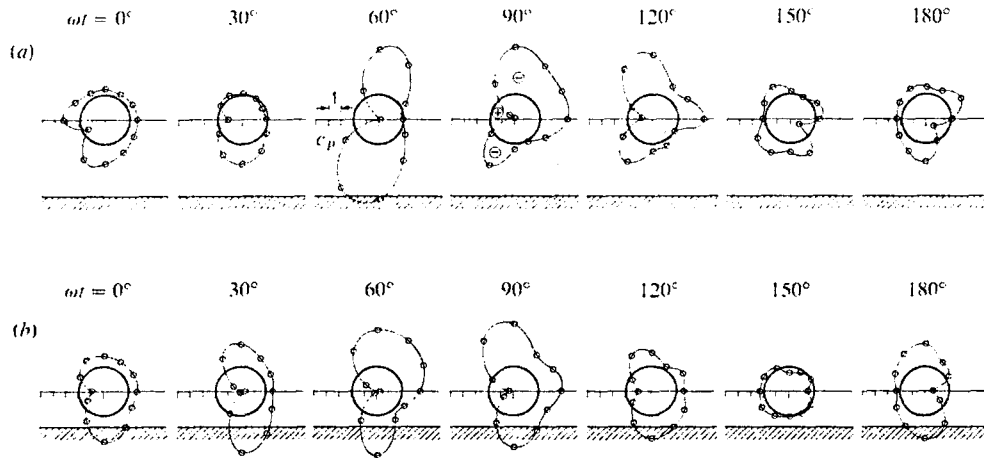
Şekil 3.44. Strouhal sayısının e/D ile değişimi (SÜMER ve diğ. 1991).



Şekil 3.45. Normalize edilmiş Strouhal sayısının e/D ile değişimi, (SÜMER ve diğ. 1991).

3.10.2. Katı Cidar Yakınındaki Silindirde Kuvvet Sabitleri

Katı cidar yakınındaki salınımlı hareket etkisindeki silindir etrafındaki basınç dağılımının, değişik e/D oranları için, ωt ile değişimi Şekil 3.46 ve Şekil 3.47'de görülmektedir. Şekil 3.46'da KC sayısının değeri 10, Şekil 3.47'da ise 20' dir.

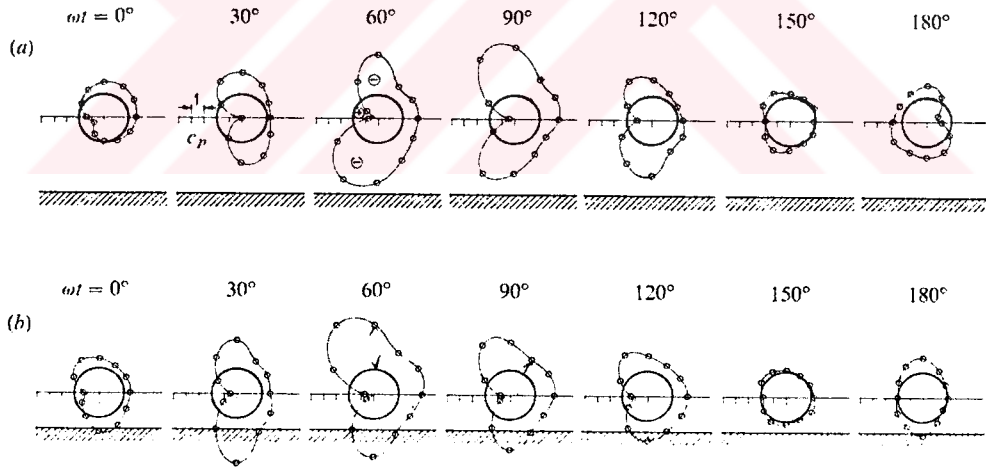


Şekil 3.46. Salınımlı akım durumunda, katı cidar yakınında silindir üzerindeki basınç dağılımının değişimi, $KC = 10$, (SÜMER ve diğ. 1991).

Bu basınç dağılımları sonucunda silindire etkiyen kuvvetler belirlenerek, akım doğrultusunda (C_D ve C_M) ve akıma dik doğrultudaki (C_{LA} ve C_{LT}) kuvvet sabitlerinin, silindirin katı cidara değişik yakınlık oranları ve KC ile değişimi Şekil 3.48 ve Şekil 3.49'da verilmiştir. Şekillerdeki değerler SÜMER ve diğ. (1991), SARPKAYA (1977) ve SARPKAYA ve RAJABI (1979)' nin deneysel çalışmalarından elde edilmiştir. Şekillerde $e/D=0$ durumunda, YAMAMOTO ve diğ. (1974)' un potansiyel akım kabulü ile yaptığı çalışmanın sonuçları da görülmektedir. Kaldırma kuvveti katsayısı olarak gözönüne alınan C_{LA} ve C_{LT} aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$F_{yA} = \frac{1}{2} \rho C_{LA} D U_m^2 \quad F_{yT} = \frac{1}{2} \rho C_{LT} D U_m^2 \quad (3.48)$$

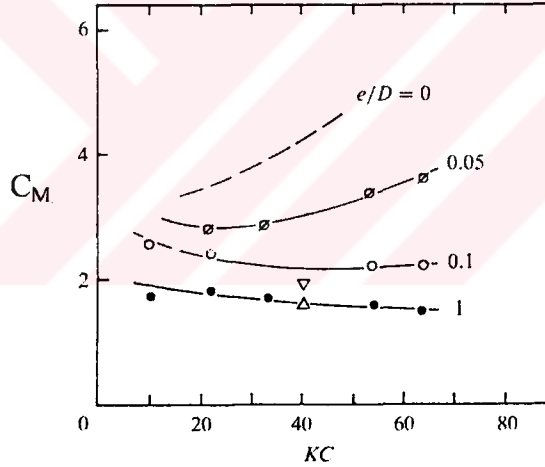
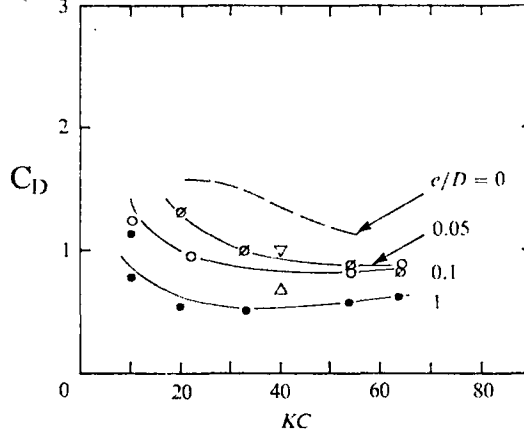
Bu ifadede F_{yA} , duvardan yukarı doğru oluşan kaldırma kuvvetinin maksimum değeri F_{yT} ise duvara doğru oluşan akıma dik doğrultudaki kuvvetin en büyük değeridir.



Şekil 3.47. Salınlımlı akım durumunda, katı cidar yakınında silindir üzerindeki basınç dağılımının değişimi ($KC = 20$);(SÜMER ve diğ. 1991).

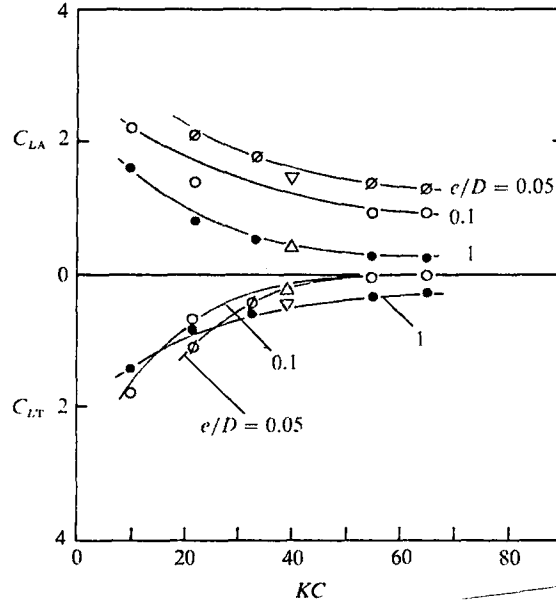
Şekillerden görülen, C_D , C_M ve C_{LA} kuvvet katsayılarının, e/D oranının azalması ile artmalarıdır. Bu durum küçük KC sayılarında ($KC < 10$), C_{LT} için de bu şekildedir. Bundan büyük KC sayılarında ($KC > 10$) C_{LT} 'nin çok küçüldüğü açık olarak görülmemektedir (Şekil 3.49).

Potansiyel teori kabulü ile belirlenen C_M katsayısı, (YAMAMOTO ve diğ. 1974) deneysel sonuçlarla karşılaştırılırsa; KC yaklaşık sıfır değerinde deneysel sonuçlar ile aynı olmaktadır. Bunun sebebi küçük KC sayılarında ayrılmanın olmamasıdır. Bu nedenle KC 'nin değeri sıfıra doğru azaldıkça, potansiyel teori doğruya yakın sonuçlar verecektir (DURSTHOFF ve MAZURHIEVICH 1988).



Şekil 3.48. Sürüklenme kuvveti ve atalet kuvveti sabitlerinin (C_D , C_M), katı cidar yakınındaki bir silindirde KC ile değişimi, $Re = 0.8 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5$, (SÜMER ve diğ. 1991); (YAMAMOTO ve diğ. 1974).

Tabana oturan salınımlı hareket etkisindeki silindire etkiyen kaldırma kuvveti, $e/D = 0$ durumunda daima pozitif (pozitif yön katı cidardan akıma doğru) değerler alır (Şekil 3.36c, 3.39d ve 3.41d). Bu e/D oranında $C_{L,T}$ değeri sıfırdır. Silindirin katı cidarla arasında çok az bir açıklık olduğu anda ($e/D = 0.05 \sim 0.1$) kaldırma kuvvetinde pozitif değerlerin yanısıra, negatif değerlere de rastlanır (Şekil 3.36b, 3.39c, 3.41c ve 3.42d).

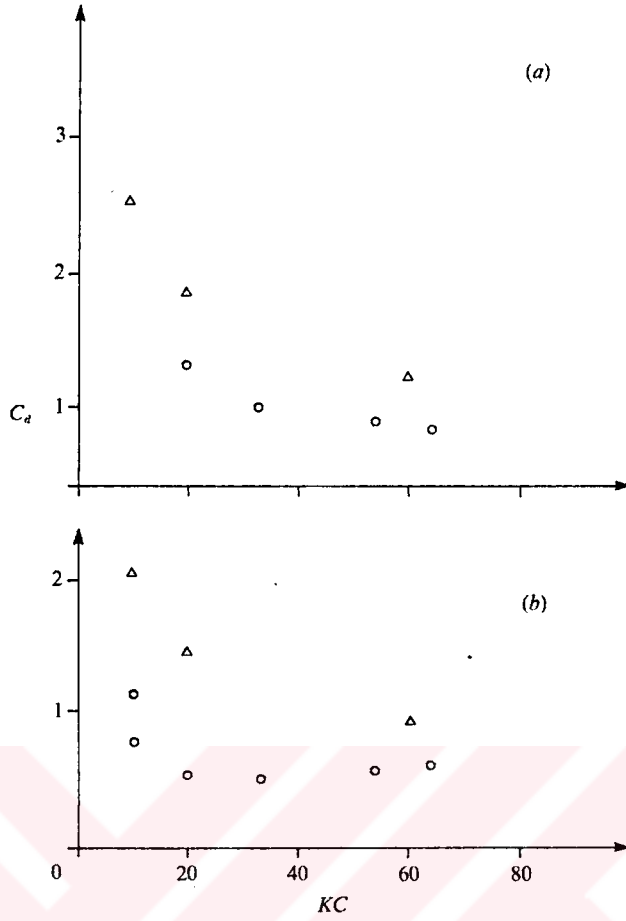


Şekil 3.49. Kaldırma kuvveti sabitlerinin (C_{LA} , C_{LT}), katı cidar yakınındaki bir silindirde KC ile değişimi ($Re=0.8 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5$); (SÜMER ve diğ. 1991).

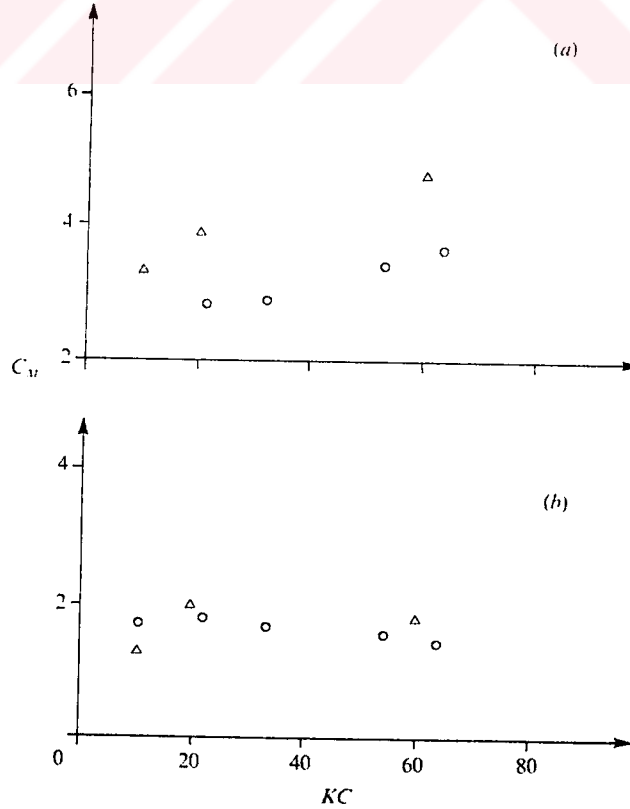
Pürüzlülüğün etkisi

Şekil 3.50, 3.51 ve 3.52'de, kuvvet katsayılarının (C_D , C_M , C_{LA} ve C_{LT}) silindir yüzeyinin pürüzsüz ve pürüzlü olması durumunda, katı cidar yakınlık oranının 0.05 ve 1 için, KC ile değişimi görülmektedir. Şekil 3.50'den görülen, silindir yüzey pürüzlülüğü, pürüzsüzden pürüzlüye doğru değiştiğinde C_D değerlerinin artmasıdır (SÜMER ve diğ. 1991). Bu sonuçlar SARP KAYA (1976a)'nın duvardan bağımsız ($e/D = 0$) silindir için elde ettiği sonuçlarla uyum göstermektedir ($Re = 10^5$).

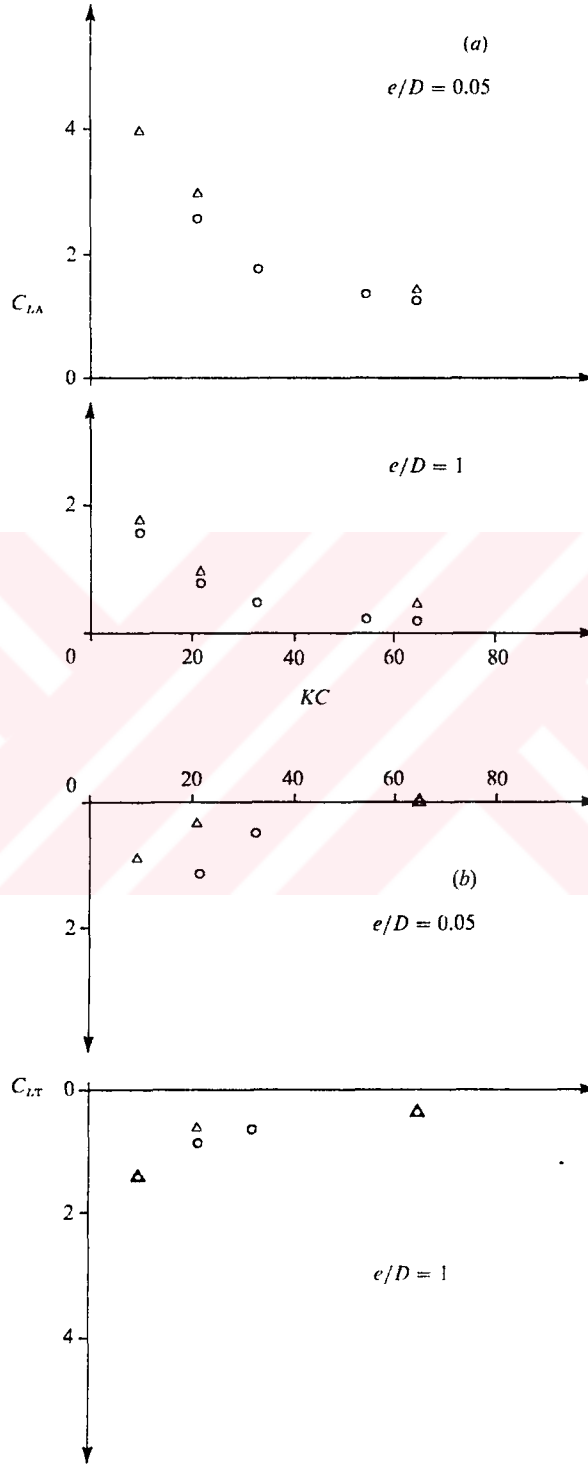
Şekil 3.51 incelendiğinde, $e/D=1$ durumunda silindirin pürüzlü yüzeye sahip olup olmamasının, C_M ' in değişiminde belirgin bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir. Buna karşılık $e/D = 0.05$ durumunda, silindirin yüzey pürüzlülüğü pürüzsüzden pürüzlüğe doğru değiştiğinde, silindirin katı cidar tarafındaki sınır tabakasının geciktirici etkisi ile pürüzlülük C_M üzerinde küçük e/D değerlerinde ($e/D = 0.05$ gibi) belirleyici olmaya başlar ve C_M artar.



Şekil 3.50. Pürüzlülüğün sürüklenme kuvveti katsayısı (C_D) üzerindeki etkisi ($Re = 0.8 \sim 1.1 \times 10^5$); (SÜMER ve diğ. 1991).



Şekil 3.51. Pürüzlülüğün atalet kuvveti katsayısı (C_M) üzerindeki etkisi ($Re = 0.8 \sim 1.1 \times 10^5$); (SÜMER ve diğ. 1991).



Şekil 3.52. Pürüzlülüğün kaldırma kuvveti katsayısı ($C_{L,A}$, $C_{L,T}$) üzerindeki etkisi ($Re = 0.8 \sim 1.1 \times 10^5$); (SÜMER ve diğ. 1991).

Şekil 2.52'den görüldüğü gibi, silindir yüzey pürüzlülüğü pürüzsüzden pürüzlüye doğru değiştiğinde akıma dik doğrultudaki kuvvet katsayılarında önemli bir değişiklik görülmemektedir. Bu sonuçlar, SARPKAYA (1976a)'nın yaptığı katı cidardan bağımsız silindir üzerindeki ($e/D = 0$ durumu) silindir ile ilgili çalışmaları ile uyum gösterir.

Re sayısının etkisi

Duvar yakınında, salınımlı akım ortamında yeralan bir silindire etkiyen kuvvetlere Re sayısındaki değişimin etkisi YAMAMOTO ve NATH (1976) ve SARPKAYA (1976b)'nın çalışmalarından izlenebilir. Bu çalışmalardan, Re sayısı ile kuvvet katsayılarındaki değişimin katı cidardan bağımsız silindir ile aynı olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, iskele, petrol platform ayakları, köprü ayakları gibi düşey elemanlar başta olmak üzere tabana oturan veya taban yakınındaki silindir ile tabandan uzak sonsuz akım ortamındaki bir silindir için, doğada çok sık rastlanılan salt akıntı (kararlı akım), salt dalga ve akıntı ile dalganın ortamda birlikte görülmesi durumunda yapıya etki eden kuvvetler, birçok araştırmacı tarafından detaylı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada ise, literatürde yer almayan, tabana çeşitli oranlarda gömülü ve/veya birbirine paralel yakın konumda silindirler üzerindeki kuvvetler, silindir üzerindeki basınç dağılımı deneysel olarak ölçülerek belirlenmiştir.

4.2 ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Çalışmanın Bölüm 4.1'de tanımlanan amaçlarının gerçekleşmesi için ayrıntılı bir çalışma programı hazırlanmıştır. Çalışma programının laboratuvarda mevcut ölçme-değerlendirme sistemi ve deney kanalı ile uyumlu olmasına dikkat edilmiştir. Daha sonraki bölümlerde laboratuvardaki deney sistemi açıklanırken, ölçme ve değerlendirme sistemi ile deney kanalının performansı detaylı olarak açıklanacaktır.

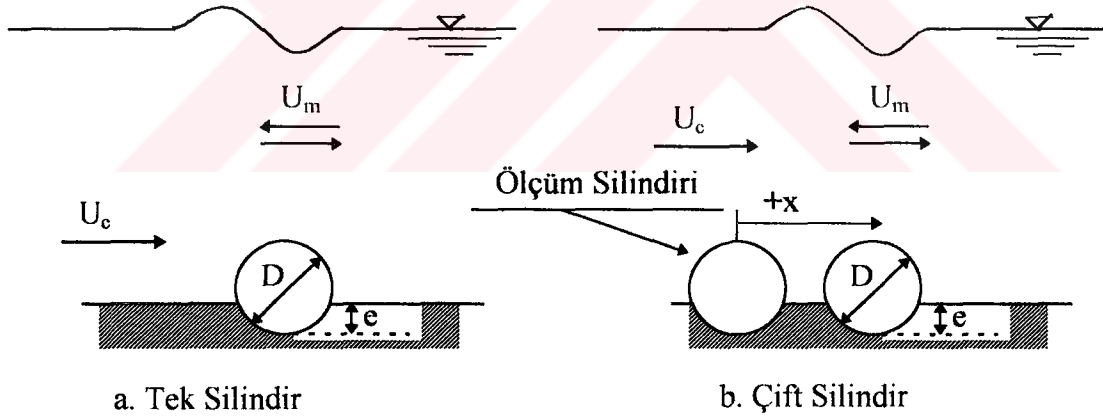
Çalışma kapsamına alınan deneylerin ilk kısmı, daha önce diğer araştırmacılar tarafından incelenmiş durumlara aittir. Bu deneyler, tabana tek silindirin oturması

durumunda silindire dalga, dalga+akıntı ve sadece akıntı durumunda etkiyen kuvvetlerin belirlenmesinden oluşmaktadır. Bunun amacı elde edilen sonuçların diğer araştırmacıların sonuçları ile karşılaştırılarak sistemin kontrol edilmesidir.

Ölçme-değerlendirme sistemi ve deney kanalına uygun olarak belirlenen çalışma kapsamında yapılan deneyler;

a) Akıntı ve dalganın yayılma doğrultusuna dik doğrultuda tabana yerleştirilmiş bir silindirde değişik gömülme oranlarında ($e/D = 0, 0.20, 0.48$) ve değişik su derinliklerinde ($h = 20, 40$ cm) silindire etkiyen kuvvetlerin kararlı akım, salt dalga ve akım ile dalganın birlikte görülmesi durumlarında belirlenmesi (Şekil 4.1a),

b) Tabanda birbirine paralel olarak yerleştirilmiş iki silindir bulunması durumunda, tek silindirdeki değişik gömülme oranları ve/veya değişik silindirler arası mesafelerde tek silindir durumundaki akım koşulları altında ölçüm silindirine etkiyen yüklerin belirlenmesinden oluşmaktadır (Şekil 4.1b).



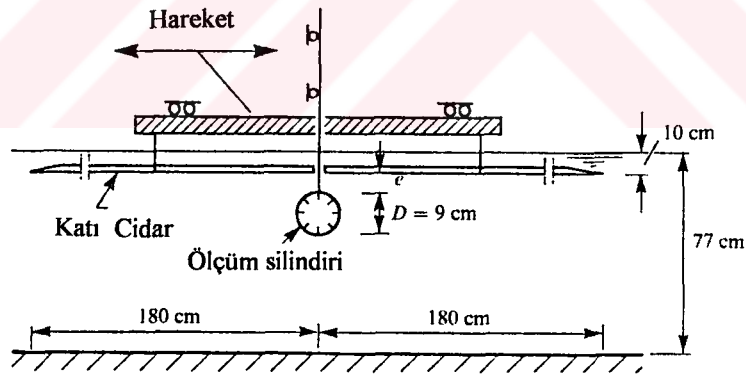
Şekil 4.1. Deney silindirleri ve ölçüm koşulları.

Kapsamı belirlenen deneylere ait deney programı detaylı bir şekilde EK 1'de verilmektedir.

4.3. DENEY SİSTEMİ

4.3.1. Deney kanalı

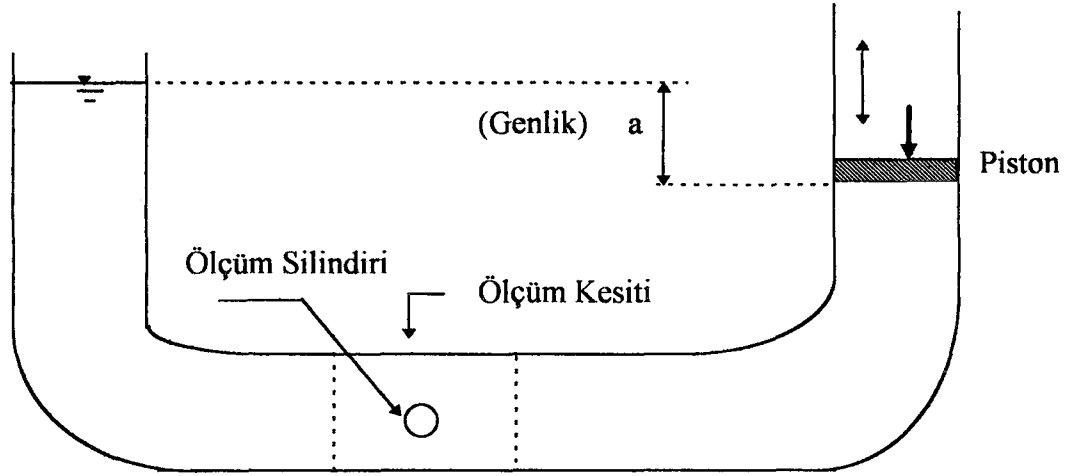
Deniz ortamında yer alan bir silindire etkiyen yüklerin deneysel olarak belirlenmesi çalışmalarında, deniz ortamının benzeştirilmesinde genel olarak iki yöntem kullanılır. İlk yöntemde, silindire sakin (hareketsiz) su içerisinde ileri-geri harmonik (sinüsoidal) hareket yaptırılarak dalga etkisi benzeştirilmeye çalışılır. Silindirin hareketinin genliği ve frekansı, dalganın silindirin olduğu kesitteki hareket özellikleri olarak alınır (Şekil 4.2) (GARRİSON ve diğ. 1977, MOE ve VERLEY 1980, SÜMER ve diğ. 1991). Buna benzer bir diğer benzeşim tekniği ise Sarpkaya'nın deneylerinde kullandığı U tübü test düzeneğidir (Şekil 4.3) (SARPKAYA ve ISAACSON 1981). Bu düzenekte silindir, harmonik hareket yapan U kesitine sahip kanalın gözlem kısmında sabit tutulup su kütlesine kollar arasında harmonik hareket yaptırılır. Bu ilk yöntemde, silindirin çok yakınındaki bölge haricinde akım tek boyutludur.



Şekil 4.2. Sakin su içerisinde silindirin hareketi ile dalga etkisinin benzeştirildiği deney sistemi (SÜMER ve diğ. 1991)

Araştırmacılar tarafından kullanılan ikinci yöntem ise, bir deney kanalında üretilen dalgalar etkisinde, silindirin kanalda sabit tutularak etkiyen kuvvetlerin belirlenmesidir.

Bu deney sistemi kullanıldığında, dalganın yapısı gereği hareket hem düşeyde hem de yatayda olacağından akım iki boyutludur. Dalga kanalında üretilen dalgalar düzenli ve



Şekil 4.3. U tübü deney sistemi

sinüsoidal olmasına rağmen taban etkisi ile akımın sinüsoidal yapısı bozulabilir. Bu nedenle, silindir ekseninde su yüzeyindeki dalganın özelliklerinin ölçülmesi yeterli olmayabilir. Dalga izleyicinin (probonun), silindir ekseninde yer alması ve burada dalga özelliklerinin ölçülmesi gereklidir. Bu durumda dikkat edilmesi gereken husus, silindirin dalganın akım alanını etkileyeceği de göz önüne alınarak dalga izleyicinin, kanalda silindir ekseninde ve akımın silindirden etkilenmeyeceği kadar uzak bir bölgeye yerleştirilmesidir.

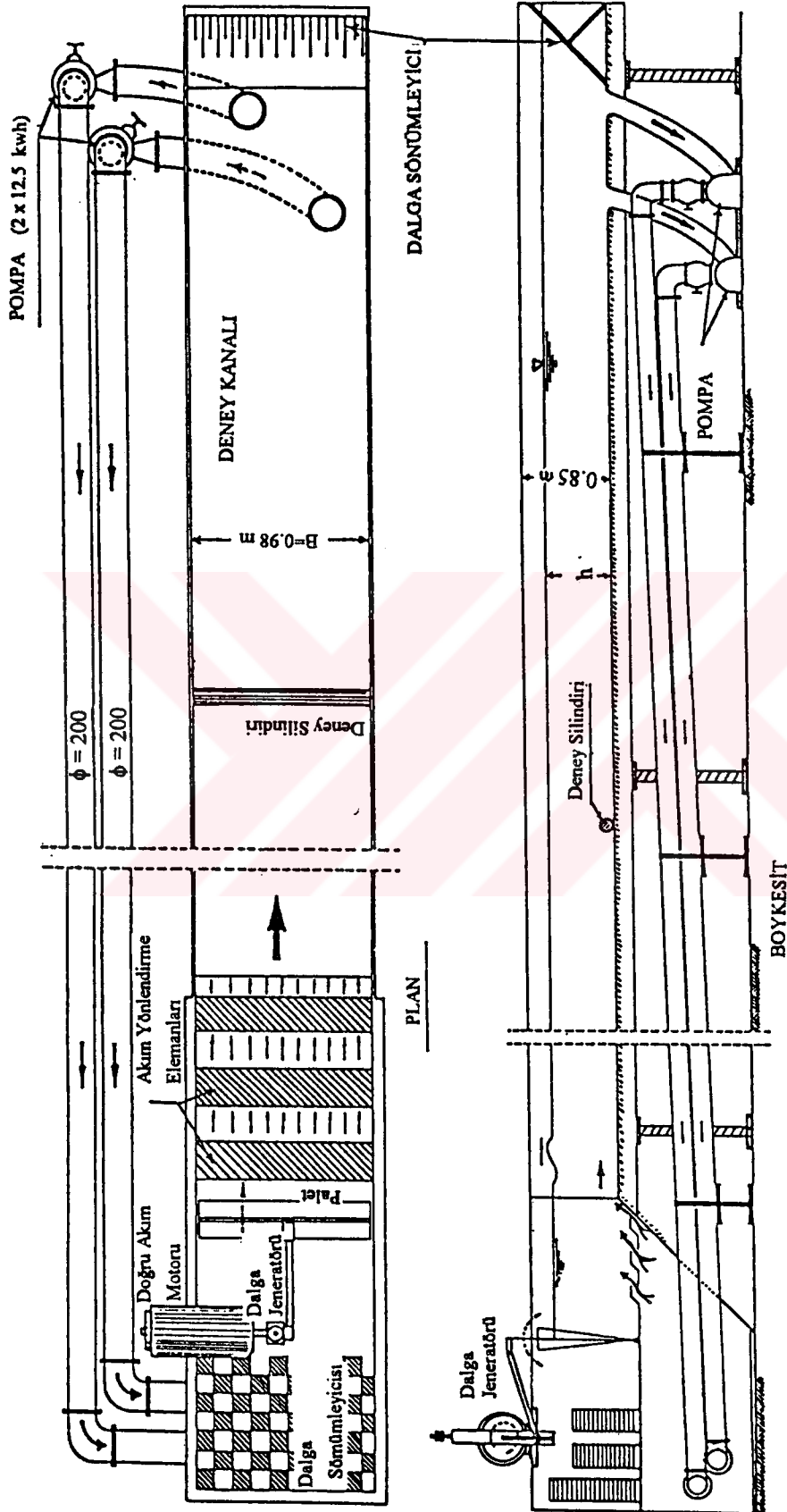
Bu iki deney sistemi karşılaştırılırsa, mekanik salınımın yaratıldığı ilk yöntemde hareketin kinematiği daha kolay kontrol altındadır; genlik ve frekans dalga üretilen diğer yöntemle göre çok düzenli ve net olarak ayarlanabilir. Buna ek olarak dalga kanalının fiziksel kısıtları nedeniyle elde edilemeyecek büyüklükteki Re ve KC sayıları bu yöntemle elde edilebilir. Dalga kanalında ise dalga yüksekliği, periyodu ve dalganın oluturacağı hızın maksimum değerleri sınırlıdır. Dalga kanalının diğer yöntemle göre üstünlüğü ise, dalga özelliklerinin (hız ve basınç dağılımı gibi) ortama daha iyi yansıtılmasıdır. Bu sistemin başka bir avantajı da U tübü deneylerinde akım ve dalganın birlikte benzeştirilmesinin imkansız olması karşın, kanal sisteminde bunun mümkün olabilmesidir (CHAKRABARTI 1990).

Kullanılan deney sistemleri karşılaştırıldıktan ve laboratuvardaki mevcut altyapı incelendikten sonra deneyler, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarında bu amaçla hazırlanan bir deney kanalında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da görülen bu deney kanalı 26 m uzunluğunda, 98 cm genişliğinde ve 85 cm yüksekliğindedir. Kanalda kapalı devre su sirkülasyonu sağlanarak kararlı akım oluşturulmakta, bunun için kanalın giriş ve çıkış kesitleri arasında çift hat ϕ 200' lük borular kullanılmaktadır. Sirkülasyon, 2x50 kw'lık iki pompa grubu ile sağlanmaktadır. Kanalda düzenli dalga üretmek için flap tipi bir palet ve bu palete güç veren bir doğru akım motoru mevcuttur. Motor bir redresör yardımıyla değişik devirlerde dönmekte ve bu da dalga peryodunun ayarlanmasına olanak vermektedir. Redresöre bağlı voltmetre vasıtasıyla devir-volt arasındaki değişim belirlenip istenilen peryodda dalga üretilmektedir. Doğru akım motoru, palete eksantrikliği ayarlanabilen bir kolla bağlanmıştır. Bu kol üzerindeki skaladan yararlanarak istenilen dalga yüksekliğine karşı gelen eksantriklik ayarlanabilmektedir.

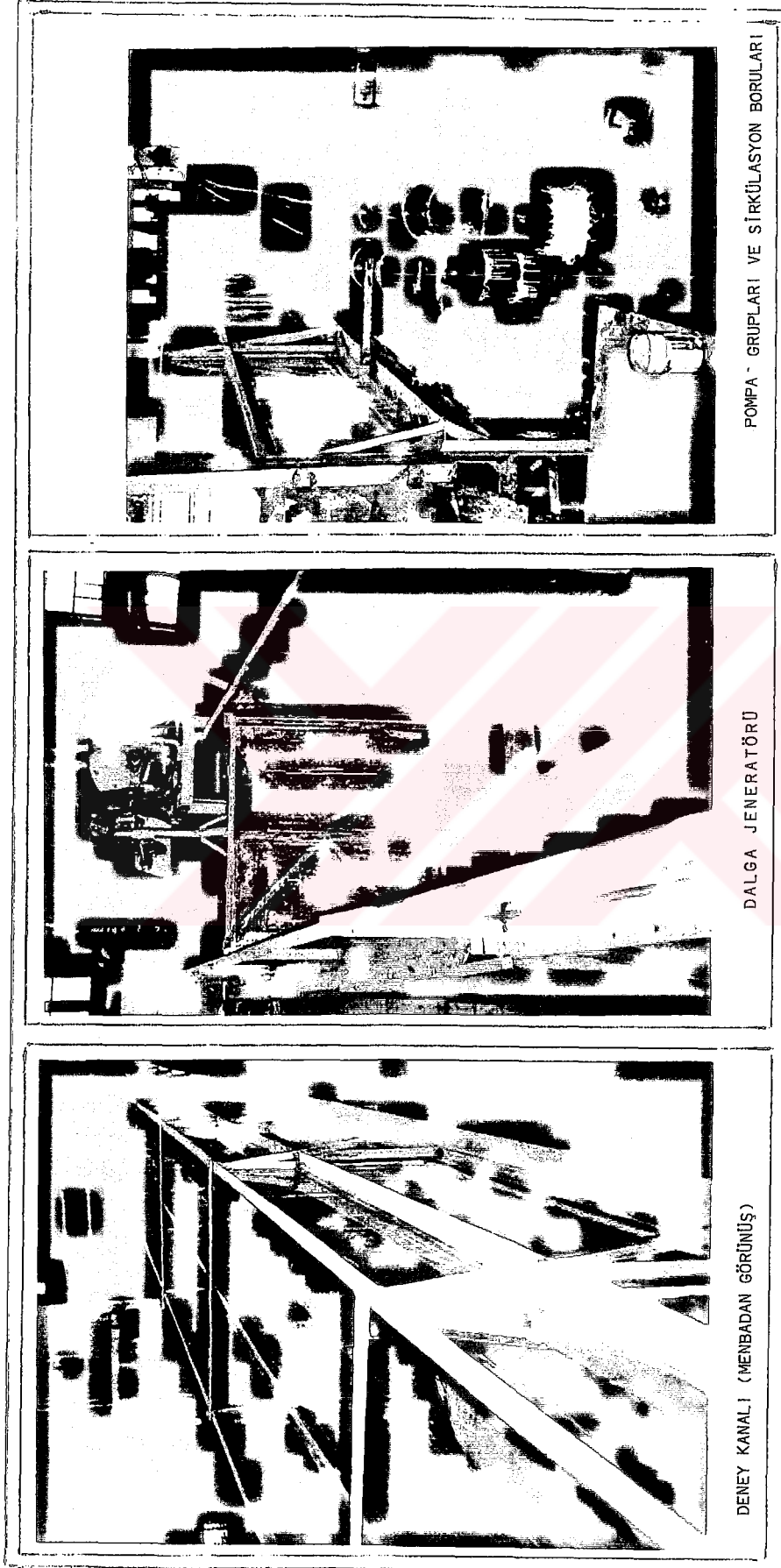
Kararlı akımın kanala girişinde çalkantı oluşumunu engellemek, dalga ve akıntı durumunda dalgaların yapısını bozmasını önlemek için akım yönlendiriciler yerleştirilmiş ve bu sayede kararlı akım hızının düşey bileşeni önlenmiştir.

Kanalda, paletin arka kısmında da dalga üreyebileceğinden bunların önlenmesi gerekmektedir. Üreyecek bu dalgalar paletin düzenli çalışmasını engellemektedir. Bunun için paletin arka kısmında kırmataş ve tuğladan dalga sönümleyiciler yapılmıştır. Üretilen dalganın üniform olarak kanal boyunca ilerlemesini sağlamak için kanala paralel, 10 cm. aralıklarla yaklaşık olarak 1 m. uzunluğunda dalga yönlendiriciler yerleştirilmiş ve böylece dalganın üniformluğu sağlanmıştır.

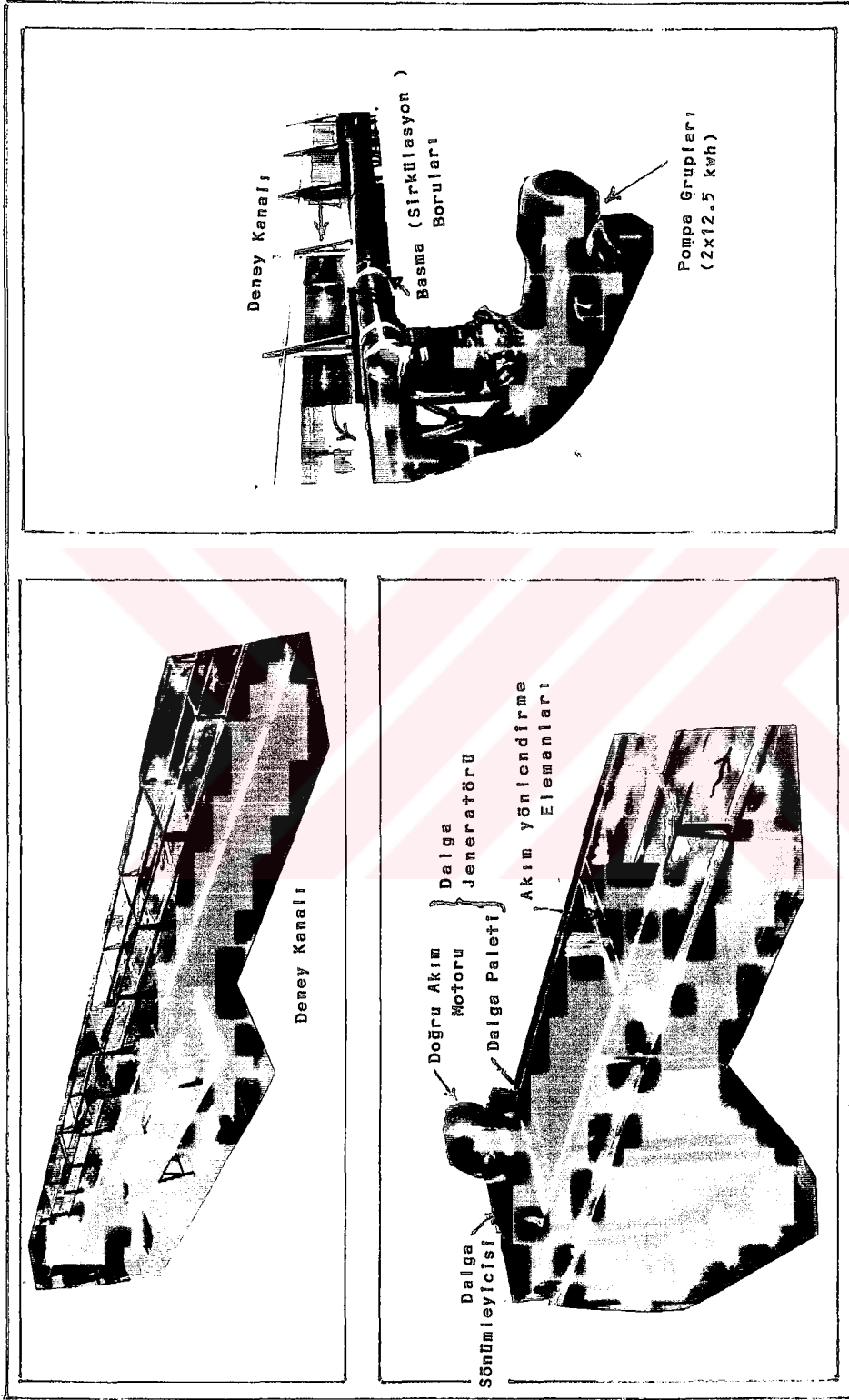
Kanalda üretilen dalganın enerjisinin kanalın sonunda tamamen kırılması gereklidir. Bu tam olarak yapılmadığında, kanal sonunda yansıyan dalga, üretilen dalgaları etkilemekte ve üniformluklarını bozmaktadır. Bunun için, yine Şekil 4.4'de görüldüğü gibi ölçüm kesitinden sonra dalgaların kırılması için 1/5 eğiminde platform oluşturulmuş ve dalgaların sahil üzerinde kırılması sağlanmıştır. Dalgaların enerjisinin yaklaşık %85'i kırılarak harcandığından platform bu düzenlemede oldukça önemlidir. Dalga+akım



Şekil 4.4. Deney sistemi



Şekil 4.5. Deney sisteminin genel görünüşü



Şekil 4.6. Deney kanalı ve sistem elemanlarının genel görünüşü

halinde bu platformun sirkülasyonu kesmemesi ya da kısmen engellememesi için geçirimli olması gerekmektedir. Bunun için platform delikli saçtan imal edilmiş ve üzeri kırmataş (4 no.lu mıcır) ile kaplanmıştır. Kanalin sonunda sirkülasyonu sağlayan pompaların girişlerinin üzerine iki paralel levha konulmuştur. Bu paralel levhalar ile hem arasından geçen dalgaların enerjileri kırılmakta hem de özellikle düşük derinliklerde ($h=20$ cm gibi) pompa girişlerinde vorteks oluşması önlenerek pompalara hava girişi engellenmektedir. Kanalin sonunda ise akımın ve çalkantıların direkt duvara vurmaması ve dalganın geri dönüşünün önlenmesi için çift sıra delikli tuğla yerleştirilmiştir.

Kanalin bazı kısımlarına yerleştirilen elek teli ızgaralar yardımıyla akımın yapısını izlemeye kullanılan polisilenlerin ölçüm aletleri ve pompalara zarar vermesi engellenmiş ve kolayca toplanmaları sağlanmıştır.

Özellikle akım izleme tekniklerinde kolaylık sağlaması bakımından kanalın tabanı açık sarıya boyanmıştır.

Deney kanalının performansı

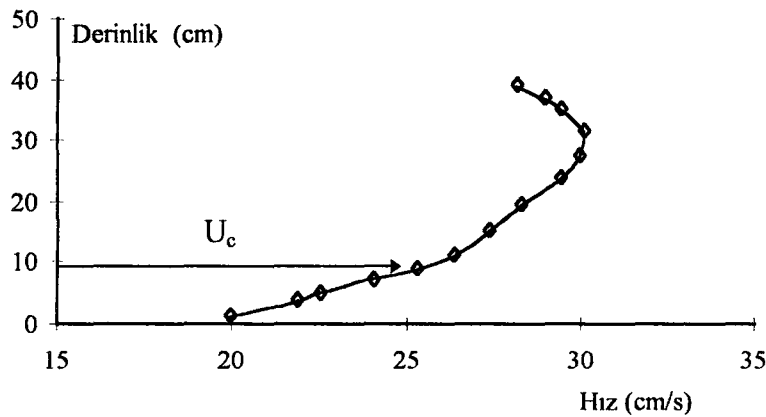
Planlanan çalışmanın yapılacağı deney kanalının istenilen akım koşullarını sağlayıp sağlayamayacağının, araştırmaya başlanmadan incelenmesi gereklidir. Bu çalışmada da silindir üzerinde basınç gerilmelerinin ölçülmesine geçilmeden önce, deneylerin yapılacağı deney kanalında hız ve dalga ölçümleri ile hedeflenen akım koşullarında kanaldaki hız dağılımı ve kanalda üretilen dalgaların özellikleri belirlenmiştir.

Kararlı akım koşullarında, su sirkülasyonunu sağlayan pompaların yaratacağı titreşimin ölçüm sistemi üzerindeki etkisi ile, kanalda sağlanabilen maksimum hız değeri incelenmiştir. Pompaların çalışmaları sırasında yarattıkları titreşimlerin çok küçük genliklere sahip olduğu, frekanslarının sistem üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür. Kanalda su derinliğinin (h) 40 cm. olduğu derinlikte, kararlı akım durumunda kanal ekseninde ölçülen hız dağılımı Şekil 4.7'de görülmektedir. Deneylerde, kararlı akım durumunda Re sayısının belirlenmesinde referans hız olarak alınan silindirin tepe

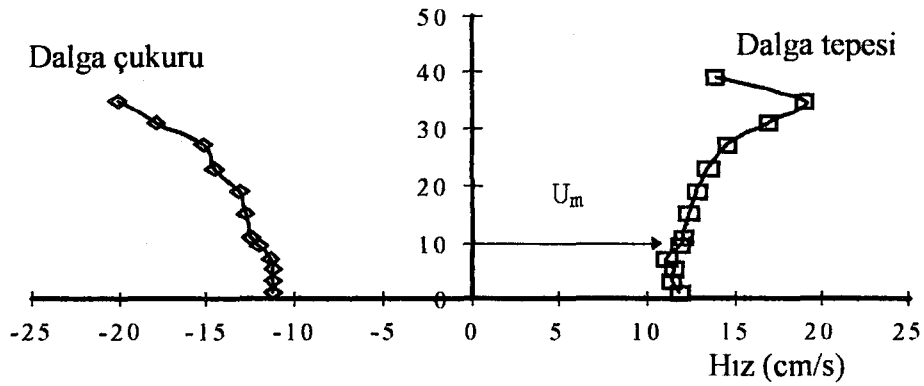
noktası seviyesinde sistemin sağlayabileceği maksimum kararlı akım hızı 20 cm/s olarak belirlenmiştir.

Düzenli dalga üretilen bir deney kanalının performansı incelenirken, üretilen dalgaların en büyük ve en küçük periyodlarının, dalgaların kanalın sonundan yansıdıktan sonra üretilen dalgaları etkileyip etkilemediğinin belirlenmesi için (kanal sonundaki enerji kırıcıların performansının), dalga kanalında dalga etkisinde oluşacak hız dağılımının belirlenmesi gereklidir. Bu çalışmada da kanal ekseninde hızın dalga yayılma doğrultusundaki bileşeninin derinlikle değişimi belirlenmiştir. Dalga izleyiciler ile de üretilen dalgaların yapıları gözlenmiştir.

Şekil 4.8'de verilen kanal eksenindeki hız dağılımları incelendiğinde, boyutsuz sayıların (KC, Re) hesabında referans hız olarak alınan silindirin tepe noktası seviyesinde akım doğrultusundaki maksimum hızın (U_m) 10-12 cm/s civarında değer aldığı görülmektedir. Kanal eksenindeki hız dağılımından da görüldüğü gibi, taban yakınında ve su yüzeyi yakınlarda kütle taşınım bölgeleri olmakta ve bu kısımlarda ilk yarı periyoddaki (dalga tepesi durumu) hızlar, ikinci yarı periyoddaki (dalga çukuru durumu) hızlardan mutlak değer olarak daha büyük olmaktadır. Akımın orta kısımlarında ise bu taşınımın dengelenmesi nedeniyle ikinci yarı periyoddaki (dalga çukuru) hızlar, ilk yarı periyoddaki (dalga tepesi durumu) hızlardan mutlak değer olarak daha büyük olmaktadır.

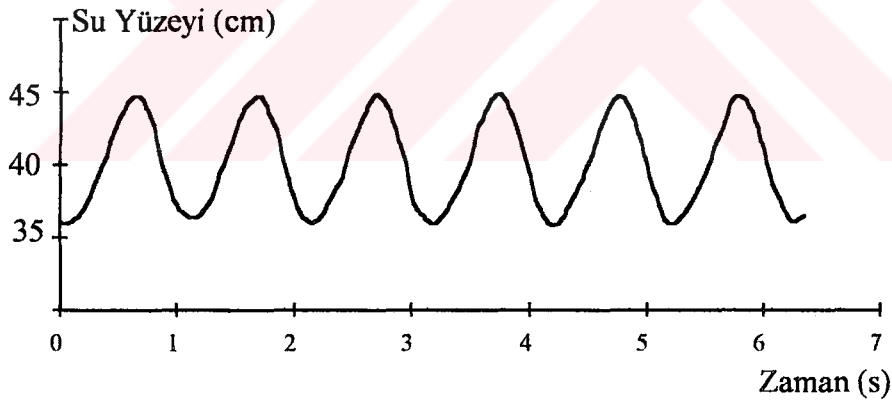


Şekil 4.7 Deney kanalı ekseninde kararlı akım etkisinde hız dağılımı ($h = 40$ cm)
(YÜCE 1995)



Şekil 4.8. Dalga etkisinde kanal ekseninde ölçülen hız dağılımı (AVCI ve diğ. 1996).

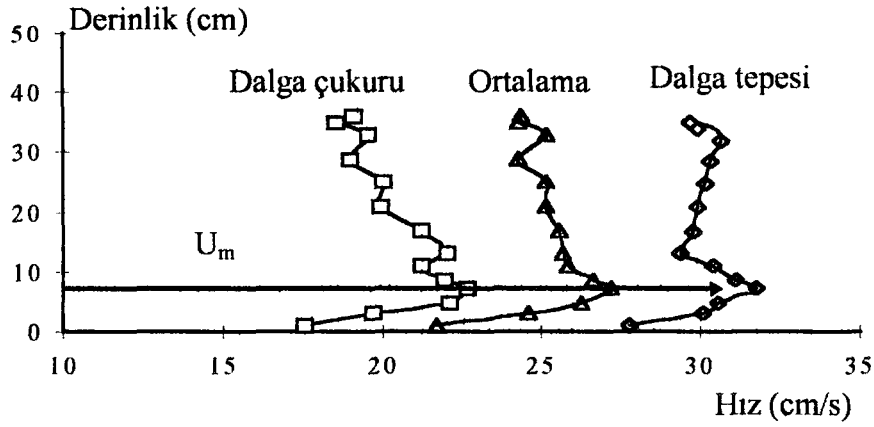
Dalga kanalında üretilen dalgalar, düzenli şekle sahip dalga ve 0.8 ile 3.2 s 'lik periyodlar arasında üretilebilmektedir. Dalga izleyiciler ile belirlenen bu aralıktaki dalgaların oluşturduğu su yüzeyinin zamanla değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. Dalga kanalında kanalın çıkış kesitine konan dalga enerjisini kırıcı yapılar, gelen dalganın enerjisinin büyük bölümünü almakta ve kanaldaki yansıma ihmal edilebilecek kadar küçük olmaktadır (%3-4).



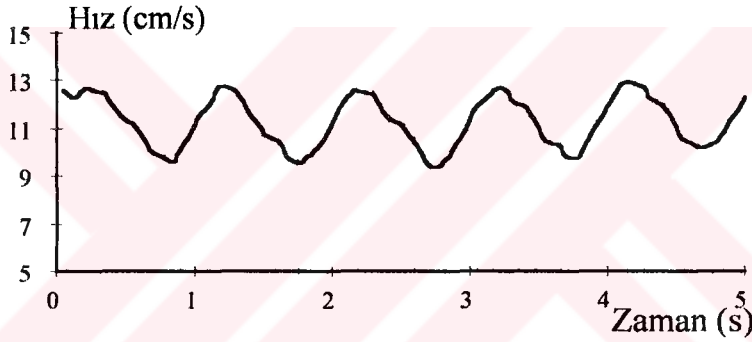
Şekil 4.9. Dalga etkisinde su yüzeyinin zamanla değişimi.

Akım ile dalganın birlikte görüldüğü deney koşullarında, hem dalga etkisi hem de kararlı akım etkisindeki özellikler gözönüne alınarak kanalın performansı incelenmiştir. Akım+dalga durumunda kanal sonunda dalgaların yansıması, "sadece dalga" durumuna göre daha da azalmış, su yüzü değişimi de daha düzenli hale gelmiştir. Bu durumda kanal eksenindeki hız dağılımı incelendiğinde özellikle taban civarında kütle taşınımının etkisi ile hız dağılımında kararlı akıma göre artış görülmektedir (Şekil 4.10).

Akım+dalga durumunda hızın zamanla değişimi incelendiğinde ise oldukça düzenli bir değişim görülmektedir (Şekil 4.11) (YÜCE 1995).



Şekil 4.10. Kanal ekseninde akım+dalga durumunda kanalda ölçülen hız dağılımı (AVCI ve diğ. 1996)



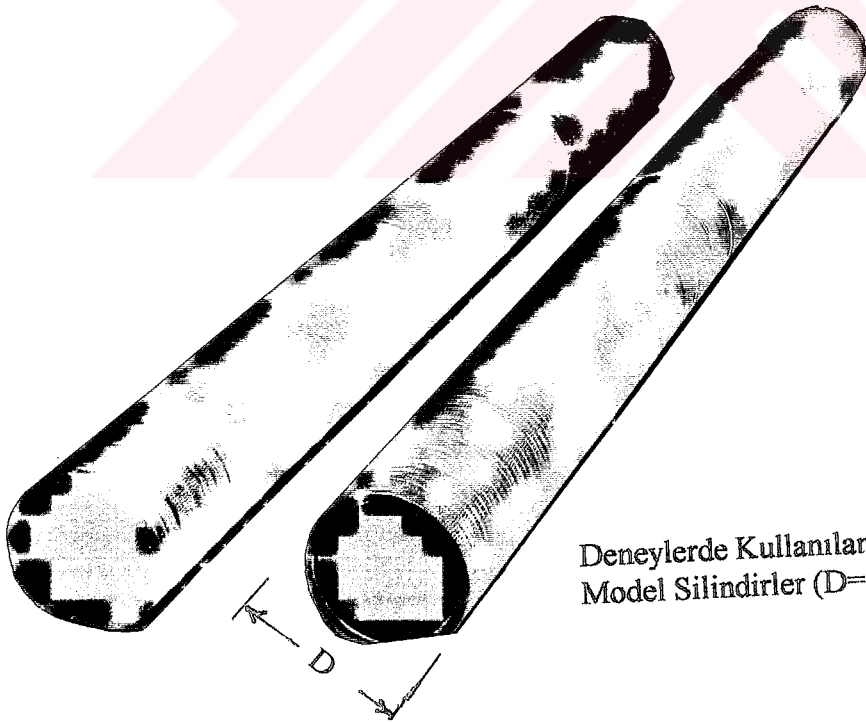
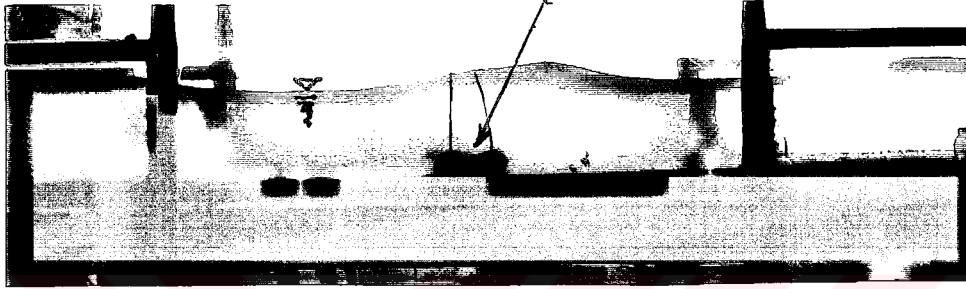
Şekil 4.11. Akım+dalga durumunda referans noktada hızın zamanla değişimi (KC=1.5, Re=12000)

4.2.2. Model silindirler

Deneylerde kullanılacak model silindirler, 16 Atü'lük sert PVC borudan yapılmıştır. Birisi sabit ölçüm (donanımlı) silindiri, diğeri ise dummy (donanımsız ve hareketli) silindir olarak kullanılan bu iki adet silindirin dış çapları 8.9 cm olup, yüzeyleri torna tırtılı yardımıyla pürüzlendirilmiştir. Üzerindeki sınır tabakasının erken türbülanslı hale geçmesini sağlamak amacıyla oluşturulan bu üniform pürüzlülüklerin yüksekliği (k), 0.5 mm olarak seçilmiştir. Hazırlanan bu model silindirler ve bunların deney kanalı içindeki konumları Şekil 4.12'de görülmektedir.



Test Silindirleri



Deneylerde Kullanılan
Model Silindirler ($D=8.9$ cm., $k=0.5$ mm.)

Şekil 4.12. Deneylerde kullanılan yüzeyleri pürüzlü model (test) silindirler

4.2.3. Ölçme ve değerlendirme sistemi

4.2.3.1. Dalga ölçme sistemi

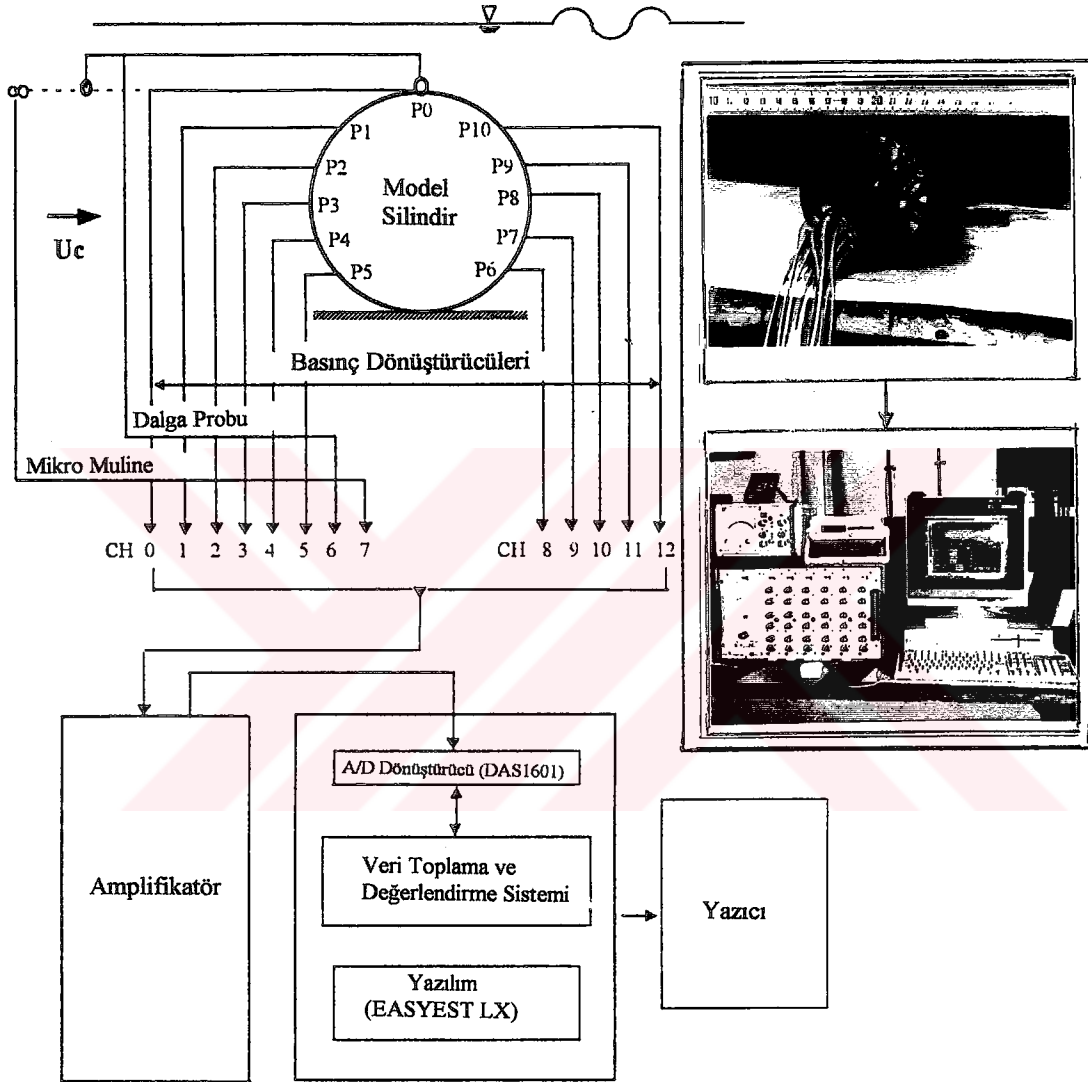
Deneyleer sırasında üretilen dalga karakteristiklerini ölçmek üzere, Şekil 4.13'de görüldüğü gibi, kanal tabanına oturan model silindirin kret seviyesinde olmak üzere, birisi hemen silindirin yer aldığı kanal enkesitinde, diğeri de silindirin 1.5 m menba tarafında, akımın silindirden etkilenmediği kesitte olmak üzere kanalın yan cidarında iki adet indüktif basınç dönüştürücüsü (HBM P11) bağlanmıştır.

4.2.3.2. Hız ölçümleri

Kararlı akım (akıntı) ve dalga durumlarında akım ortamı içindeki noktasal yatay hız bileşenlerini ölçmek üzere bir adet "Nixon instrumentation stream flow velocity meter, Tip 400, Model 403" mikro muline kullanılmıştır. Analog çıkışı da olan bu muline, bir ara sinyal kuvvetlendiricisinden sonra doğrudan bilgisayara bağlanabilmektedir (Şekil 4.13).

4.2.3.3. Basınç ölçümleri

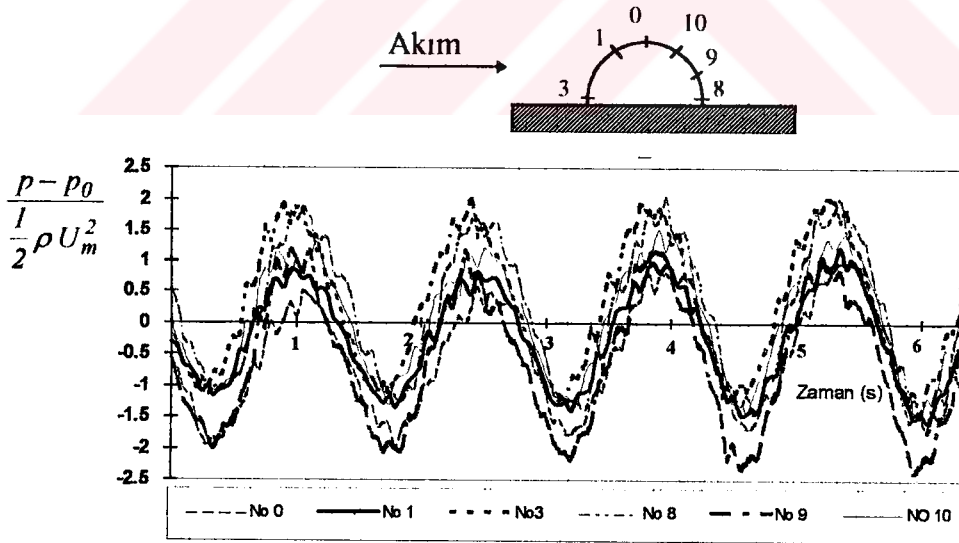
Akıntı ve dalga etkileri altında silindire gelen kuvvetleri ve bu bağlamda kuvvet katsayılarını belirlemek için, silindir çevresindeki basınçların ölçülmesi ve basınç dağılımının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla noktasal basınçları ölçmek üzere, hazırlanan model silindirlerden birinin enkesit çevresi üzerine 30°'lik aralıklarla ENDEVCO 8510 B-5 tip ve modeli 11 adet minyatür basınç dönüştürücüsü yerleştirilmiştir (Şekil 4.13). Piezorezistif yapıdaki bu dönüştürücülerin çapları 4 mm olup, silindir dış yüzeyinde herhangi bir süreksizlik yaratmamaktadırlar. Şekil 4.13'de görüldüğü gibi, bunların herbiri bir sinyal kuvvetlendirici kanalı üzerinden doğrudan bilgisayara bağlanmışlardır.



Şekil 4.13. Ölçme, değerlendirme sistemleri ve deney silindiri üzerine yerleştirilen basınç dönüştürücüleri

4.2.3.4. Verilerin toplanma, işleme ve değerlendirme sistemi

Şekil 4.13'de görüldüğü gibi, hız ölçen "muline" ve basınç ve dalga ölçer "basınç dönüştürücüleri"nden gelen analog sinyaller, herbiri ayrı birer kanal üzerinden önce bir sinyal kuvvetlendirici "amplifier"e gelmekte, sonra buradan çıkan kuvvetlendirilmiş sinyaller bir A/D dönüştürücüsü kartından geçerek bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayara gelen digital sinyaller, EASYEST LX yazılımı yardımıyla simültane olarak alınmakta; bu sinyaller ya anında kalibrasyon denklemleri vasıtasıyla değerlendirilerek basınç, dalga yüksekliği veya hız değerleri elde edilmekte, veya herbir kanal için bilgisayar ortamında tanımlanan bir dosya içinde ASCII kodda saklanabilmektedir. Basınç, hız ve dalga karakteristiklerine ait zaman serisi şeklinde elde edilen bu bilgiler için yine adı geçen yazılım kullanılarak hertürlü istatistik değerlendirme yapılabilmekte, tablo veya grafik gösterim şeklinde çıkış elde edilebilmektedir. Buna örnek olarak Şekil 4.14'te kararlı akım+dalga durumunda tabana yarı gömülü ($e/D=0.48$) tek silindir üzerindeki basınç dönüştürücüleri ile belirlenen basınç gerilmelerinin zamanla değişimi görülmektedir (AVCI ve diğ. 1996)(ÇOKGÖR 1996).



Şekil 4.14 Kararlı akım+dalga durumunda tabana yarı gömülü ($e/D=0.48$) tek silindir üzerindeki noktalarda basıncın zamanla değişimi (ÇOKGÖR 1996)

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Değişik akım koşulları ve sınır şartlarında silindir ile akım arasındaki etkileşim farklı yapıda olacaktır. Silindir üzerindeki basınç dağılımı da bu değişikliklerden etkilenecek ve buna bağlı olarak silindire etkileyen akım kaynaklı hidrodinamik yükler de değişecektir. Bölüm 2.3, Bölüm 3.6'da belirtildiği gibi, akım ortamında yeralan bir yapı üzerindeki yükler akım doğrultusunda C_D ve C_M , akıma dik doğrultuda ise C_L kuvvet katsayıları ile ifade edilirler. Bu çalışmada, silindir üzerinde değişik noktalarda deneysel olarak ölçülen basınç değerleri kullanılarak belirlenen bu katsayıların akım koşulları ve sınır şartları ile ne şekilde değiştiği açıklanacaktır.

5.1. SİLİNDİR ÜZERİNDEKİ BASINÇ DAĞILIMI

Silindir üzerindeki basınç dağılımının bilinmesi, gerek silindire etkileyen kuvvetlerin belirlenmesi, gerekse akım ile silindir arasındaki etkileşimin anlaşılması bakımından önemlidir.

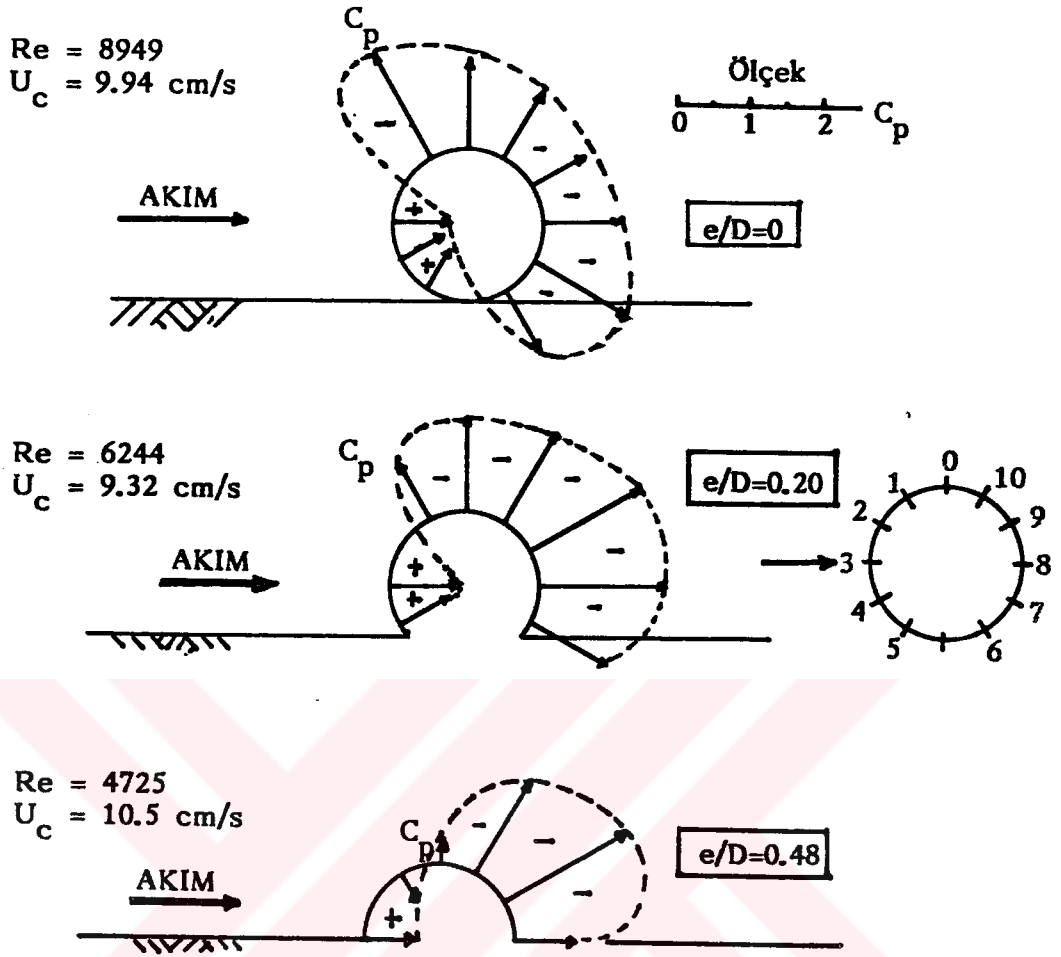
Çalışmada, ölçüm silindiri üzerine 30° lik açılarla yerleştirilmiş elektronik basınç dönüştürücüleri (transducer) ile zaman serisi olarak elde edilen basınç değerleri kullanılarak silindir üzerindeki basınç dağılımı belirlenmiştir. (2.6) eşitliğinde akım hızı olarak silindirin tepe noktasındaki hız alınarak, ölçülen basınç değerleri boyutsuz hale getirilmiştir. Kararlı akım durumunda, akım hızı olarak belirlenen noktadaki hız, dalga etkisinde, akım doğrultusunda oluşan maksimum hız, akım ile dalga etkisinde ise, akım doğrultusunda dalga ve kararlı akımın birlikte oluşturdukları maksimum (U_c+U_m) hız değeri alınmıştır.

Akım etkisi ile silindir çevresinde meydana gelebilecek basınç dağılımına örnek olarak, aynı kararlı akım koşulları altında tek silindirin değişik gömülme oranları için ölçülen basınç değerleri Tablo 5.1 ve Şekil 5.1'de verilmektedir. Buradaki basınç değerleri, silindir üzerinde zaman serisi şeklinde alınan basınçların ortalama değeridir. Basıncın çalkantı bileşeni ise ihmal edilecek kadar küçük olmaktadır.

Tablo 5.1. Kararlı akım etkisi altında değişik gömülme oranlarında silindir üzerine ölçülen basınçların ortalama değerleri

Silindir üzerinde ölçüm noktaları	Noktasal boyutsuz basınç, $C_p=(P_i-P_o)/(1/2 \rho U_c^2)$		
	e/D=0	e/D=0.20	e/D=0.48
0	-1.2	-1.35	-0.36
1	-1.6	-0.79	0.36
3	0.80	0.903	0.71
4	0.70	0.68	-
5	0.62	-	-
6	-0.86	-	-
7	-1.33	-1.12	-
8	-1.0	-1.58	-0.71
9	-0.82	-1.58	-1.78
10	-1.0	-1.35	-1.42

Tabana oturan silindir için elde edilen Şekil 5.1.a'da ki basınç dağılımı, BEARMAN ve ZDRAVKOVICH (1978)'in benzer akım şartları altında elde ettikleri Şekil 2.37'de ki basınç dağılımı ile karşılaştırılırsa benzer oldukları görülebilir. Silindir üzerindeki basınç dağılımı incelenerek, basınç değerlerinin yüzeyde pozitiften negatife geçtiği noktanın yeri belirlenebilir. Şekil 5.1'deki basınç dağılımları incelenerek bu noktanın silindir yüzeyindeki yerinin silindirin yatay eksenini ile yaptığı açı belirlenirse; silindirin tabana oturduğu durumda bu açının $\cong 50^\circ$ olduğu görülmektedir. Şekil 2.31'de benzer akım koşullarında ve sınır şartlarında bu açının değeri $\cong 60^\circ$ olarak görülmektedir (BEARMAN ve ZDRAVKOVICH 1978). Aradaki farkın nedeni, kullanılan silindirin yüzeyinin pürüzsüz olması sebebi ile sınır tabakasından ayrılmanın geçikmesidir. Basınçların pozitiften negatife geçtiği noktanın silindir üzerindeki yeri, gömülme oranından da etkilenmektedir.



Şekil 5.1. Değişik gömülme oranlarında kararlı akım etkisi altında tek silindir üzerindeki basınç dağılımı

Şekil 5.1'den görüleceği gibi, $e/D=0$ durumunda bu noktanın silindirin yatay eksenine yaptığı açı $\cong 50^\circ$ iken, $e/D=0.20$ olduğunda bu açı $\cong 65^\circ$ ye, $e/D=0.48$ olduğunda ise $\cong 80^\circ$ ye çıkmaktadır.

Şekil 5.1'de kararlı akım hızı aynı iken Re sayısının değişmesinin sebebi, Re sayısının belirlenmesinde karakteristik uzunluk olarak silindirin akıma dik doğrultudaki boyutunun kullanılması ve silindirin gömülme oranı arttıkça bu değerin azalmasıdır.

5.2. SİLİNDİRE ETKİYEN KUVVETLER VE KUVVET KATSAYILARININ BELİRLENMESİ

Deniz tabanında bir silindir üzerindeki hidrodinamik kuvvetlerin belirlenmesi, bu yapıların güvenli tasarımı açısından çok önemlidir. Yapıya etkiyen bu hidrodinamik kuvvetler silindir üzerindeki basınç dağılımı kullanılarak belirlenebilir.

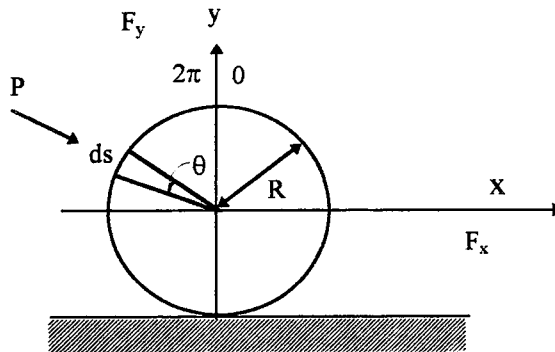
Silindire etkiyen kuvvetin akım doğrultusundaki bileşeni,

$$F_x = \int_0^{2\pi} P_i \cos\theta R d\theta \quad (5.1)$$

ifadesi kullanılarak silindir üzerinde ölçülen noktasal basınçların, silindir yüzeyinde integrasyonu ile belirlenir. Benzer şekilde silindire etkiyen akıma dik doğrultudaki kuvvet bileşeni olan kaldırma kuvveti de,

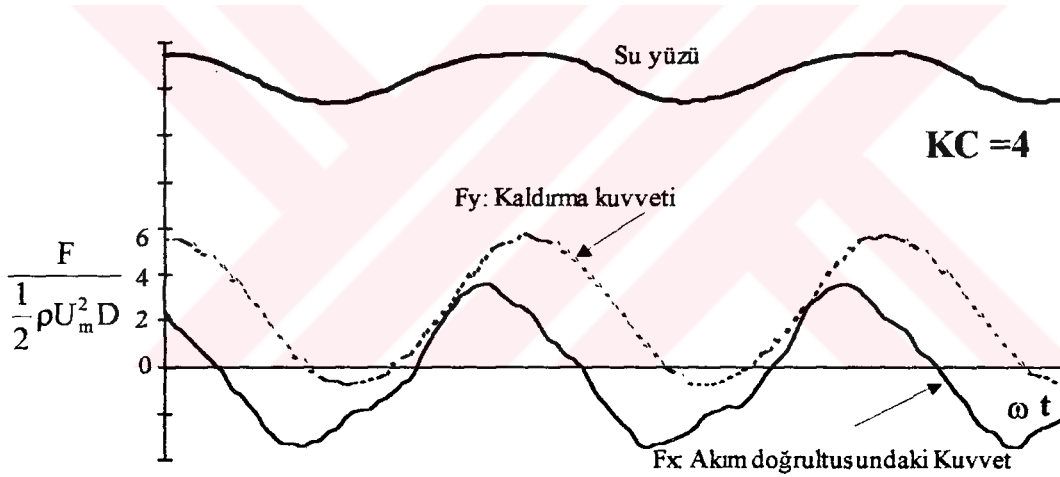
$$F_y = \int_0^{2\pi} \sin\theta R d\theta \quad (5.2)$$

eşitliği ile belirlenir (Şekil 5.2). Kaldırma kuvvetinin pozitif yönü tabandan yukarı doğru seçilmiştir.



Şekil 5.2. Silindir üzerindeki kuvvetlerin basınç dağılımı ile belirlenmesi

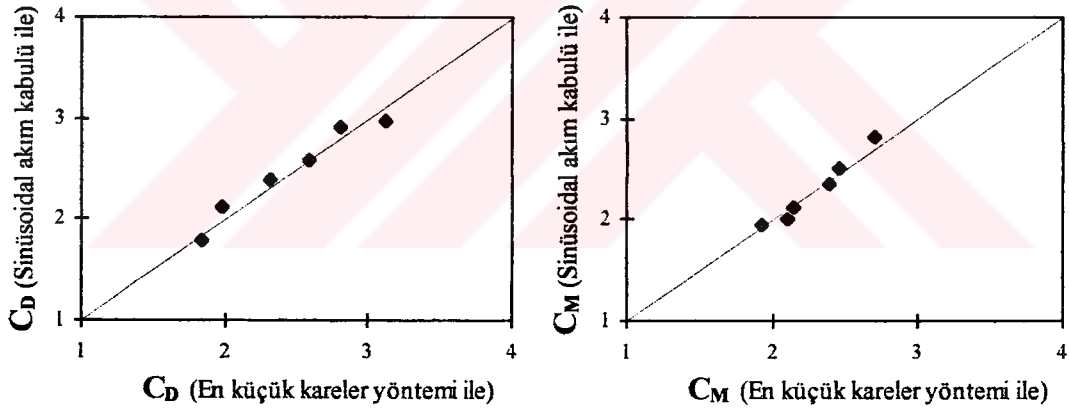
Zaman serisi olarak ölçülen basınçların integrasyonu ile silindire etkiyen kuvvetin akım doğrultusundaki ve akıma dik doğrultudaki değişimi de zaman serisi şeklinde elde edilebilir. Bu zaman serisi incelenerek, kuvvet bileşenlerinin en büyük ve ortalama değerleri ile, bunların akım ve sınır şartlarına bağlı olarak ne şekilde değiştiği izlenebilir. Sadece dalga ve akıntı ile, dalganın birlikte görülmesi durumunda akım doğrultusunda ve akıma dik doğrultudaki kuvvet bileşenlerinin hangi anda maksimum değeri aldığı da bu incelemeyle belirlenerek, bu kuvvetlerin bileşke kuvvet üzerindeki etkisi gözlenebilir. Bu duruma örnek olarak, tabana oturan tek silindir için sabit bir dalga etkisinde ($KC \cong 4$) silindire etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin, su yüzeyi ve hareketin açısal frekansı ile değişimi Şekil 5.3'te görülmektedir. Bu şekilden de görüleceği gibi, F_x ve F_y kuvvetlerinin pik değerleri birbirine oldukça yakındır.



Şekil 5.3. Salt dalga etkisinde tabana oturan tek silindire etkiyen kuvvetlerin açısal frekans ile değişimi ($KC \cong 4$)

Burada kararlı akım koşullarında akım doğrultusundaki C_D kuvvet katsayısı (2.14) eşitliği, C_L kaldırma kuvveti katsayısı ise (2.20) eşitliği kullanılarak belirlenmiştir. İfadelerde, silindir üzerinde ölçülen basınç dağılımı ile belirlenen kuvvetin akıma dik doğrultudaki ve akım doğrultusundaki bileşenlerinin ortalama değerleri alınmıştır.

Bu çalışmada, (3.40) ve (3.41) denklemleri kullanılarak salt dalga durumunda silindire etkiyen akım doğrultusundaki kuvvetin atalet kuvveti ve sürüklenme kuvveti bileşenlerini gösteren C_M ve C_D kuvvet sabitleri belirlenmiştir. (3.40) ve (3.41) ifadeleri, akımın tam sinüzoidal yapıda olması durumunda geçerli olan ifadelerdir. Bu ifadelerin kullanılmasının nedeni, hız ölçümünde kullanılan mulinenin, dalganın geri dönüş periyodunda yarattığı ters yöndeki hızları da pozitif olarak algılamasıdır. Sinüzoidal akım kabulü yapılarak elde edilmiş bu ifadelerin kullanılabilmesi için, akımın o bölgede sinüzoidal olduğunun gösterilmesi gereklidir. Akımın sinüzoidal kabul edilebileceğini göstermek için; sadece dalga durumunda seçilen değişik akım şartlarında C_D sürüklenme katsayısı ve C_M atalet katsayısı, önce (3.38) ve (3.39) denklemlerinden en küçük kareler metodu ile, sonra da sinüzoidal akım kabulü yapılarak (3.40) ve (3.41) denklemlerinden hesaplanmıştır. Bu iki hesap yönteminin sonuçlarının verildiği Şekil 5.4 incelenirse, akımın yapısının sinüzoidal olarak kabul edilebileceği görülmektedir.



Şekil 5.4. Sinüzoidal akım kabulü ile hesaplanan akım doğrultusundaki C_D ve C_M kuvvet katsayılarının en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanan C_D ve C_M ile karşılaştırılması

Akıma dik doğrultudaki kuvvet katsayısının hesabında ise (3.28) eşitliği kullanılarak silindire etkiyen maksimum kaldırma kuvveti değerine karşı gelen C_{LMAX} kuvvet sabiti belirlenmiştir. Kuvvetin maksimum değerine karşı gelen C_{LMAX} kuvvet sabitinin belirlenmesinin nedeni, güvenli bir tasarım kriteri elde etmektir..

Akım ile dalganın birlikte görülmesi durumunda akım doğrultusundaki kuvvet katsayıları en küçük kareler yöntemi kullanılarak (3.38) ve (3.39) ifadeleri ile, akım dik doğrultudaki C_{LMAX} kuvvet katsayısı da yine sadece dalga durumundaki gibi (3.28) denklemiyle belirlenmiştir.

5.3. KUVVET KATSAYILARI (C_D , C_M , C_{LMAX})

5.3.1. Kararlı Akım Durumunda Kuvvet Katsayılarının Değişimi ($h=40\text{cm}$)

Kararlı akım etkisi ile silindire etkiyen kuvvetleri gösteren C_D ve C_{LMAX} kuvvet katsayılarının değerleri, tek silindir ve çift silindir için ayrı ayrı olmak üzere, değişik gömülme oranları (e/D), Re sayısı ve çift silindir halinde ölçüm silindirinin konumuna (x/D) bağlı olarak Tablo 5.2'de verilmektedir.

Tek silindir durumunda ve silindirin tabana oturması halinde silindir üzerindeki basınç dağılımı ile, tabana gömülmesi halindeki basınç dağılımı karşılaştırıldığında, çok belirgin farklar ortaya çıkmaktadır (Şekil 5.1 ve Tablo 5.1). Buna bağlı olarak silindirin tabana gömülmesi ile kuvvet katsayılarında da belirgin değişiklikler olduğu Tablo 5.2'den görülmektedir. Silindirin gömülme oranı arttıkça, yapı akım çizgilerine daha uygun bir geometriye sahip olduğunda, C_D sürüklenme kuvveti katsayısı aynı akım koşullarında daha küçük değerler almaktadır. Re sayısının büyük değerlerinde C_D 'de görülen düşüşün sebebi ise sınır noktasından ayrılma noktasının silindir üzerindeki hareketidir. Ayrılma noktası silindirin iz bölgesine doğru hareket ettiğinde, silindirin arka kısmında negatif basınç değerleri azalır, bunun sonucunda silindire etkiyen sürüklenme kuvveti de azalır. Bu durum gömülme oranının artması ile daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle $e/D = 0.48$ değerinde ayrılma noktasının yeri silindirin art kısmına geçmekte, arka kısmında negatif basınçları azaltmakta ve akım doğrultusundaki kuvvet de buna bağlı olarak azalmaktadır (Şekil 5.1 ve Tablo 5.2).

Tablo 5.2. Kararlı akım durumunda kuvvet katsayılar (Akım derinliği $h=40$ cm.)

	Gömülme Oranı (e/D)	Silindirlerin Konumu (x/D)	Re	Kuvvet Katsayıları	
				C_D	C_L
TEK SİLİNDİR	0	-	20700	0.68	0.62
	0	-	18459	0.70	0.67
	0	-	14850	0.74	0.57
	0	-	11763	0.79	0.53
	0	-	7650	0.85	0.77
	0.20	-	15379	0.63	0.64
	0.20	-	8505	0.70	0.72
	0.48	-	14000	0.29	1.32
	0.48	-	7800	0.47	1.67
ÇİFT SİLİNDİR	0	2	18765	0.29	0.32
			8946	0.70	0.42
	0	1.5	18000	0.48	0.43
			9396	0.82	0.52
	0	1	15939	0.35	0.28
			8217	0.72	0.33
	0	-1	11313	0.13	0.17
			6941	0.54	0.24
	0	1.5	22500	0.37	0.27
			10305	0.76	0.36
	0	-2	22230	0.27	0.31
			8748	0.68	0.39
	0.20	2	14000	0.22	0.53
			6244	0.55	0.62
	0.20	1.5	13668	0.58	0.62
			6841	0.67	0.71
	0.20	1	14388	0.24	0.44
			6399	0.59	0.53
	0.20	-1	14070	0.09	0.27
			6566	0.43	0.34
	0.20	-1.5	12060	0.27	0.35
			6030	0.60	0.52
	0.20	-2	10600	0.21	0.47
			6700	0.51	0.57
	0.48	2	9648	0.08	1.04
			4725	0.28	1.42
	0.48	1.5	9675	0.21	1.20
			5265	0.40	2.04
	0.48	1	10530	0.13	0.78
			5850	0.31	1.22
	0.48	-1	9378	0.06	0.62
			5625	0.22	0.82
	0.48	-1.5	10170	0.15	0.93
			5850	0.38	1.82
	0.48	-2	10125	0.08	0.97
			6300	0.24	1.27

Silindirin tabana oturduğu durumda aldığı değerler, Şekil 2.29 ve Şekil 2.31'de verilen çeşitli araştırmacıların benzer akım koşullarında elde ettikleri değerler ile karşılaştırıldığında, belirlenen C_D değerlerinin diğer çalışmalardan elde edilenler ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

Akıma dik doğrultudaki C_L kuvvet katsayısının tek silindir durumunda gömülme oranı ile değişimi, Şekil 5.1'deki basınç dağılımları da gözönüne alınarak incelendiğinde, gömülme oranı arttıkça C_L 'nin değerinin de arttığı görülmektedir. Bu artış, $e/D = 0$ 'a göre $e/D = 0.2$ 'de az olmakla birlikte, $e/D = 0.48$ değerinde büyük olmaktadır. Bunun sebebi Şekil 5.1'deki basınç dağılımı incelendiğinde açıkça görülmektedir. Şekil 5.1.a'da $e/D=0$ durumundaki basınç dağılımından görüleceği gibi, silindirin arka kısmında, eksenin alt tarafında negatif kaldırma kuvveti doğrultusunda (tabana doğru) oldukça büyük basınç değerleri görülmekte ve bu da kaldırma kuvvetini küçültmektedir. Buna bağlı olarak C_L kaldırma kuvveti katsayısı da azalmaktadır. $e/D = 0.20$ 'de, silindirin ekseninin altındaki kısım taban içerisinde kaldığından, buradaki tabana doğru olan basınç değerleri azalmakta, bu da tabandan yukarı doğru olan kaldırma kuvvetinin değerini arttırmaktadır. $e/D = 0.48$ 'de ise bu basınç etkisi hiç görülmediğinden, kaldırma kuvveti en büyük değerlerini almakta, buna bağlı olarak da C_L en büyük değerlerine ulaşmaktadır.

Deneylerden elde edilen C_L değerleri; Şekil 2.35, Şekil 2.36 ve Şekil 2.37'de verilen FREDSE ve diğ. (1985), ZDRAVKOVICH ve diğ. (1975) ve KALGATHI ve SAYER (1997)'nin benzer akım koşullarında elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırıldığında birbirilerine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Tabana paralel çift silindir bulunması durumunda değişik gömülme oranları göz önüne alınarak kuvvet katsayılarının değişimi incelendiğinde ise; genel olarak x/D 'nin pozitif değerlerinde, yani ölçüm silindiri menbada iken, mansaptaki silindir öndeki ölçüm silindirinin arkasındaki negatif basınç dağılımının oluşmasını engellemekte, bu yüzden C_D katsayısı tek silindire göre azalmaktadır. Bazı deney koşullarında $x/D=+2$ değerinde öndeki ölçüm silindiri arkadaki silindirden etkilenmemekte ve C_D kuvvet sabiti tek silindir değerine yaklaşmaktadır. $x/D = +1.5$

değerinde ise bazı deney serisinde tek silindire göre daha yüksek C_D değerleri belirlenmiştir. $x/D = +1$ durumunda ise C_D 'nin değeri oldukça küçülmektedir. Bunun sebebi, silindire etkiyen akım doğrultusundaki kuvvetin oluşmasında en önemli bileşen olan arka kısımdaki negatif basınç değerlerinin, ölçüm silindirin arkasındaki silindir ile bitişik durumda olması nedeni ile çok küçülmesi veya oluşmamasıdır.

x/D 'nin negatif değerlerinde ise genel olarak öndeki silindir etkisi ile ölçüm silindirine etkiyen akım doğrultusundaki kuvvette azalma olmaktadır. Bunun sebebi, menbadaki silindirin ölçüm silindirini perdelemesi ile silindirin ön yüzünde durak noktasındaki pozitif basınç değerlerinin azalması ve silindirin arka kısımdaki negatif basınç değerlerinin de menbadaki silindirin perdeleme etkisi ile daha küçük değerler almasıdır (Tablo 5.2.).

Kararlı akım durumunda kuvvet katsayılarının verildiği Tablo 5.2'deki değerler incelendiğinde, C_L kaldırma kuvveti katsayısının e/D oranı ve Re sayısına olan bağımlılığının C_D ile benzer olduğu görülür. Ölçüm silindiri civarındaki ikinci silindir, basınç dağılımını etkilediğinden genellikle C_L değerlerinde bir azalma gözlenmektedir. Fakat x/D 'nin $+1.5$ ve $+2$ değerlerinde bazı durumlarda tek silindirden de daha büyük C_L değerleri görülmektedir.

Çift silindir durumunda gömülme etkisi tek silindirdeki gibidir, yani gömülme oranı arttıkça C_D azalırken C_L artmaktadır.

Deneyler sırasında silindirlerin gömülme oranları değişse de kanalda referans noktadaki (silindirin tepe noktası) hızın aynı değeri alması sağlanarak deneyler yapılmıştır. Fakat Re sayısının belirlenmesinde karakteristik uzunluk olarak cismin akıma dik doğrultudaki boyutu alındığından, gömülme oranı arttıkça bu boyut azalmakta ve bu yüzden Re sayısının değeri azalmaktadır.

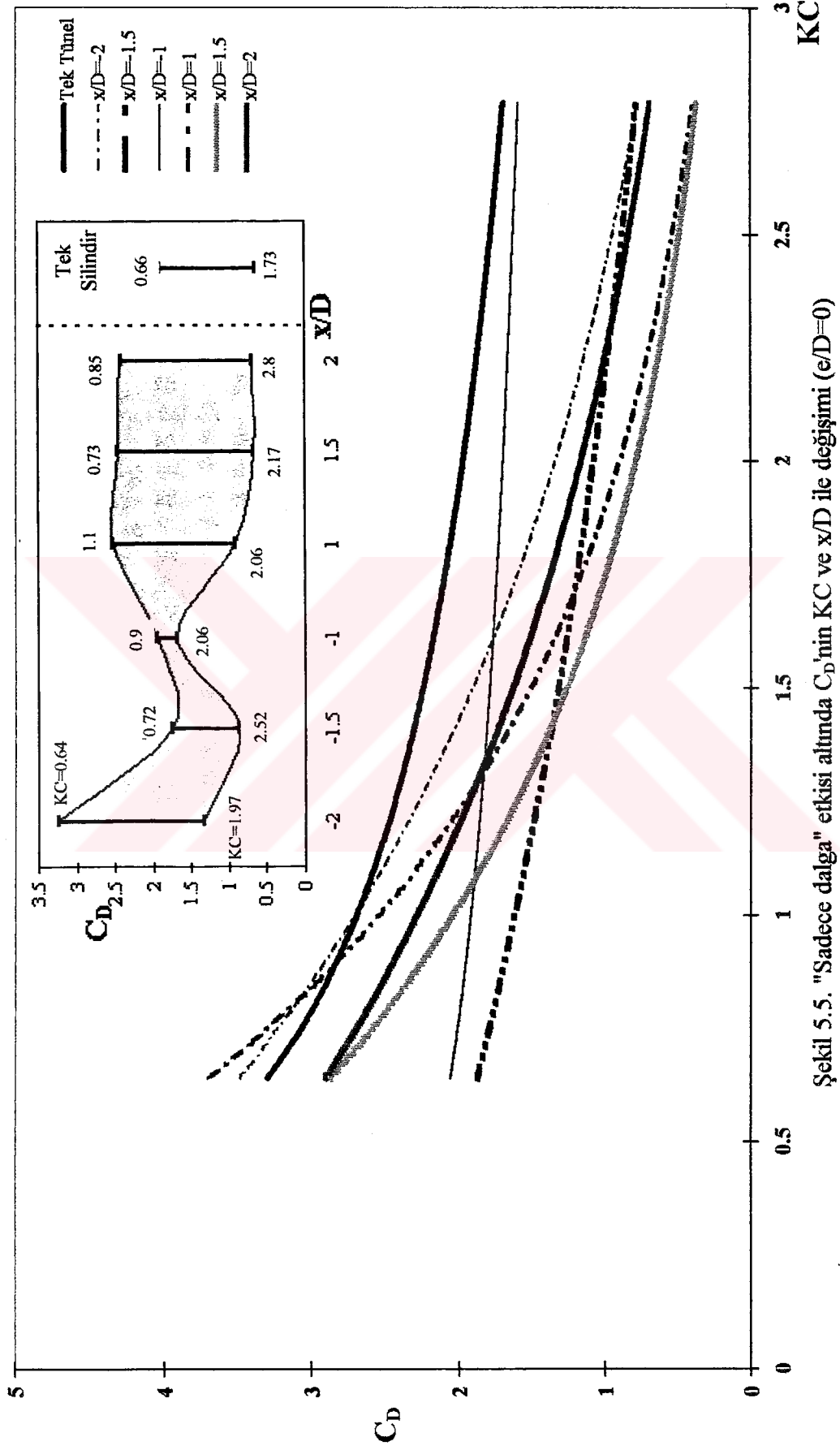
5.3.2. Sadece Dalga Etkisinde Kuvvet Katsayılarının Değişimi ($h = 40$ cm)

Ortamda salt dalga etkisinin bulunması durumunda, silindire etkiyen akım doğrultusundaki C_D ve C_M kuvvet katsayıları ile akıma dik doğrultudaki C_L kuvvet katsayısındaki değişimin, sınır şartları (tek-çift silindir durumu, değişik gömülme oranları) ve farklı akım koşulları (değişik KC katsayıları) etkisinde ne şekilde değiştiği Şekil 5.5-5.13'den görülmektedir.

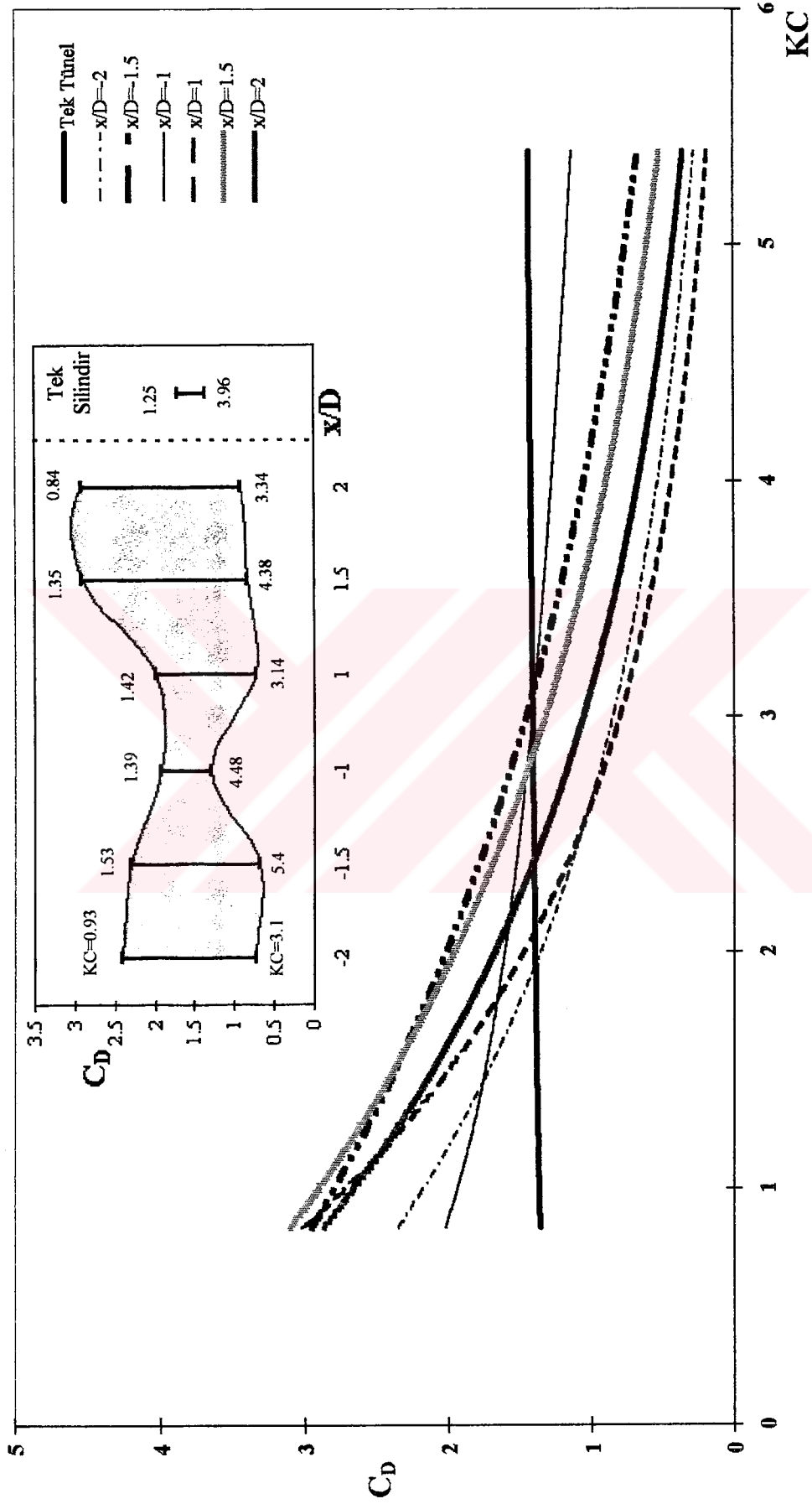
Tek silindir olması hali

C_D sürüklenme kuvveti katsayısının değeri, KC'nin artışı ile her gömülme oranında azalmaktadır (Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7). Gömülme oranının artması ile C_D 'nin değerinde azalma görülmektedir. Aynı kararlı akımda olduğu gibi gömülme oranının artması ile şeklin geometrisinin akım çizgilerine daha uygun hale gelmesi ile C_D azalmaktadır. Şekil 3.50'de benzer akım koşullarında SÜMER ve diğ. (1991) tarafından yapılan bir çalışmadan elde ettikleri ve Şekil 3.50'de verilmiş olan sonuçlar ile bu çalışmada Şekil 5.5'te verilen sonuçlar karşılaştırıldığında, silindirin tabana oturması durumunda her iki çalışmada da benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

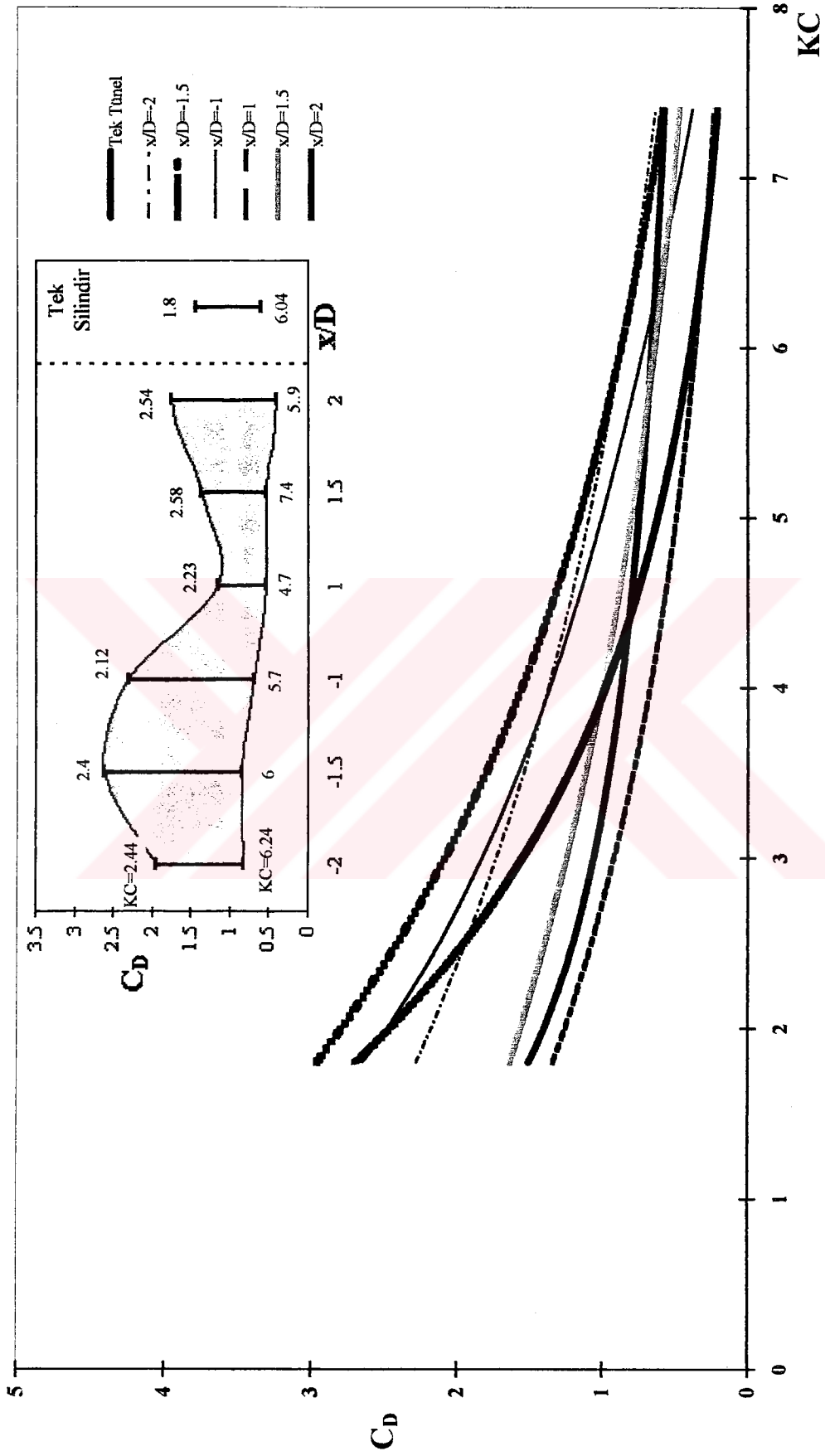
Atalet kuvveti katsayısının (C_M) değişimi incelendiğinde ise, görülen; $e/D=0$ değerinde KC'nin değişimi ile hemen hemen sabit olan bu katsayı, e/D 'nin artan değerlerinde ($e/D = 0.20$ ve 0.48) KC'deki artışla artmakta, özellikle $e/D=0.48$ değerinde büyük bir artış gözlenmektedir (Şekil 5.8). Büyük KC sayılarında dalganın hareketinin genliği, silindirin çapından daha büyük olduğundan ek kütle tam olarak oluşmakta ve küçük KC sayılarına göre C_M 'deki artış olmaktadır (Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10). Çalışmada tabana oturan silindir durumunda elde edilen atalet kuvveti katsayısı (C_M) değerleri, SÜMER ve diğ (1991) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen Şekil 3.51'deki sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.



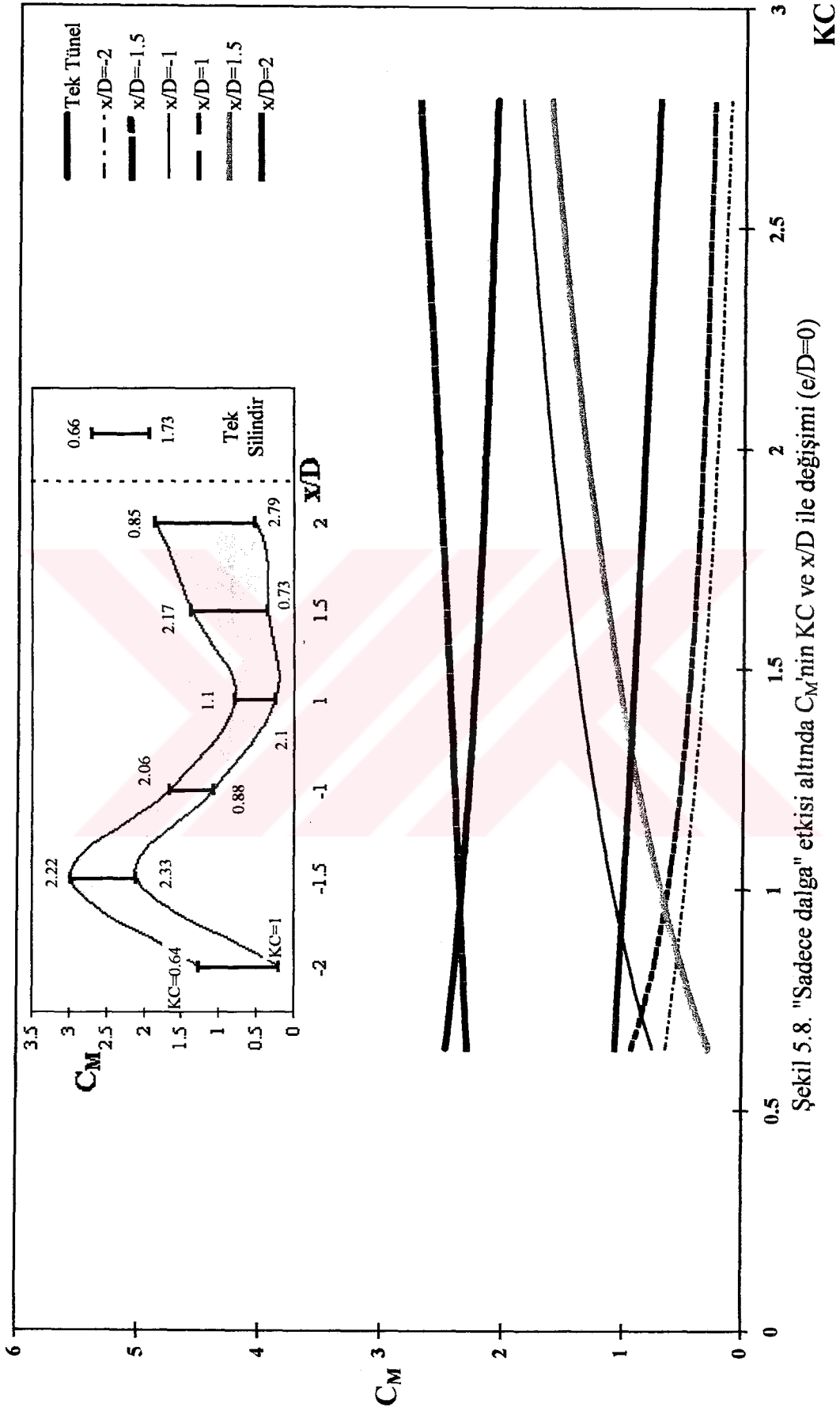
Şekil 5.5. "Sadece dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$)



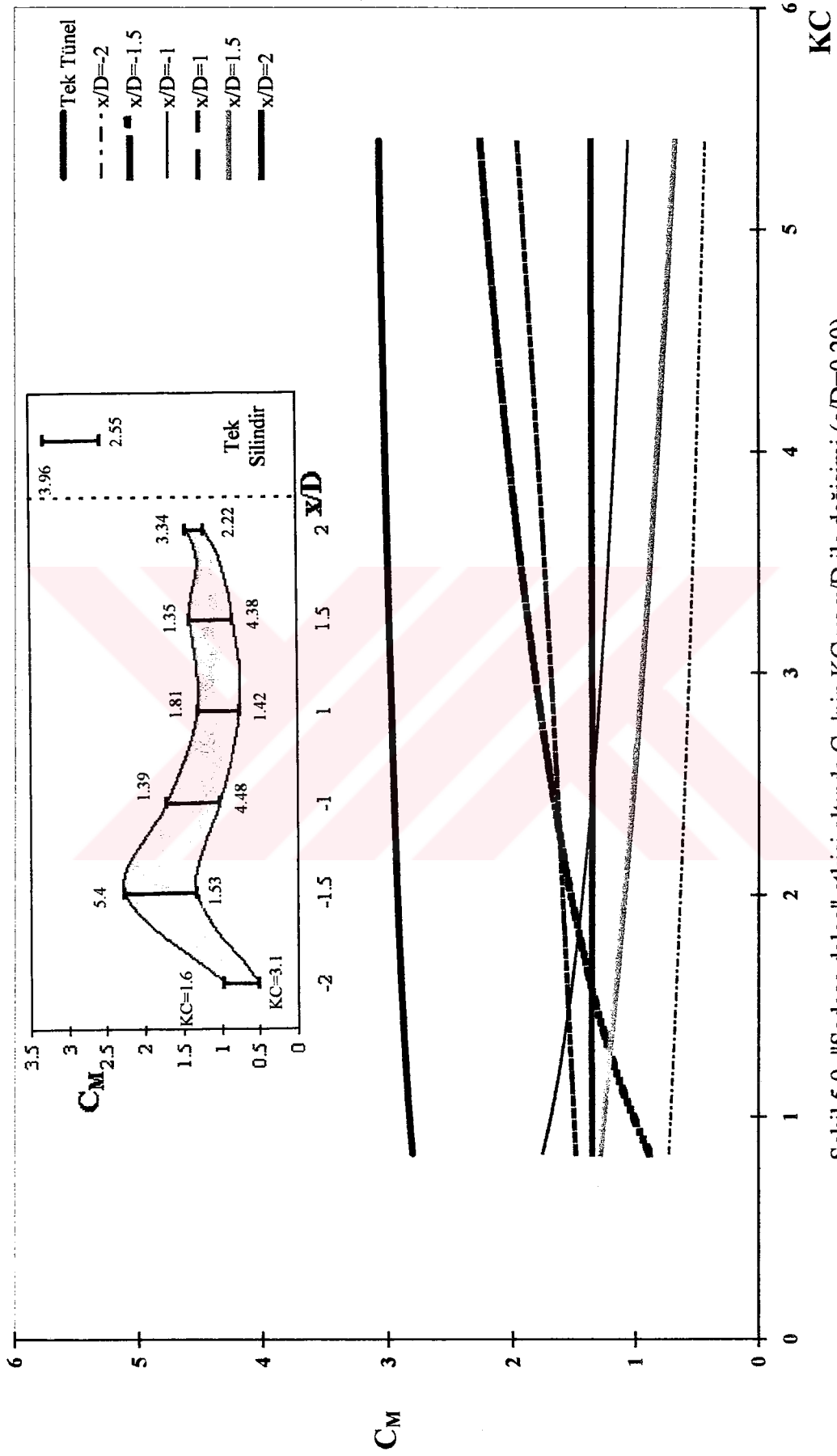
Şekil 5.6. "Sadece dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$)



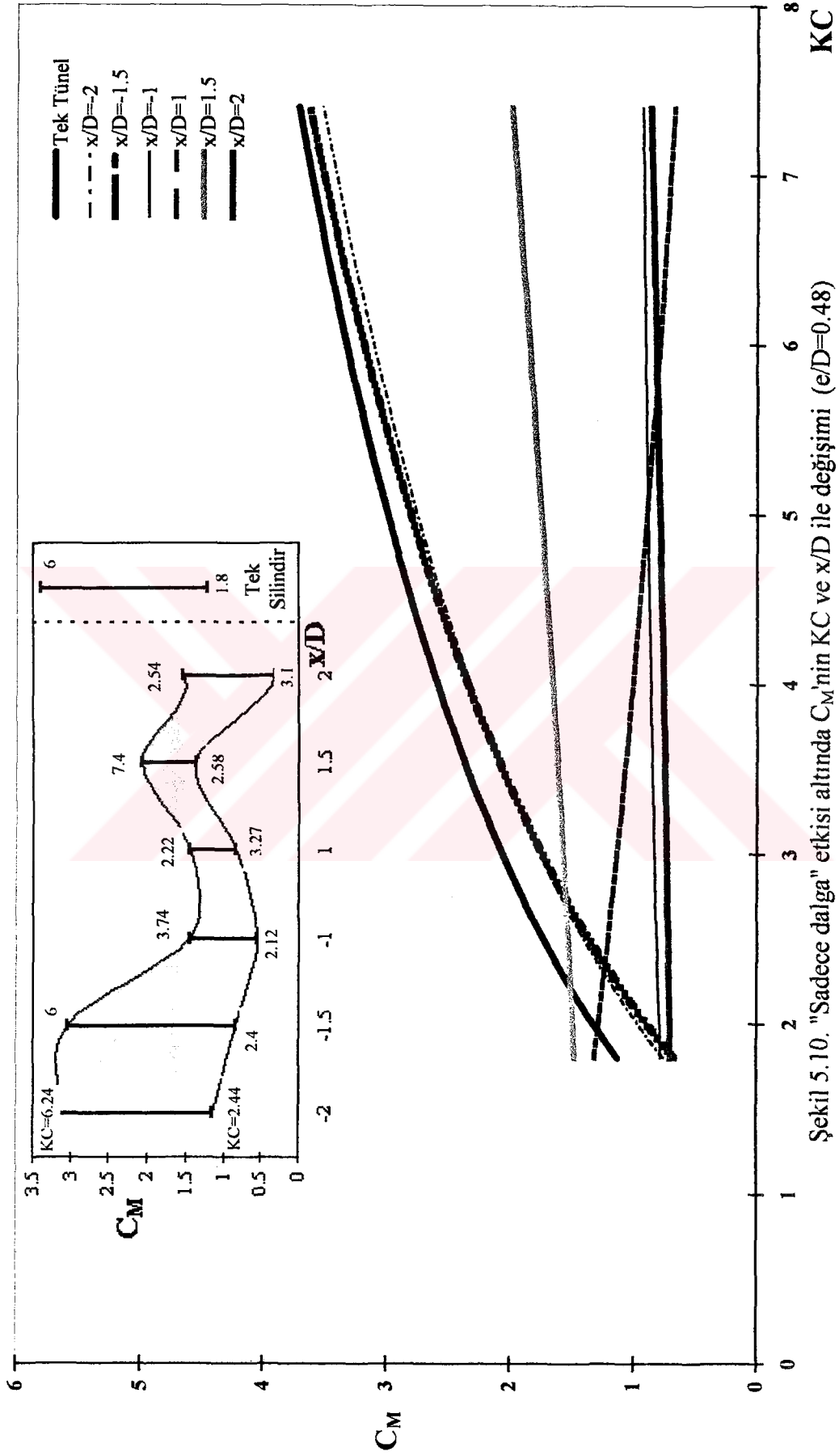
Şekil 5.7. "Sadece dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$)



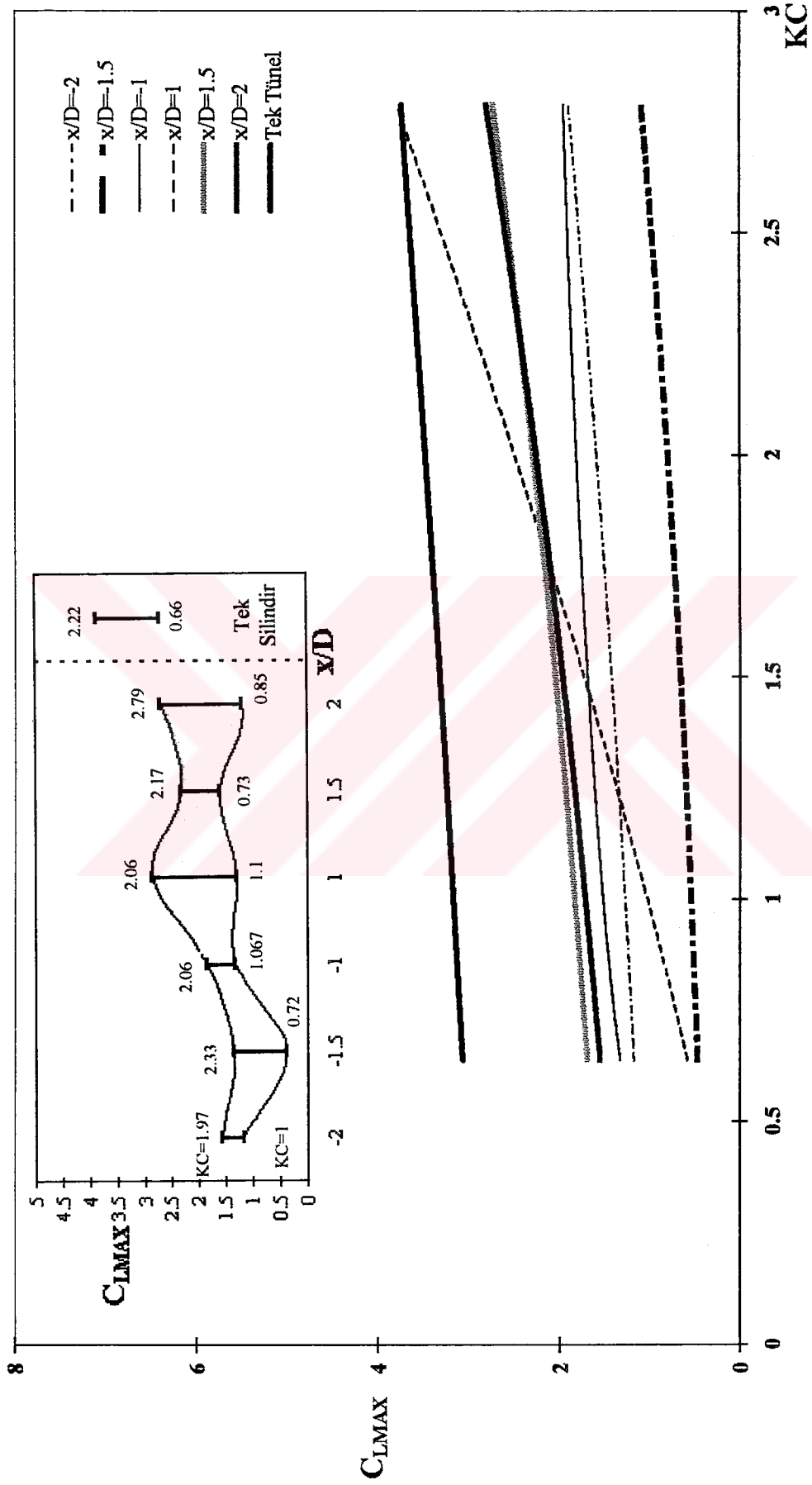
Şekil 5.8. "Sadece dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$)



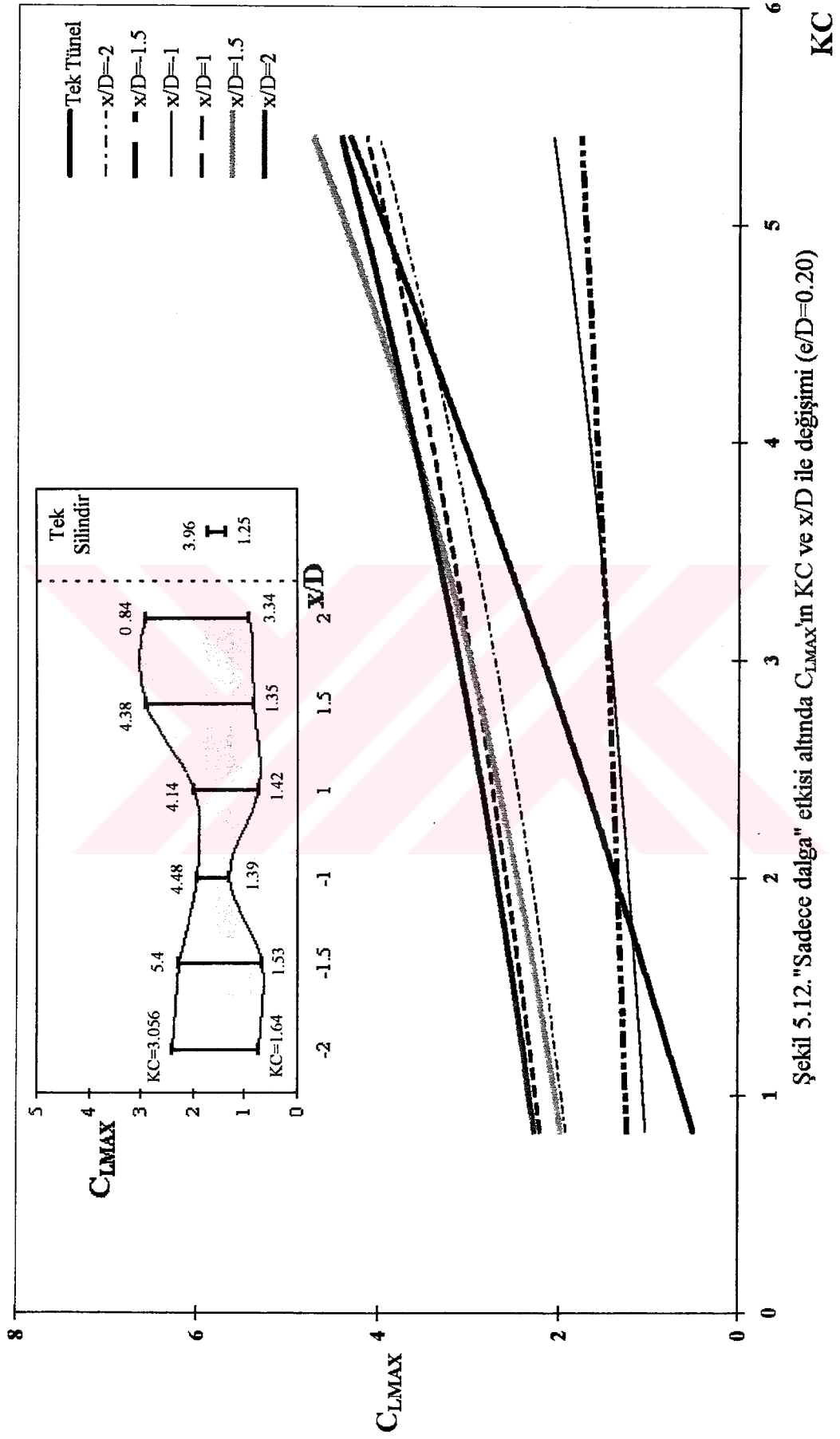
Şekil 5.9. "Sadece dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$)



Şekil 5.10. "Sadece dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$)

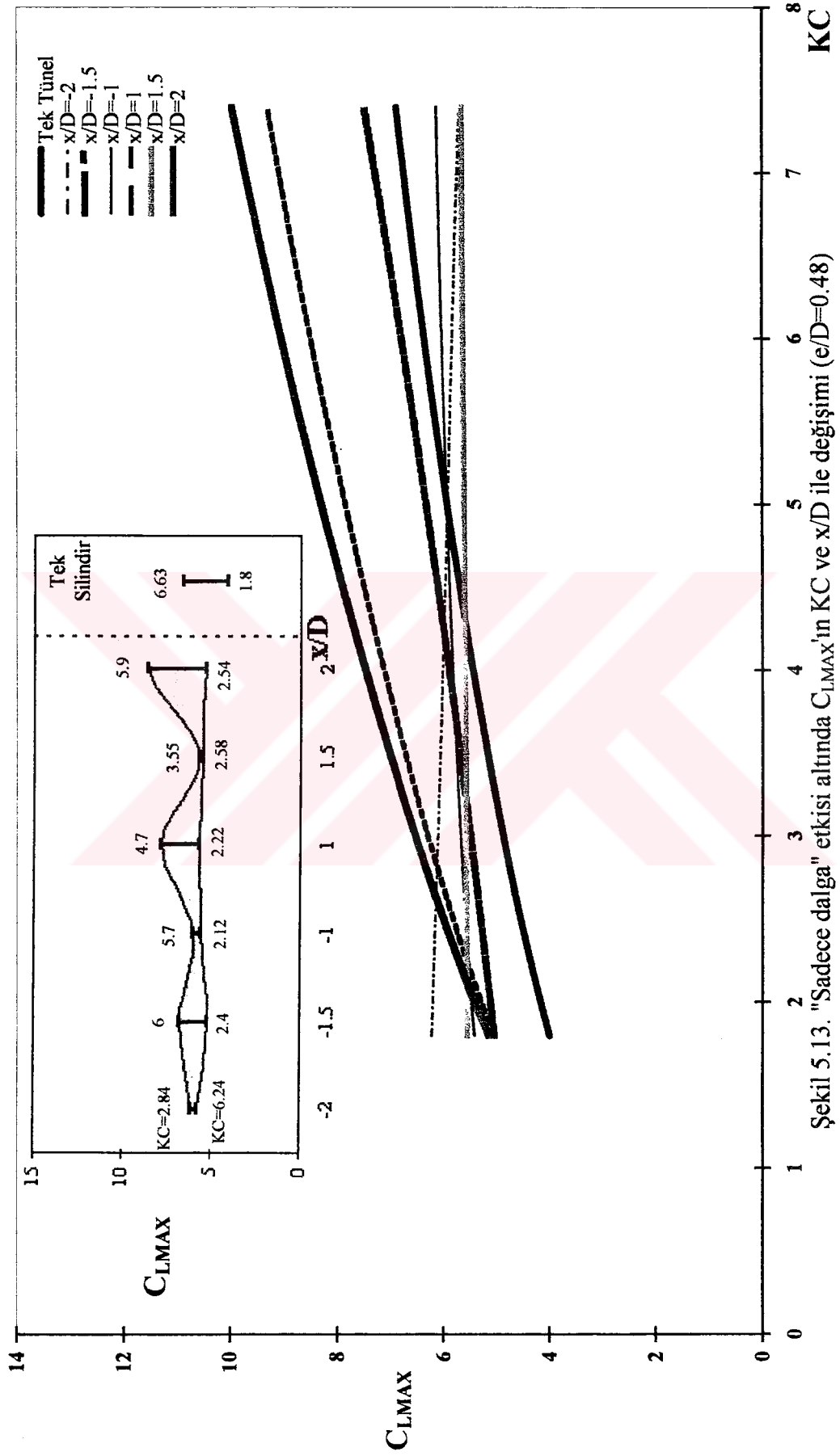


Şekil 5.11. "Sadece dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$)



Şekil 5.12. "Sadece dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$)

KC



Şekil 5.13. "Sadece dalga" etkisi altında CL_{MAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$)

Kaldırma kuvveti katsayısı C_{LMAX} 'ın değişimi Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te verilmektedir. Buradan da görüldüğü gibi, silindirin tabana oturması (e/D) durumunda C_{LMAX} KC ile çok az değişmektedir. $e/D = 0.20$ ve 0.48 değerinde ise C_{LMAX} 'ın değerleri KC'ye bağlı olarak artmaktadır. Gömülme oranının artması ile özellikle büyük KC sayılarında C_{LMAX} 'ın değerinde artış olduğu görülmektedir. Büyük KC sayılarında her bir periyotta hareketin genliğinin büyük olması, basınç dağılımının kararlı akımdaki gibi olmasını ve silindirin iz bölgesinde negatif basınçların oluşmasını sağlamaktadır. Tabana oturan silindir durumunda silindire etkiyen C_L kaldırma kuvveti katsayısının aldığı değerler, benzer akım koşullarında SÜMER ve diğ. (1991) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonuçları ile (Şekil 3.49 ve Şekil 3.52) uyum içerisinde

Çift silindir olması hali

Değişik gömülme oranlarında sürüklenme kuvveti katsayısı C_D 'nin, KC ile değişimi;

a) $e/D=0$ durumu: Sürüklenme kuvveti katsayısı x/D 'nin pozitif değerlerinde (ölçüm silindiri menbada iken) bir miktar artmaktadır. Özellikle küçük KC sayılarında bu artış Şekil 5.5'ten de görüleceği gibi daha belirgin olmaktadır. Küçük KC sayılarındaki hareketin genliğinin küçük olması nedeni ile kararlı akımda silindirin arka kısmında görülen negatif basınç dağılımı tam olarak oluşmamakta ve olay üzerinde sadece ön yüzdeki pozitif basınçlar etkili olmaktadır. Geriye dönüşün olduğu diğer periyotta ise, diğer silindir ölçüm silindirini perdelediğinden ters yönde hız azalmakta ve bir periyod boyunca etkiyen kuvvete göre hesaplanan C_D sayısının değeri artmaktadır. Ölçüm silindirinin mansapta olduğu x/D 'nin negatif değerlerinde ise KC'nin artışı ile C_D 'de azalma görülmektedir. $x/D = -1$ durumunda, öndeki silindirin etkisi ile C_D tek silindir durumuna göre bir miktar azalmakta, fakat KC'nin artışı ile hemen hemen hiç değişmemektedir. $x/D = -1.5$ değerinde KC artıkça C_D 'de belirgin bir azalma gözlenmekte, genel olarak en küçük C_D sayılarına bu konumda karşılaşılmaktadır. $x/D = -2$ durumunda, özellikle küçük KC sayılarında C_D 'de önemli bir artış olmaktadır. Bu kritik durumda, iki silindir arasındaki bölgedeki akışkan

hareketinin salımlı hareket ile etkileşmesi sonucunda oluşan ikincil akıntılar etkilidir (Şekil 5.5).

b) $e/D=0.20$ durumu: Değişik x/D değerlerinde bu gömülme oranında çift silindirin değişik durumlarında C_D 'nin KC ile değişimi Şekil 5.6'da verilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi, $e/D=0$ konumuna oranla burada geometri akım çizgilerine göre daha uygun hale geldiği için, genelde C_D 'nin değeri azalmaktadır. C_D 'nin değerlerinde x/D 'nin her değerinde genel olarak KC 'nin artışı ile bir azalma görülmektedir. $x/D=-1$ değerinde C_D 'nin KC ile değişimi diğerlerine göre daha azdır. Büyük KC sayılarında C_D , diğerlerine göre $x/D=-1$ durumunda daha büyük değerler almaktadır (Şekil 5.6).

c) $e/D=0.48$ durumu: Bu gömülme oranında C_D 'nin KC ile değişimi değişik x/D değerleri gözönüne alınarak izlenirse, doğal olarak diğer gömülme oranlarına göre bir azalma olduğu görülür (Şekil 5.7). Genel olarak KC arttıkça C_D 'nin değerinde bir azalma görülmektedir. Bu gömülme oranında dikkati çeken en önemli özellik, x/D 'nin negatif değerlerinde C_D 'nin değerlerinin x/D 'nin pozitif değerlerine göre daha büyük olmasıdır (Şekil 5.7). Bu durum Şekil 5.1c'de verilen basınç dağılımı incelenerek açıklanabilir. Bu gömülme oranında durak noktası silindirin üst kısımlarında olmaktadır. Silindire etkiyen asıl büyük kuvvet, arka taraftaki negatif bölgede olmaktadır. x/D 'nin negatif değerlerinde silindirin arka kısmındaki basınç değerleri C_D 'yi arttırmakta; x/D 'nin pozitif değerlerinde, ölçüm silindirinde oluşacak bu bölgedeki negatif basınçları diğer silindir engellemektedir.

Sadece dalga etkisi altında değişik gömülme oranları için C_M atalet kuvveti katsayısının x/D ile değişimi:

a) $e/D=0$ durumu: Silindirin tabana oturduğu bu durumda, C_M 'nin x/D ve KC ile değişimi Şekil 5.8'den incelendiğinde, ilk göze çarpan, x/D 'nin negatif değerlerinde (ölçüm silindiri diğer silindirin mansabında) C_M değerlerinde bir artışın olduğudur. Bunun nedeni, menbadaki silindirin akıma etkisi sonucunda ortaya çıkan su kütlelerinin ek kütle olarak arkadaki silindire etkimesidir. $x/D=-1.5$ değerinde

silindirler arasındaki bölgenin hareketi ile ek kütle artmakta ve bu durumda C_M en büyük değerleri almaktadır. $x/D=-2$ durumunda ise silindirler arasındaki uzaklık arttığından ilk silindirin ek kütlesi ikinci silindiri etkileyememekte bu yüzden C_M azalmakta ve benzer koşullar altındaki $x/D=+2$ durumundakine yakın değerler almaktadır (Şekil 5.8). x/D 'nin pozitif değerlerinde ise mansaptaki silindir, ölçüm silindirinin oluşturacağı ek kütlenin yerinde olduğundan, ek kütle azalmakta ve buna bağlı olarak C_M de azalmaktadır. Tek silindir durumunda ise ek kütle diğer silindirden etkilenmediğinden en büyük değerleri almaktadır. Ölçüm aralığında KC'nin değişimi ile tek silindirin C_M sayılarında önemli bir değişiklik olmamaktadır.

b) $e/D=0.20$ durumu: Bu gömülme oranında, çift silindir durumunda C_M 'in KC ile değişimi Şekil 5.9'da görülmektedir. e/D 0 olduğu durumundakine benzer bir durum burada da görülmekte ve çift silindir durumundaki C_M katsayıları tek silindirdekenden daha küçük olmaktadır. Bunun sebebi, ölçüm silindiri yakınındaki diğer bir silindirin ölçüm silindirini etkileyen su kütlesi içerisinde yer alarak ek kütle etkisini azaltması, bunun sonucunda C_M 'in azalmasıdır. Şekil 5.9'da göze çarpan bir diğer özellikte, x/D 'nin negatif değerlerinde C_M 'de artış olmasıdır. Özellikle $e/D=0$ durumundaki gibi $x/D=-1.5$ değerinde de bir artış görülmektedir.

c) $e/D=0.48$ durumu: x/D 'nin değişik değerlerinde C_M 'in KC ile değişimi Şekil 5.10'dan görülmektedir. Diğer gömülme oranlarındaki gibi burada da çift silindir durumundaki C_M değerleri tek silindir durumuna göre küçük kalmakta, ölçüm silindirinin mansabında kalması durumunda da C_M 'de artış olmaktadır. KC ile C_M 'in değişimi incelendiğinde, $x/D=-1.5$ ve -2 değerlerindeki değişim tek silindir durumuna çok benzemektedir. Bunun sebebi, bu geometride x/D 'nin -1.5 ve -2 değerlerinde artık arkadaki silindir öndekinden etkilenmemesi ve tek silindir olarak davranmasıdır. x/D 'nin pozitif değerlerinde ise C_M değerleri tek silindire göre oldukça küçük değerler almaktadır.

Sadece dalga durumunda kaldırma kuvveti katsayısı C_{LMAX} 'ın KC ile değişimi:

a) $e/D=0$ durumu: Silindire etkiyen C_{LMAX} kaldırma kuvveti katsayısının değişik çift silindir kombinasyonlarında KC ile değişimi Şekil 5.11'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, C_{LMAX} , çift silindir durumunda, tek silindire göre daha düşük değerler almaktadır. Dikkati çeken bir diğer durum da, $x/D=+1$ konumunda C_{LMAX} 'ın değerindeki artıştır. Ölçüm silindirinin membada ve mansaptaki diğer silindir ile bitişik konumda olması nedeni ile ölçüm silindirinin iz bölgesinde eksenin altındaki kısmı akım ile temasta olamamaktadır. Bunun etkisi ile bu kısımda kaldırma kuvveti ile ters yönde negatif basınçlar oluşamamakta ve bu yüzden kaldırma kuvveti artmaktadır.

b) $e/D=0.20$ durumu: C_{LMAX} 'ın x/D ve KC ile değişimi Şekil 5.12'de görülmektedir. Tek silindir durumundakine benzer olarak e/D arttıkça C_{LMAX} 'ın değerleri de genel olarak artmaktadır. Gömülme oranının artması ile birlikte ilk göze çarpan nokta, çift silindir durumunda C_{LMAX} 'ın değerlerinin özellikle küçük KC sayılarında tek silindir durumuna göre daha büyük değerler almasıdır. Büyük KC sayılarında ise x/D 'nin -1.5 ve -2 değerleri haricinde kaldırma kuvveti katsayıları tek silindir durumu ile yaklaşık olarak aynı değerleri almaktadır (Şekil 5.12).

b) $e/D=0.48$ durumu: Bu gömülme durumunda tabanda birbirine paralel çift silindir bulunması, kaldırma kuvvetini bir miktar arttırmasına rağmen, C_{LMAX} KC ile çok fazla değişmemektedir (Şekil 5.13). $x/D=1$ ve 2 değerlerinde ise C_{LMAX} değerinde KC'ye bağlı bir artış olmaktadır.

Deneyler sırasında referans noktasındaki hızın yaklaşık olarak aynı değeri alması hedeflenmiştir. KC sayılarının hesabında karakteristik uzunluk olarak akıma dik doğrultudaki boy alındığından, gömülme oranı arttıkça karakteristik uzunluk azalmış ve KC değerleri de artmıştır.

5.3.3. Akım İle Dalganın Birlikte Görülmesi Durumunda Kuvvet Katsayılarının Değişimi (h=40 cm)

Akım ortamında dalga ve kararlı akımın birlikte bulunması durumunda silindire etkiyen akım doğrultusundaki ve akıma dik doğrultudaki kuvvetlerini karakterize eden C_D , C_M ve C_{LMAX} kuvvet katsayıları belirlenerek bu katsayıların KC , x/D ve e/D ile değişimleri incelenmiştir. Buradaki deney serilerinde α (U_c/U_m) oranı sabit ve yaklaşık olarak 5 değerindedir. Keulegan Carpenter sayısı (KC);

$$KC = \frac{(U_c + U_m) T}{D} \quad (5.3)$$

olarak hesap edilmiştir. Kuvvet katsayılarının akım ve sınır şartları ile değişimi aşağıda verilmiştir.

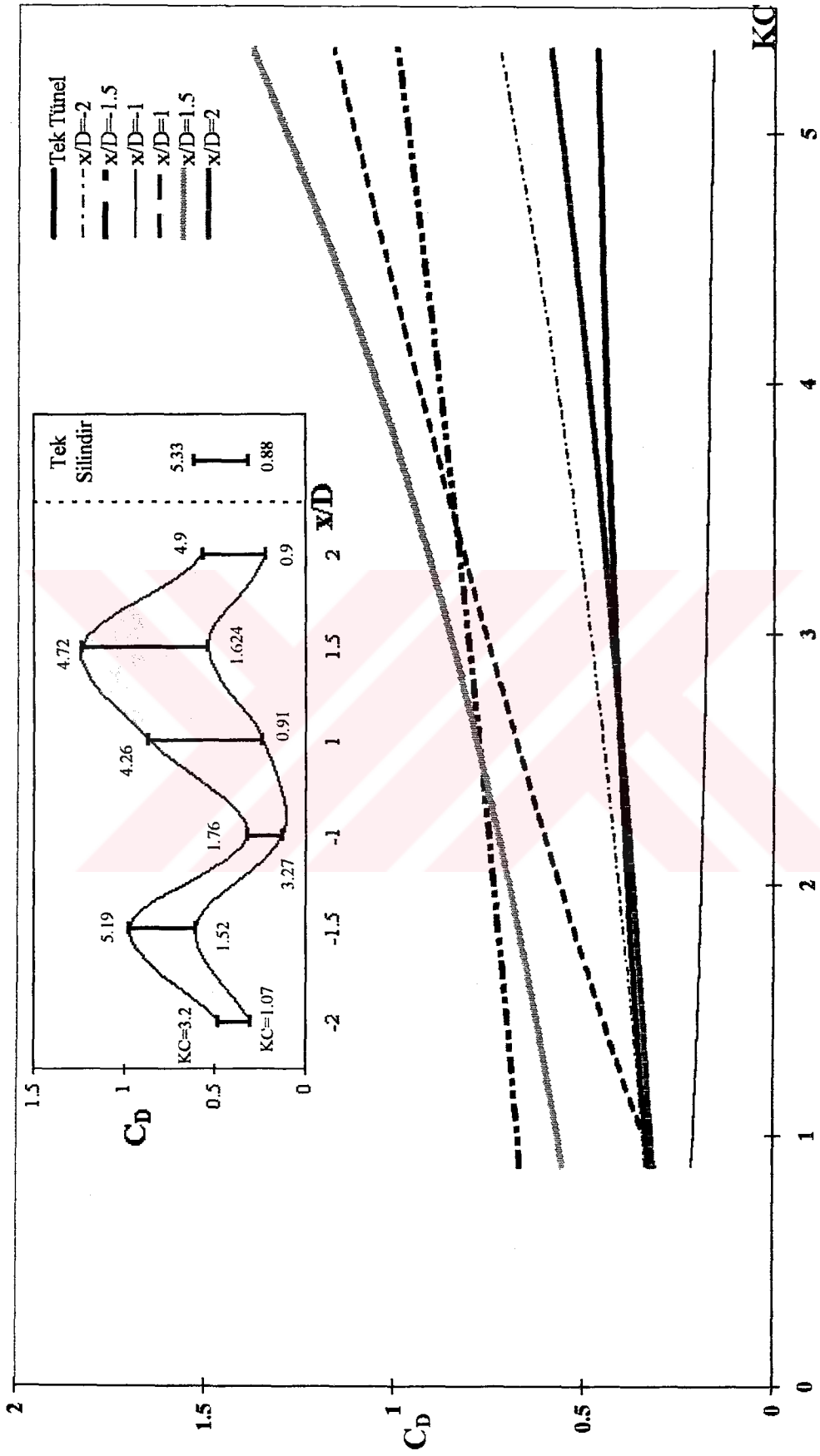
Tek Silindir Durumunda Kuvvet Katsayılarının Değişimi:

Sürüklemeye kuvveti katsayısının değişimi:

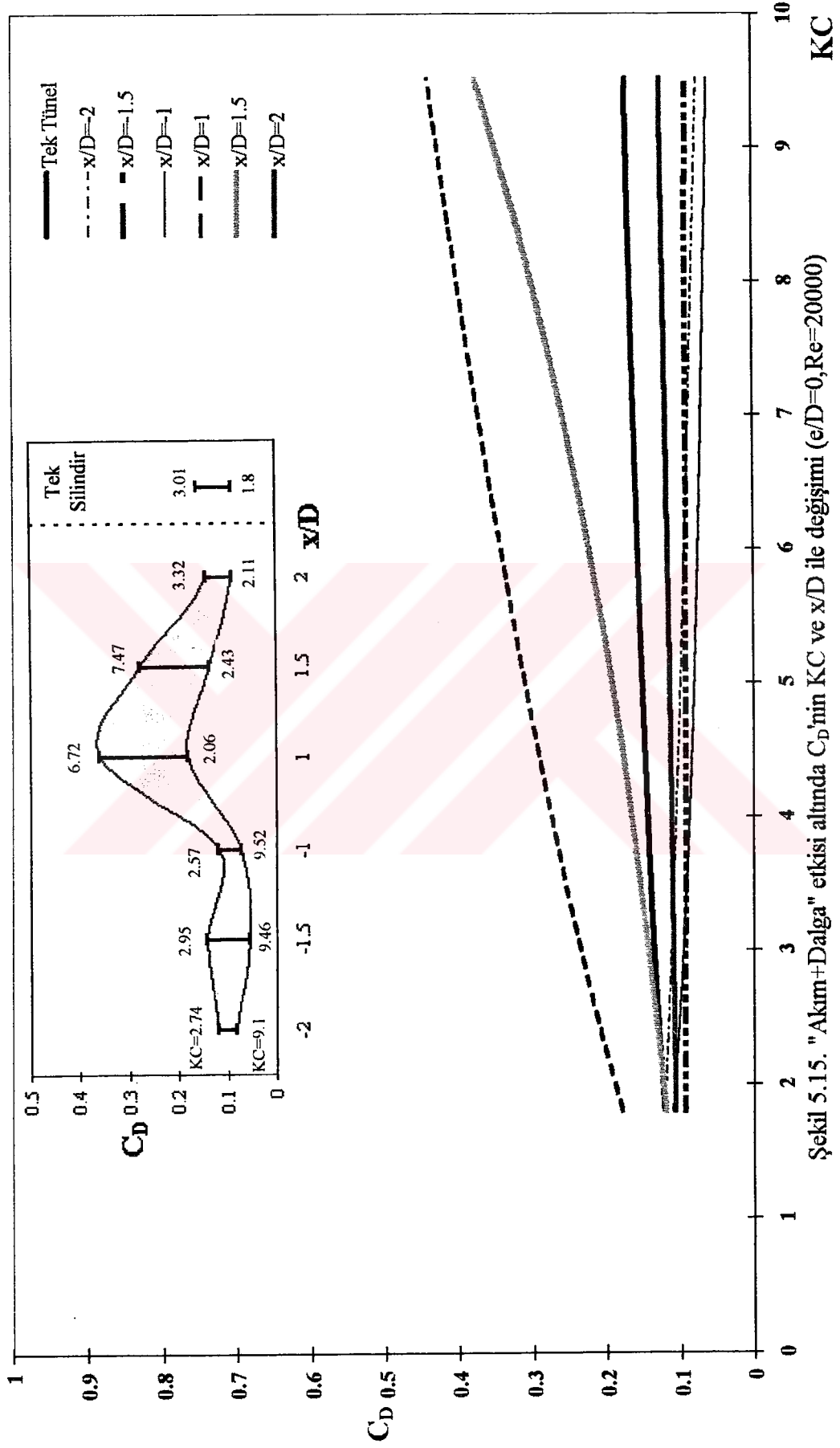
a) $e/D=0$ durumu: Akım ile dalganın birlikte akım ortamında görülmesi durumunda tek silindire etkiyen C_D sürüklemeye kuvveti katsayısının $e/D=0$ durumunda KC ile değişimi Şekil 5.14 ile Şekil 5.15'den görülmektedir. Şekil 5.14 ve 5.15 arasındaki fark, akımın Re sayısından ileri gelmektedir. Burada Re sayısı;

$$Re = \frac{(U_c + U_m)}{v} \quad (5.4)$$

olarak belirlenmiştir. Şekil 5.14'den C_D 'nin KC ile değişimi incelendiğinde; C_D 'nin değerinin, Re sayısının 1.3×10^4 olduğu durumda yaklaşık olarak 0.4 değeri civarında olduğu görülür. Re sayısı 2×10^4 değerini aldığı zaman ise, C_D yine KC 'nin değişimi ile yaklaşık olarak sabit kalmakta, fakat değeri 0.15 civarında olmaktadır (Şekil 5.15). Re sayısının artması ile ayrılma noktasının silindir üzerindeki yerinin



Şekil 5.14. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=13000$)



Şekil 5.15. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0, Re=20000$)

değişmesi sonucunda arka kısımda görülen negatif basınçların değerlerinin azalması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır.

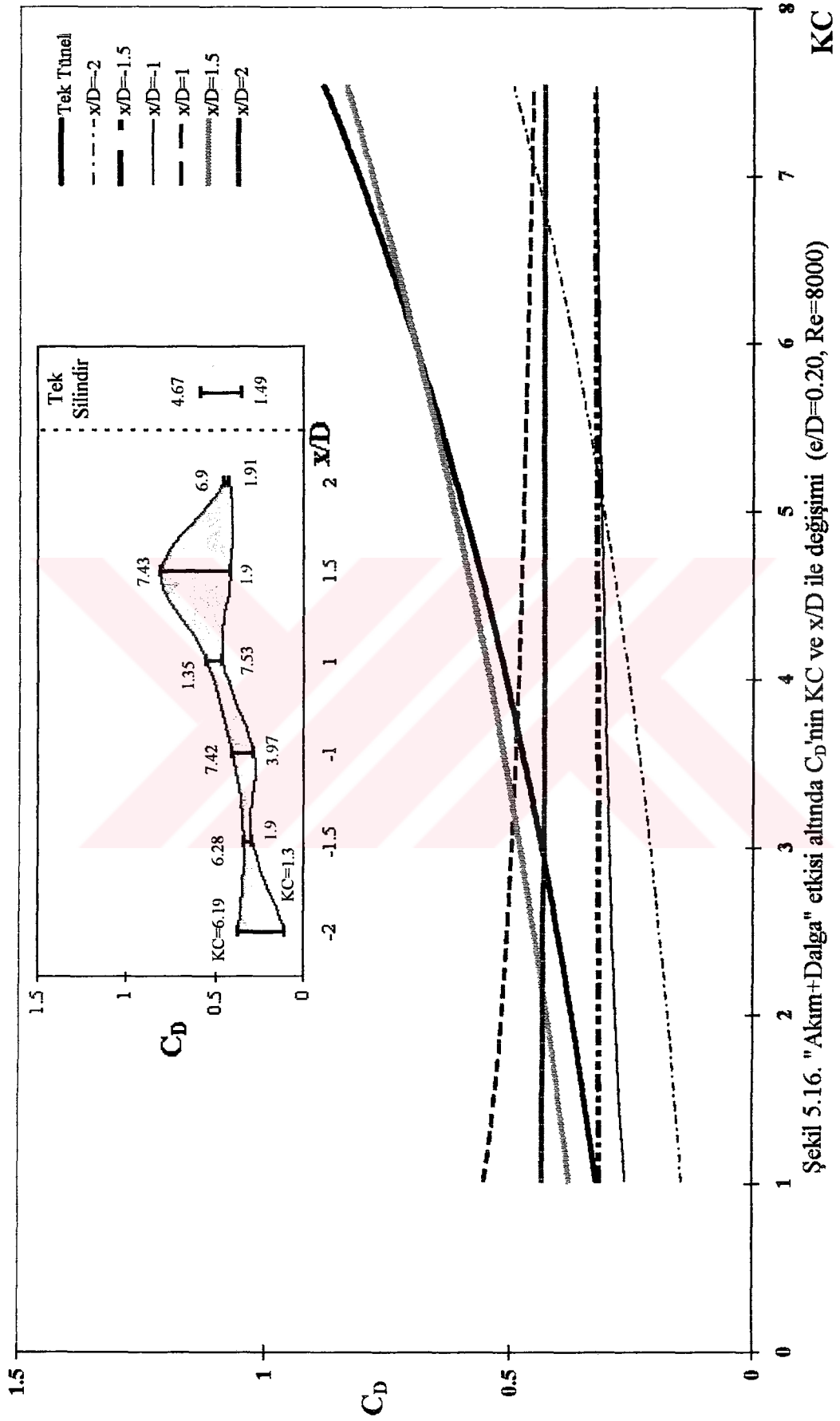
b) $e/D=0.20$ durumu: Silindir tabana %20 gömülerek geometrisinin değiştiği bu konumda C_D 'nin tek silindir durumu için değişimi Şekil 5.16 ile Şekil 5.17'de görülmektedir. Tek silindir durumunda, $Re=0.8 \times 10^4$ değerinde C_D , KC ile artmakta, C_D 'nin değerleri büyük KC sayılarında $e/D=0$ durumdan bile büyük olmaktadır (Şekil 5.15). Re sayısının büyük değer aldığı (1.8×10^4) durumunda ise, C_D 0.2'den küçük değerler almaktadır (Şekil 5.17).

c) $e/D=0.48$ durumu: Şeklin geometrisindeki değişim, akım+dalga durumunda silindire etkileyen sürüklenme kuvveti katsayısında önemli değişikliğe yol açmaktadır.

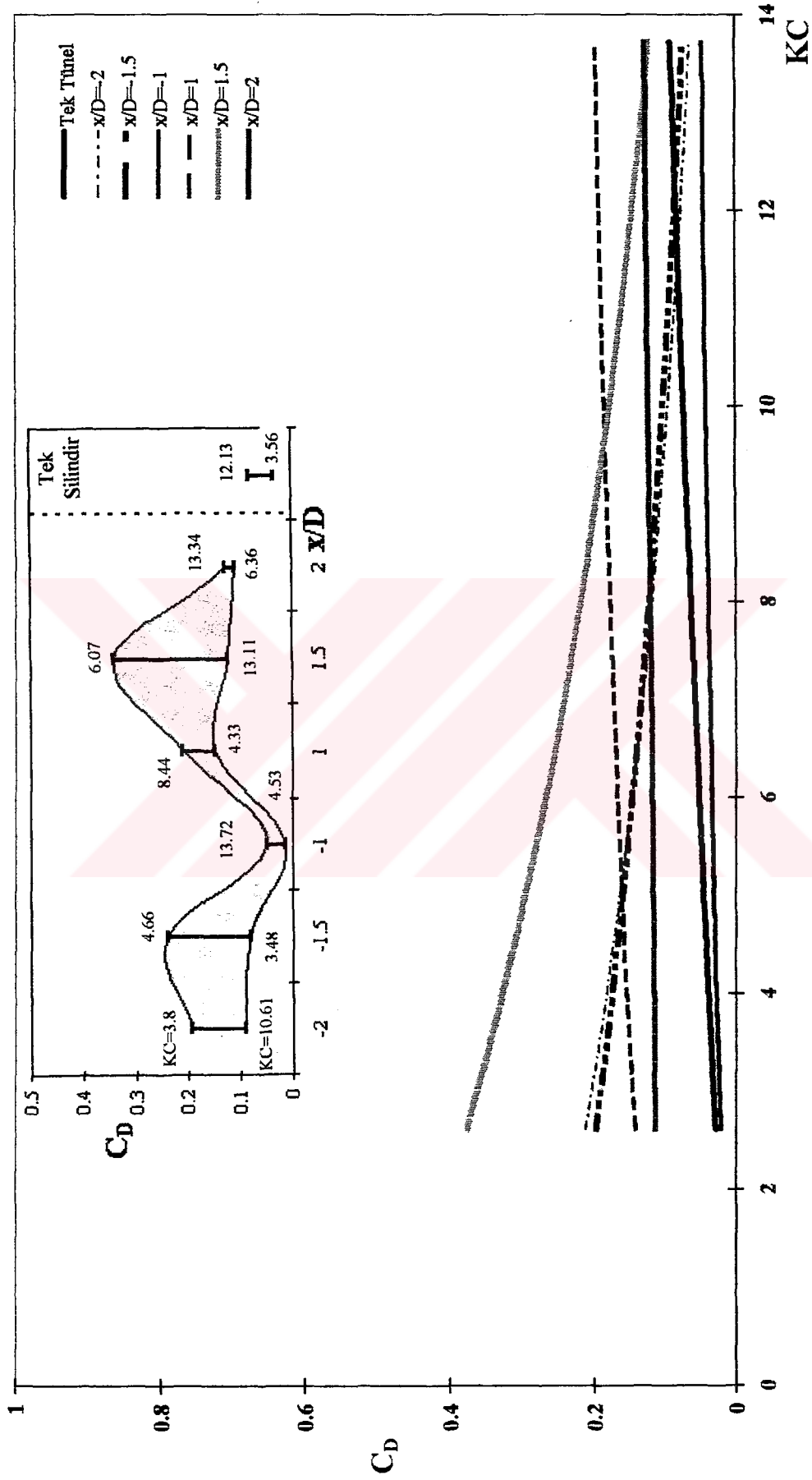
C_D 'nin $Re=0.7 \times 10^4$ ve 1.2×10^4 değerlerinde KC ile değişimi Şekil 5.18 ile Şekil 5.19'da verilmektedir. Bu gömülme oranında Re 0.7×10^4 iken C_D 'nin KC ile çok büyük değişikliğe uğramadığı ve çok küçük değerler aldığı Şekil 5.18'den görülmektedir. Re sayısının 1.2×10^4 değerine yükseldiği durumda da C_D , KC ile çok fazla değişmemekte, fakat C_D 'nin değeri $Re=0.7 \times 10^4$ durumuna göre bir miktar azalmaktadır.

Atalet kuvveti katsayısının (C_M) tek silindir durumundaki değerleri:

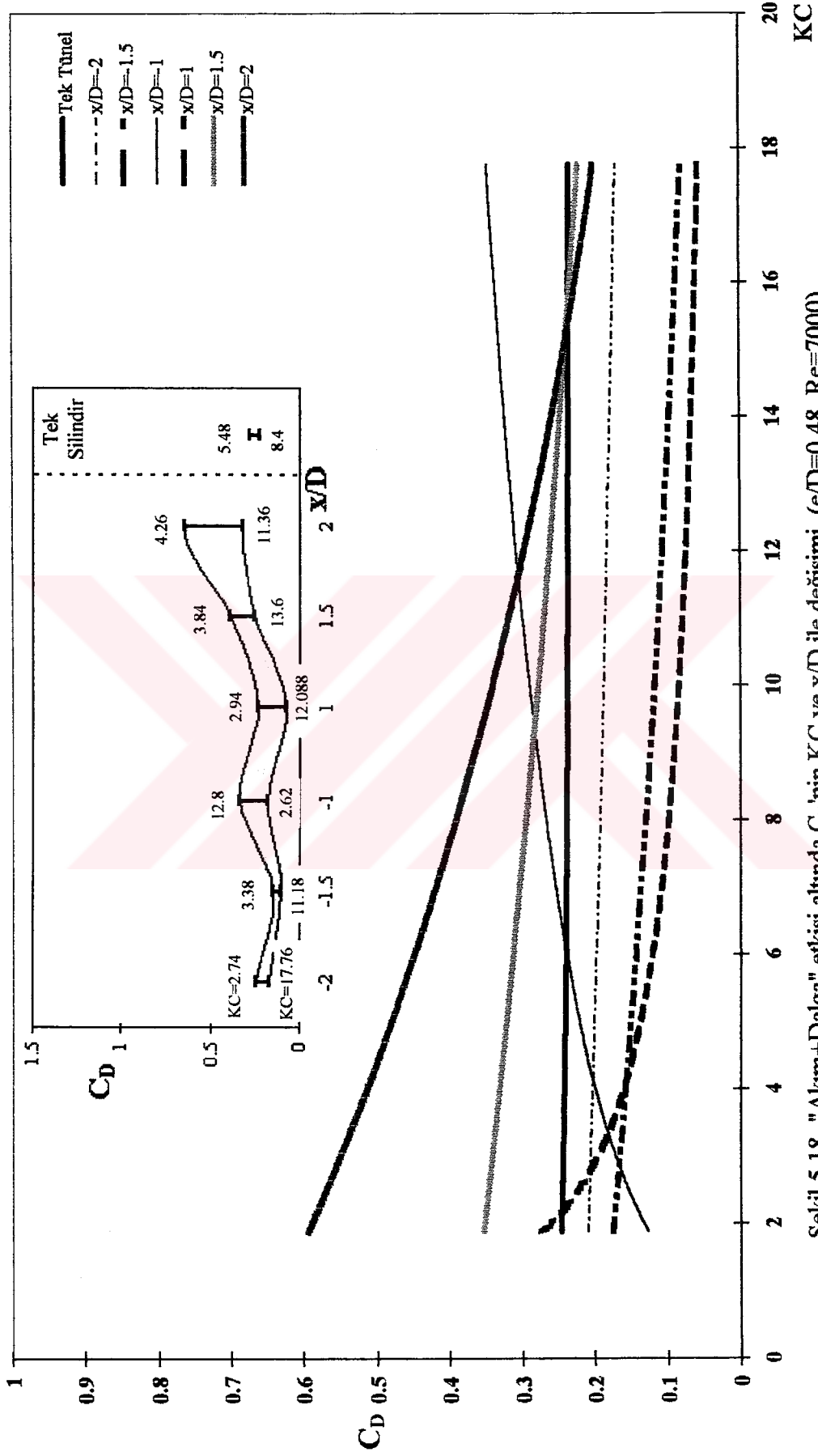
a) $e/D=0$ durumu: Akım ile dalganın birlikte görülmesi durumunda C_M 'in KC ile değişimi iki farklı Re sayısı (1.3×10^4 ve 2×10^4) için Şekil 5.20, Şekil 5.21'de verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere, C_M 'in değeri KC büyüdükçe azalmaktadır. Daha büyük KC durumlarında akım artık kararlı akım gibi davranacağından, silindir üzerinde atalet kuvveti etkisi kalmayacaktır. Re sayısının daha büyük seçildiği ($Re= 2 \times 10^4$) akım koşullarında C_M değerleri, küçük Re sayısındaki ($Re=1.3 \times 10^4$) akım koşullarına göre daha küçük olmaktadır.



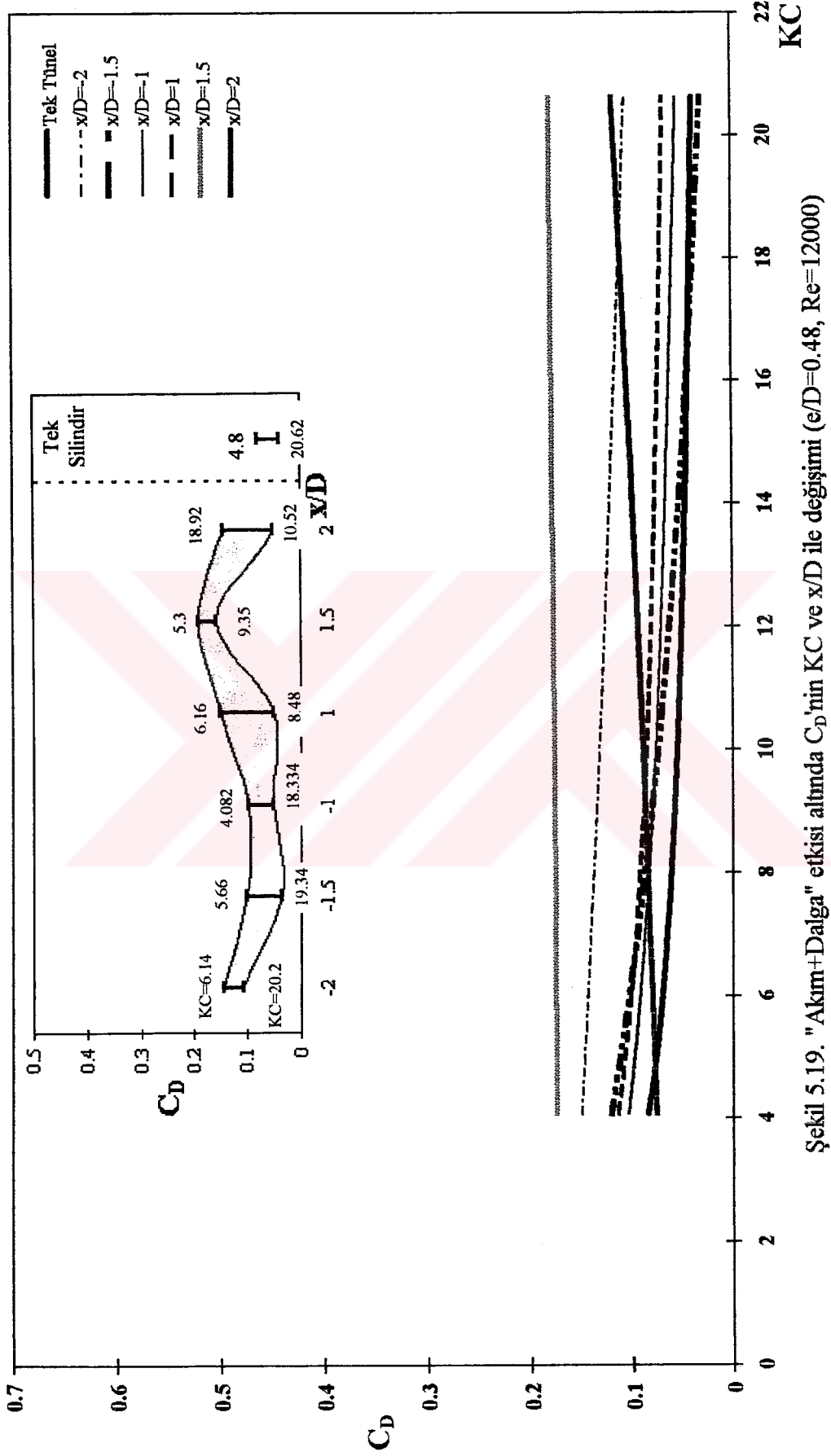
Şekil 5.16. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$, $Re=8000$)



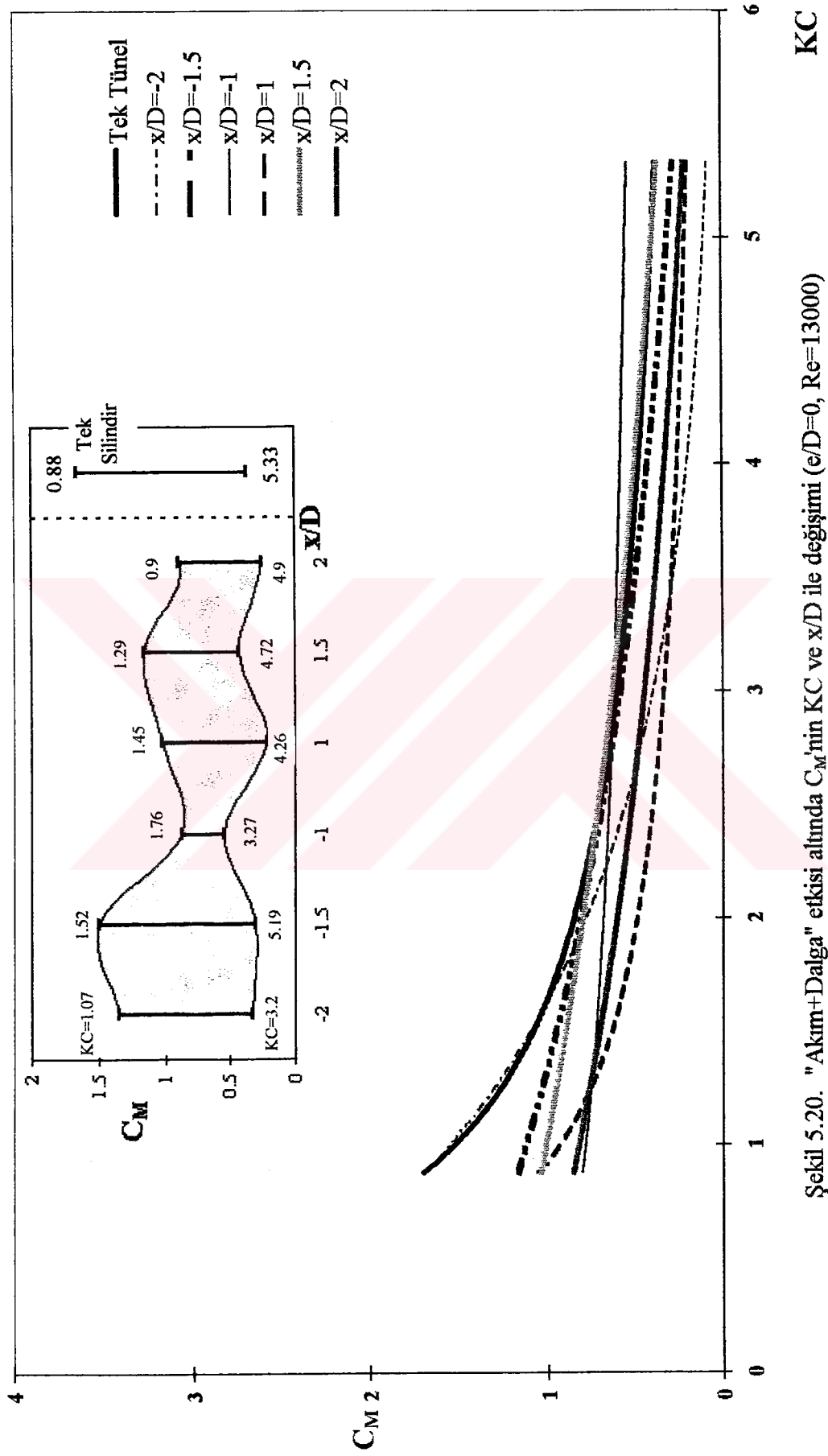
Şekil 5.17. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20, Re=18000$)



Şekil 5.18. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=7000$)

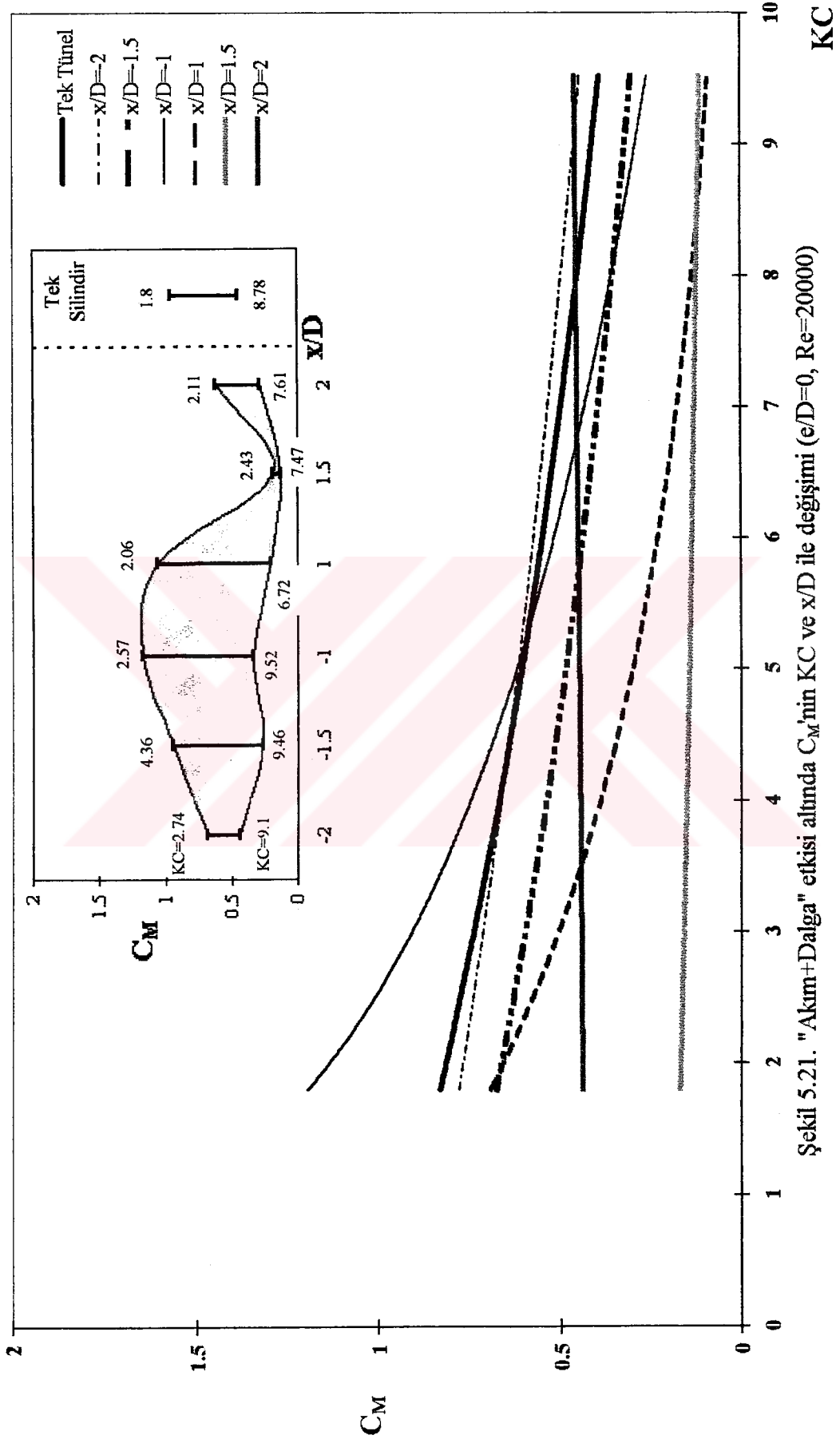


Şekil 5.19. "Akım+Dalga" etkisi altında C_D 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=12000$)



Şekil 5.20. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=13000$)

KC



Şekil 5.21. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=20000$)

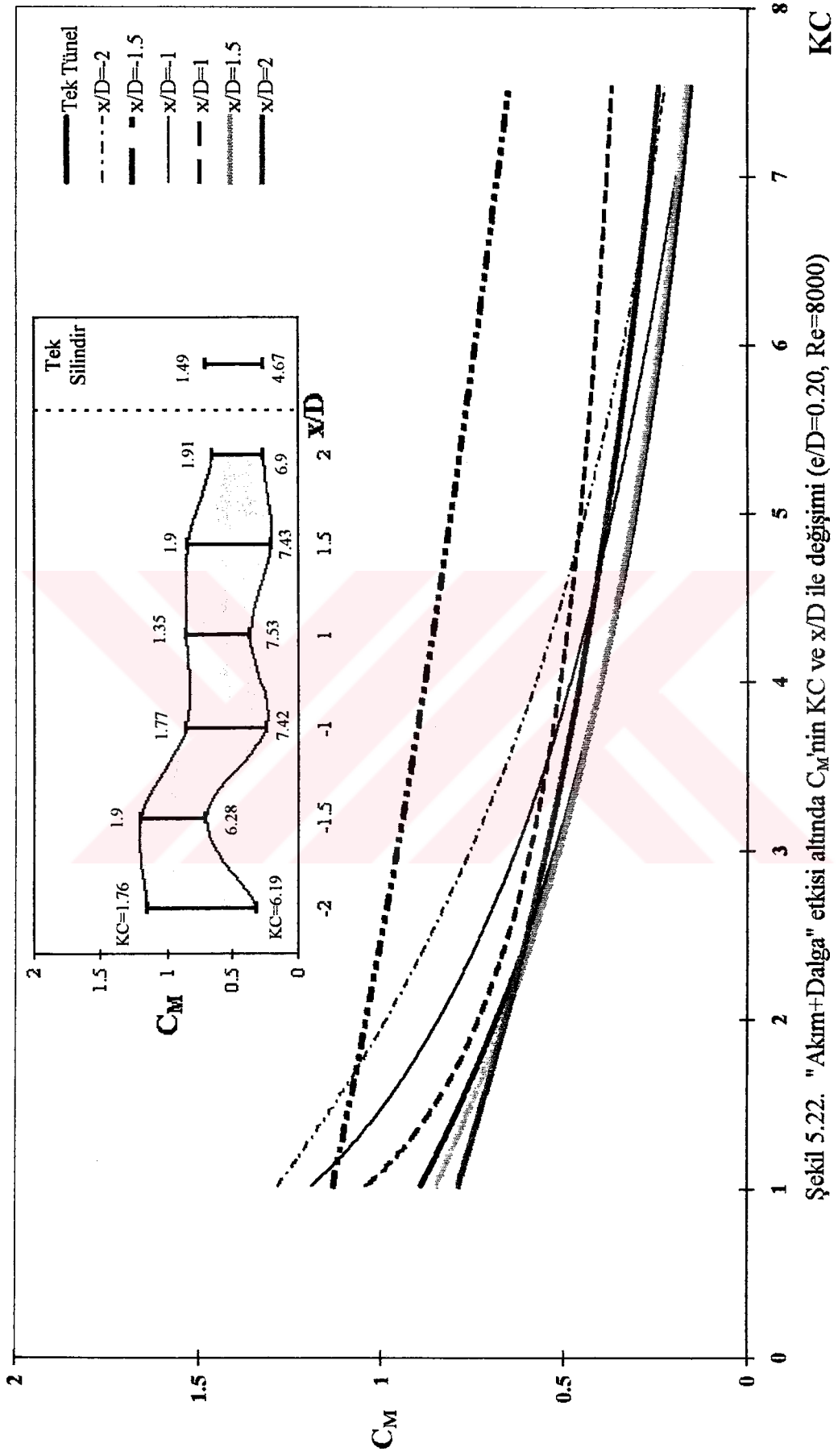
b) $e/D=0.20$ durumu: Şekil 5.22 ile Şekil 5.23'de bu gömülme oranında C_M 'in değişimi görülmektedir. C_M 'in değişimi $e/D=0$ durumuna benzer şekilde olmakta, yani KC arttığında C_M azalmaktadır. İki farklı Re sayısına (0.8×10^4 ve 1.8×10^4) sahip akım koşulları incelendiğinde ise Re sayısındaki değişimden C_M 'in etkilenmediği izlenmektedir.

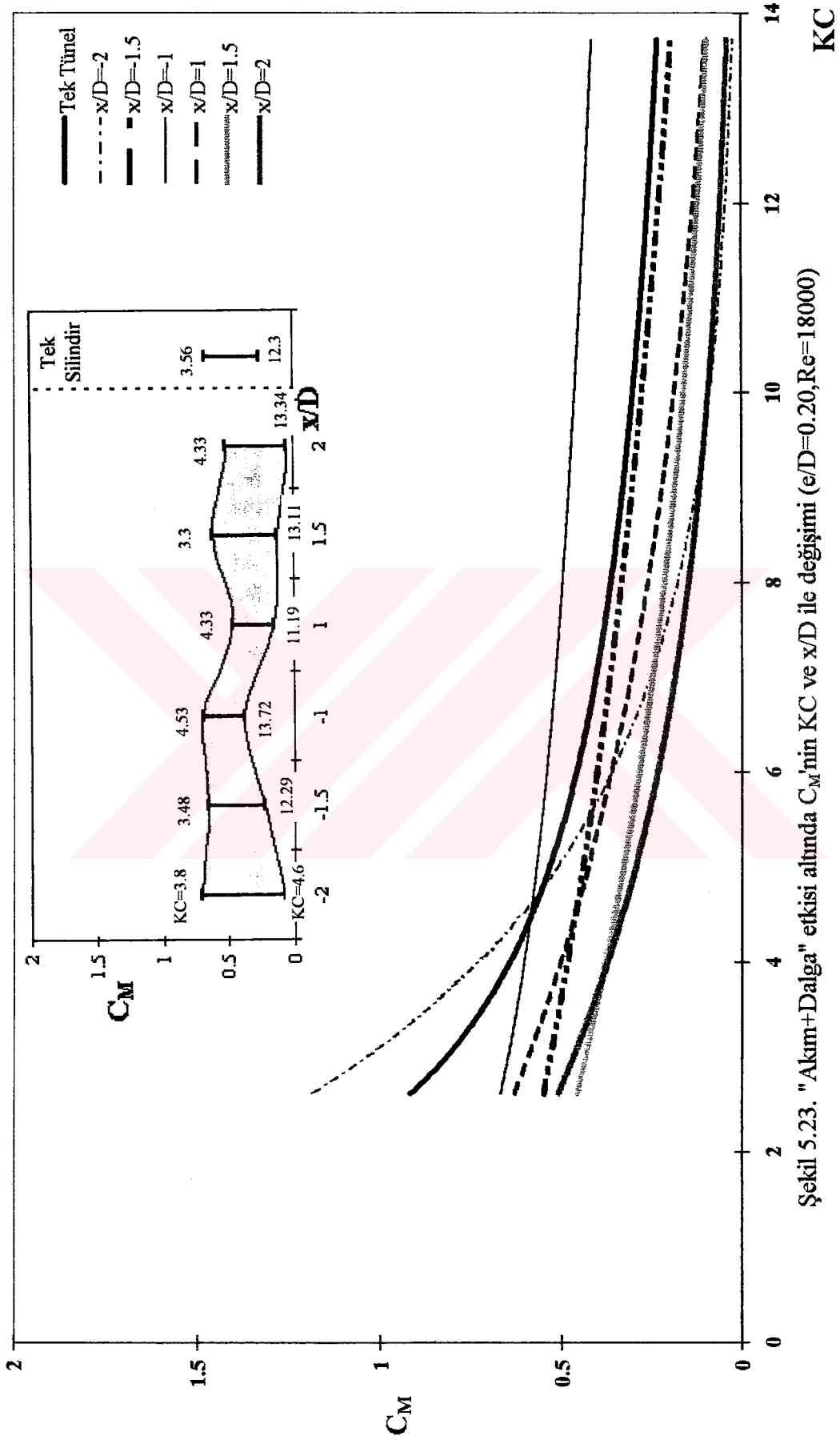
c) $e/D=0.48$ durumu: Bu gömülme oranında C_M 'in değişimi Şekil 5.24 ile Şekil 5.25'den izlendiğinde, C_M 'in KC ile hemen hemen değişmediği ve sabit kaldığı söylenebilir. Re sayısının değiştiği iki deney koşulunda C_M yaklaşık olarak aynı değerleri almaktadır.

Kaldırma kuvveti katsayısı (C_{LMAX}) tek silindir durumundaki değerleri:

a) $e/D=0$ durumu: Şekil 5.26 ile Şekil 5.27'den C_{LMAX} 'ın KC ile değişimi iki farklı Re sayısında (1.3×10^4 ve 2×10^4) görülmektedir. $Re = 1.3 \times 10^4$ sayısında KC ile C_{LMAX} 'ın değişimi incelendiğinde çok büyük değişim görülmemekte, C_{LMAX} 'ın $0.7 \sim 0.8$ değerleri civarında olduğu görülmektedir. Daha büyük Re sayısına (2×10^4) sahip deney koşullarında ise C_{LMAX} 'ın KC ile değişimi daha küçük olmakta ve değerleri 0.4 civarında olmaktadır. Bu, C_{LMAX} 'ın değerinin, ayrılma noktasının silindir üzerindeki yerinin değişmesi sonucunda basınç dağılımdaki değişikliklere çok hassas olduğunu göstermektedir. Benzer durum C_D sürüklenme kuvveti katsayısında da gözlenmektedir.

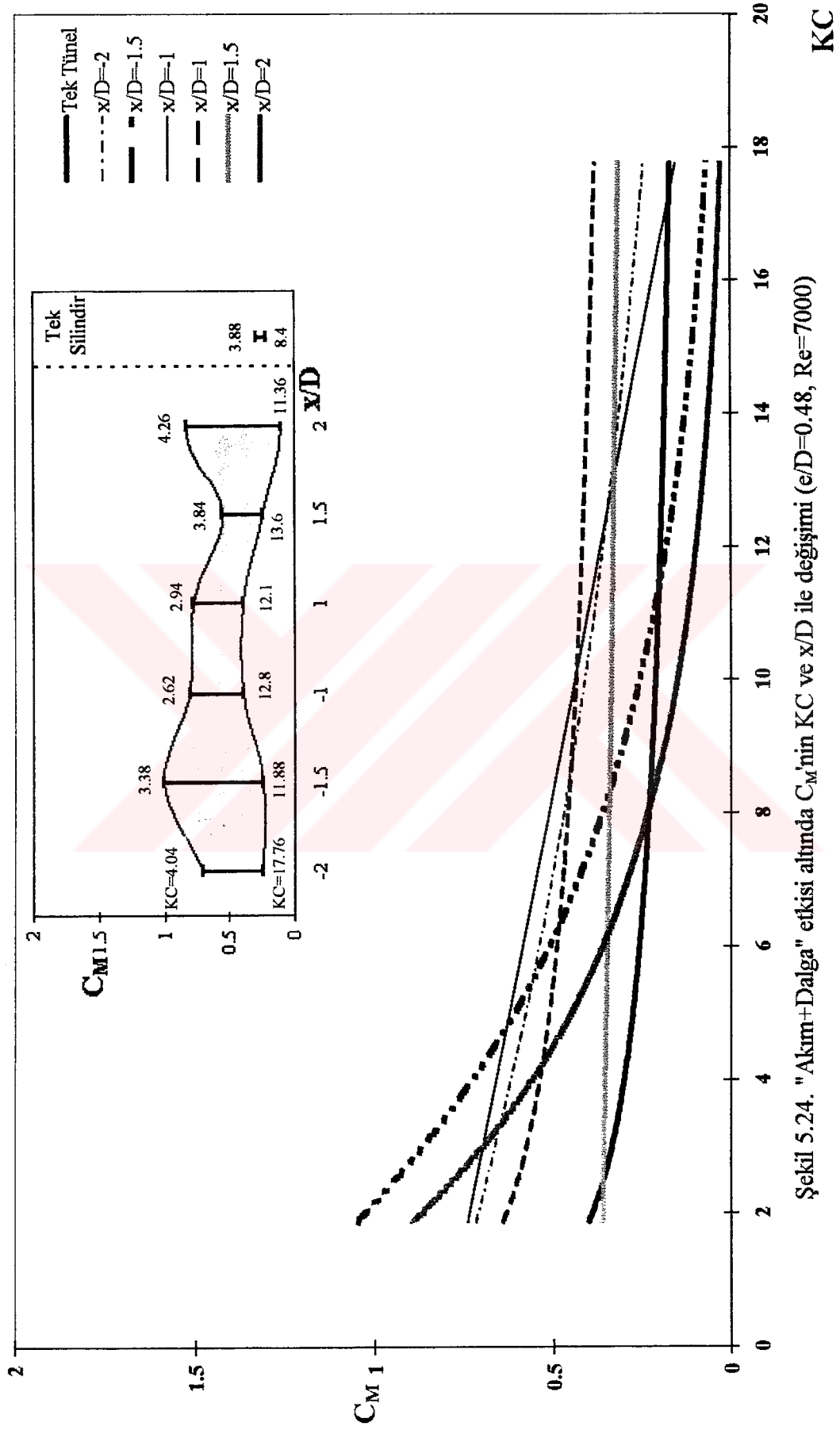
b) $e/D=0.20$ durumu: Bu gömülme oranında C_{LMAX} 'ın KC ile değişimi $Re=0.8 \times 10^4$ için Şekil 2.28 ile $Re=1.8 \times 10^4$ için Şekil 2.29'dan görülmektedir. C_{LMAX} 'ın değerlerinde her iki şekilde de KC ile az da olsa bir artış görülmektedir. Tabana gömülmenin olmadığı ($e/D=0$) durumdakine benzer şekilde C_{LMAX} 'ın değeri Re sayısının daha büyük olduğu akım koşullarında daha küçüktür.



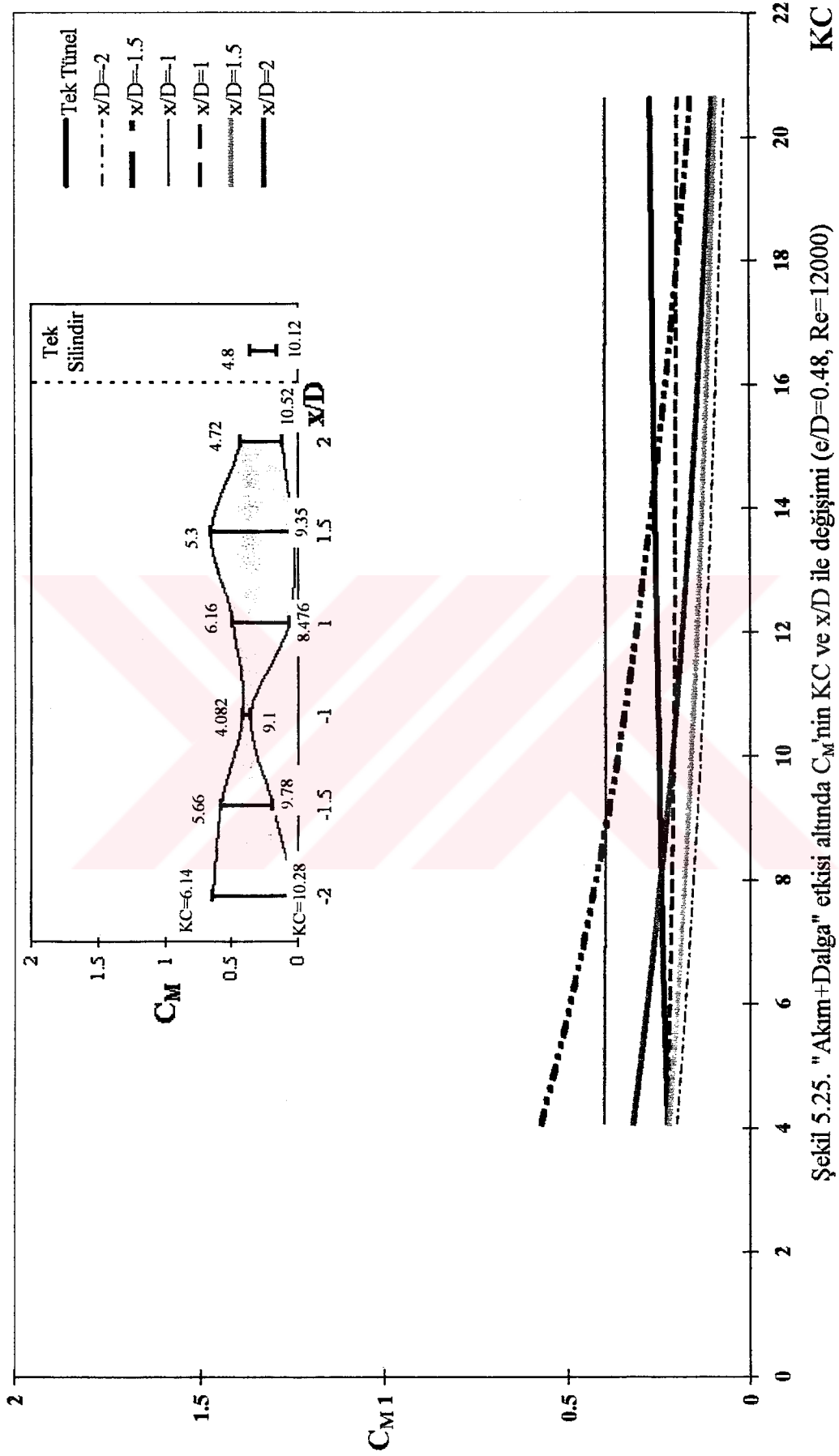


Şekil 5.23. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20, Re=18000$)

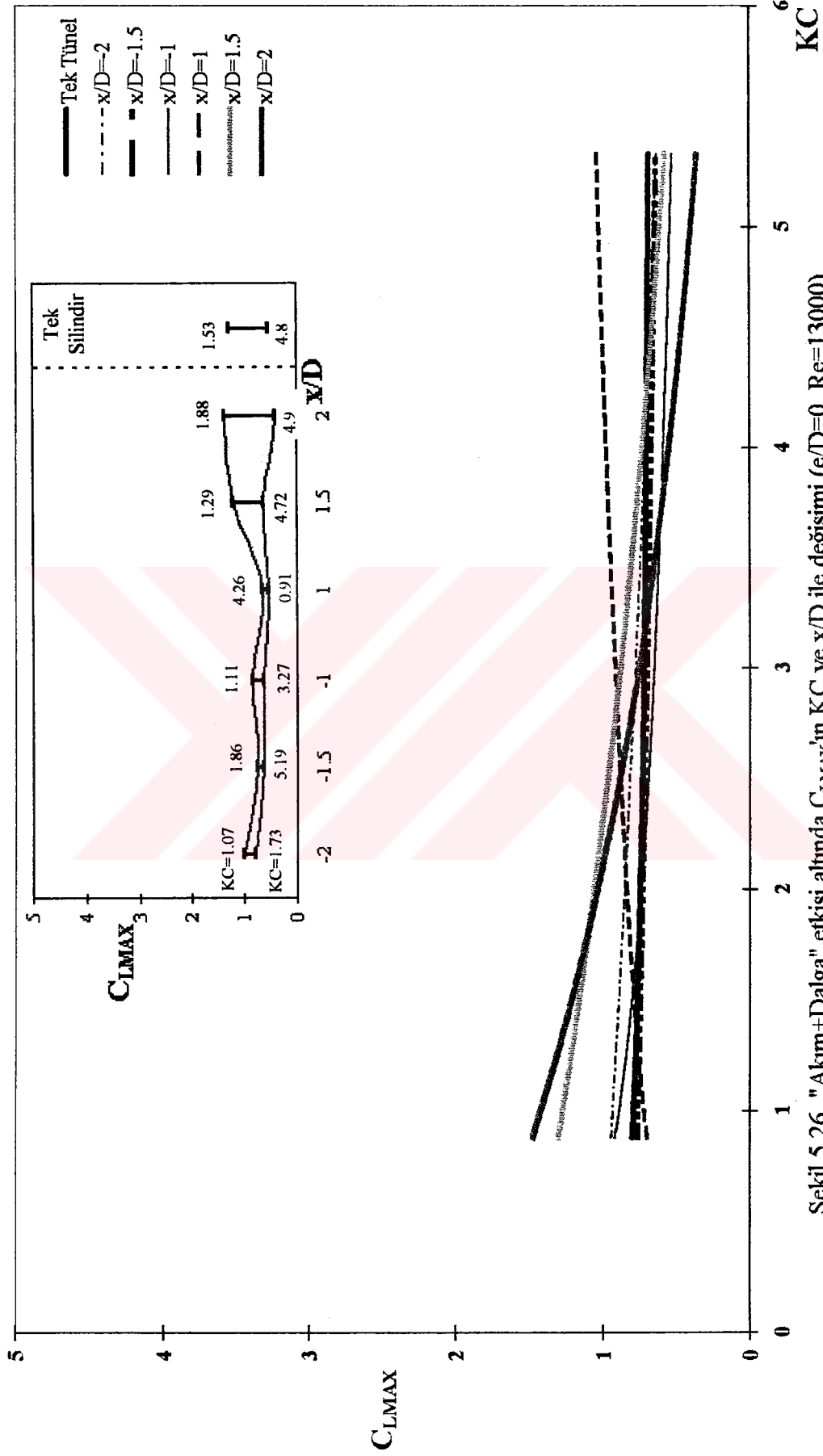
KC



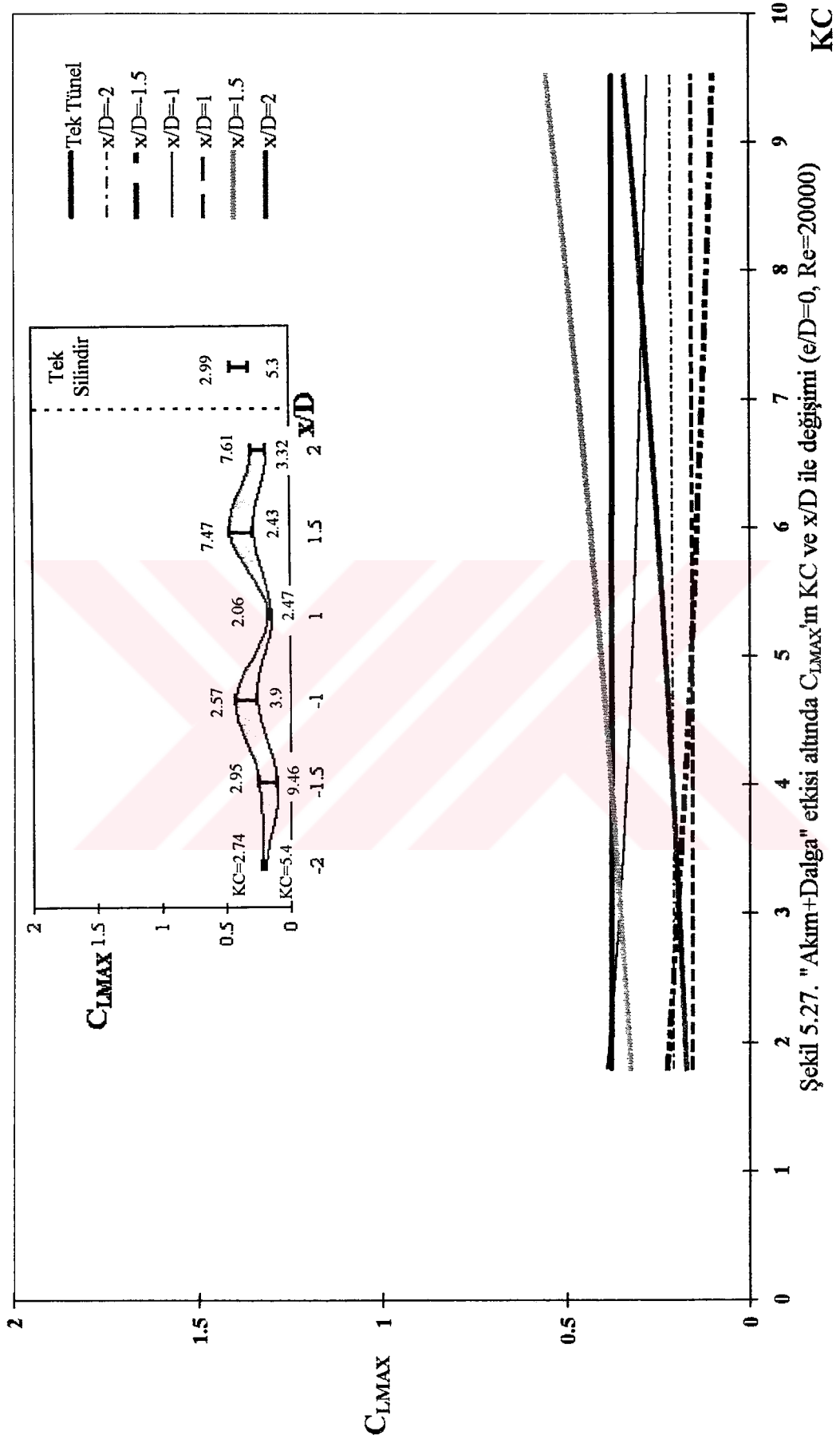
Şekil 5.24. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=7000$)



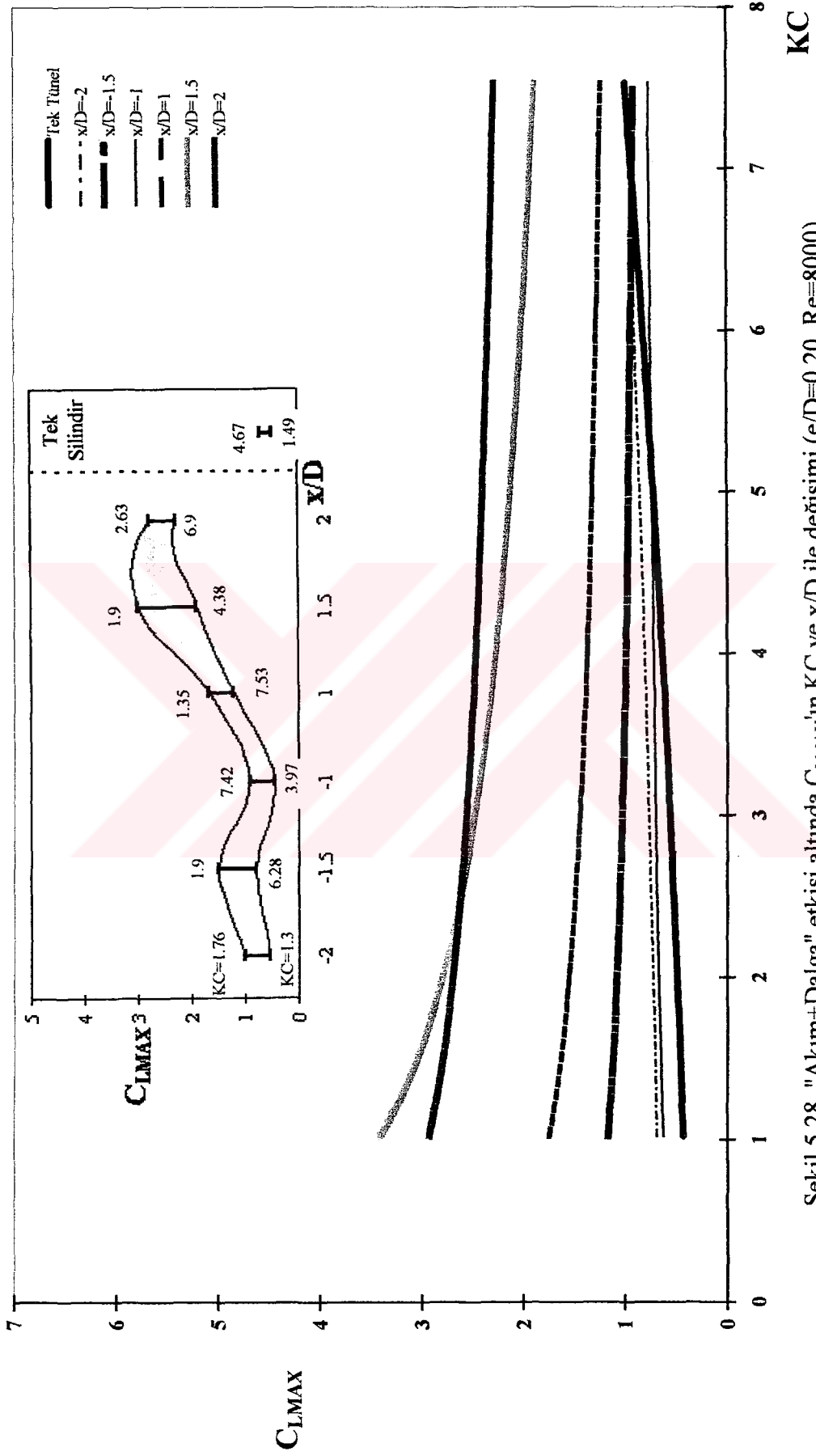
Şekil 5.25. "Akım+Dalga" etkisi altında C_M 'nin KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=12000$)



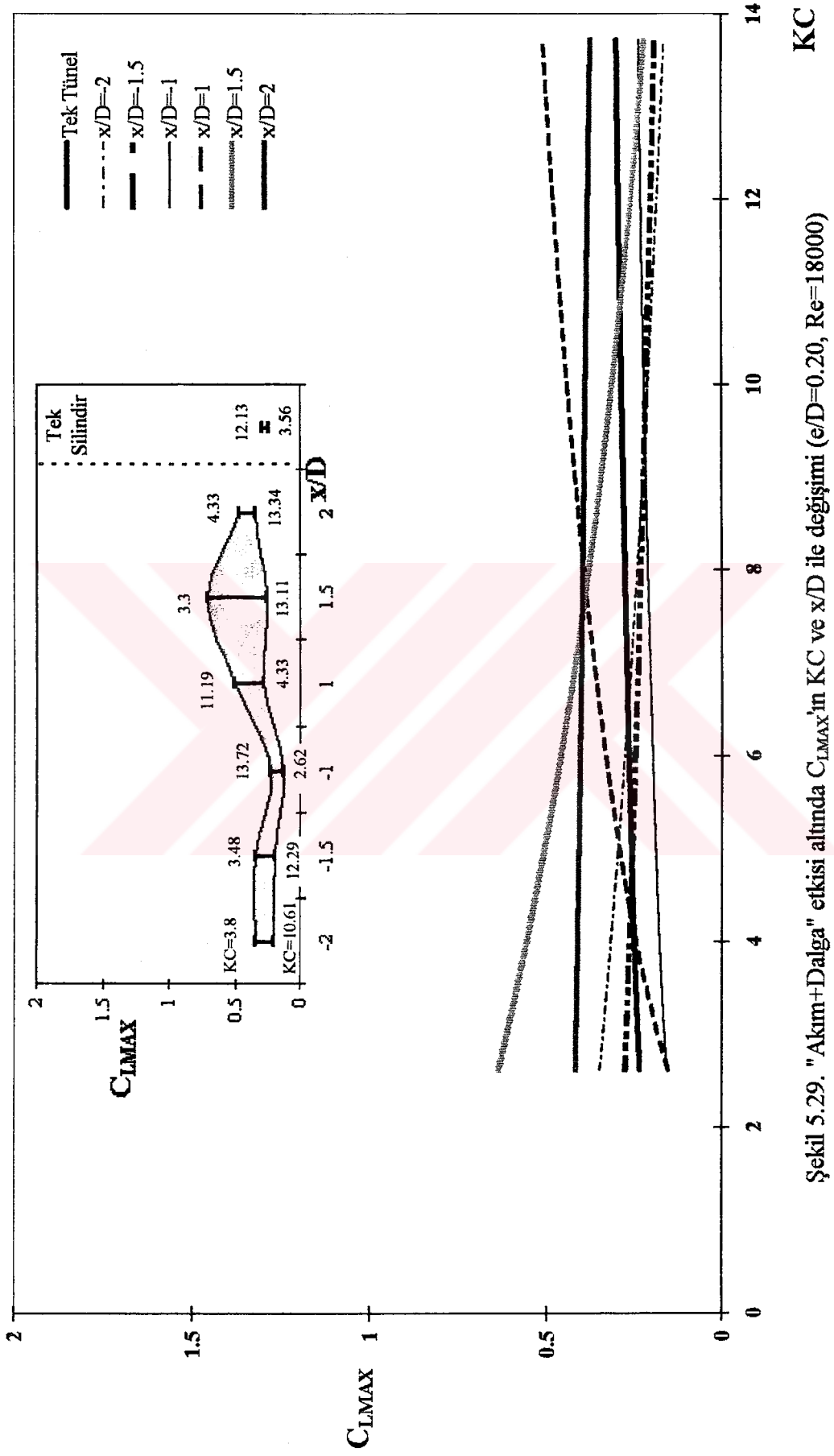
Şekil 5.26. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=13000$)



Şekil 5.27. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'in KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0$, $Re=20000$)



Şekil 5.28. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$, $Re=8000$)



Şekil 5.29. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.20$, $Re=18000$)

KC

c) $e/D=0.48$ durumu: Kaldırma kuvveti katsayısının (C_{LMAX}) KC ile değişimi değişik Re sayılarında (0.7×10^4 ve 1.2×10^4) Şekil 5.30 ile 5.31'den izlendiğinde, KC'deki artış ile C_{LMAX} 'ın değerinde yine bir miktar artışın olduğu ve büyük Re sayısındaki deney serilerinde C_{LMAX} 'ın değerlerinin daha küçük kaldığı görülmektedir.

Çift Silindir Durumunda Sürüklenme Kuvveti Katsayısının (C_D) Değişimi:

a) $e/D=0$ durumu: Değişik e/D ve x/D değerlerinde ve farklı KC ve Re sayılarında tabana oturan silindire ait C_D sürüklenme kuvveti katsayısının KC ile değişimi Re sayısı 1.3×10^4 iken Şekil 5.14 ve Re sayısı 2×10^4 iken Şekil 5.15'de görülmektedir. Re sayısının 1.3×10^4 olduğu akım koşullarında ölçüm silindiri ile diğer silindir arasında silindirin çapı kadar fark varken ($x/D=-2$ ve $+2$ durumu), ölçüm silindiri üzerindeki sürüklenme kuvveti diğer silindirden etkilenmemekte ve yaklaşık olarak tek silindirdeki C_D değerleri görülmektedir. Diğer silindir ölçüm silindirine yaklaştığında ve aralarında yarıçap kadar bir açıklık kaldığında ($x/D=-1.5$ ve $+1.5$ durumu) ise arada kalan bölgede gözlenen çevrilerin etkisi ile C_D değerleri oldukça büyümektedir. Silindirlerin birbirlerine bitişik olduğu durumda ise ölçüm silindiri menbada iken ($x/D=+1$ durumu) C_D 'de tek silindire göre bir artış varken, ölçüm silindiri mansap tarafına geçtiğinde silindir akımdan çok az etkilenmekte ve C_D değerleri çok küçük olmaktadır (Şekil 5.14).

Re sayısının değerinin 2×10^4 olduğu akım koşullarına ait deney sonuçları Şekil 5.15'den incelendiğinde ise, C_D değerlerinin genel olarak $Re=1.3 \times 10^4$ durumuna göre oldukça küçüldüğü gözlenebilir. Bu akım koşulunda C_D değerleri önceki sete göre yaklaşık olarak 1/5 oranında azalmaktadır. Bunun nedeni, akımın Re sayısındaki artış ile ayrılma noktasının silindir üzerindeki hareketidir. Bu akım koşullarında ölçüm silindirinin menbada olduğu $x/D=+1$ ve $+1.5$ değerlerinde C_D artarken, $x/D=+2$ değerinde yaklaşık olarak tek silindir durumuna yakın değerler almaktadır. Ölçüm silindirinin mansapta olduğu konumda ise kararlı bir durum mevcut olup $x/D=-1$, -1.5 , -2 değerlerinde C_D değerlerinin ve KC ile değişimi yaklaşık olarak aynı olduğu Şekil 5.15'ten görülmektedir.

b) $e/D=0.20$ durumu: Gömölme oranındaki değişme ile akım + dalga etkisinde sürüklenme kuvveti katsayısının iki farklı Re sayısı ($Re=0.8 \times 10^4$ ve 1.8×10^4) için KC ile değişimi çift silindir durumunda Şekil 5.16 ile Şekil 5.17'de görülmektedir. $Re=0.8 \times 10^4$ olan akım koşullarında $x/D=+1.5$ değeri haricinde diğer çift silindir durumlarında C_D katsayısının değişimi tek silindir durumuna göre daha küçük değerlerde olmakta; C_D , $x/D=+1.5$ ve -2 durumunda KC ile artmaktadır. Burada, $x/D=+1.5$ konumu sürüklenme kuvveti açısından oldukça kritik değerdedir. Bunun sebebi olarak, iki silindir arasındaki bölgede su kütlesinin akım ile etkileşmesi sonucunda ortaya çıkan çevrilerin basınç dağılımı üzerindeki etkisi gösterilebilir. Re sayısının 1.8×10^4 değerine çıkarıldığı akım koşullarında ise C_D 'nin değeri, $e/D=0$ durumundaki gibi $Re=0.8 \times 10^4$ 'e göre tüm x/D oranlarında düşmektedir. Genel olarak C_D 'nin KC ile değişiminin, $x/D=+1.5$ değeri hariç bütün x/D oranlarında yaklaşık olarak sabit olduğu Şekil 5.17'de görülmektedir. x/D 'nin 1.5 kritik değerinde ise C_D , KC ile azalmaktadır. Genel olarak $x/D=-1$ haricinde bütün çift silindir durumlarında C_D değerleri tek silindir durumundan büyük olmakta ve C_D , 0.3 değerinden küçük olmaktadır (Şekil 5.17).

c) $e/D=0.48$ durumu: Bu gömölme oranında kesitin genel karakteristik yapısı akım çizgilerine oldukça uyumlu olduğundan C_D değerleri diğer gömölme oranlarına göre daha küçük olmaktadır (Şekil 5.18 ve Şekil 5.19). $Re=0.7 \times 10^4$ olduğu akım koşullarında C_D 'nin KC ile değişimi azdır. $x/D=+2$ konumunda ara bölge etkisi ile C_D 'de bir miktar artış görülmektedir (Şekil 5.27). $Re=1.2 \times 10^4$ iken C_D 'nin KC ile değişimi Şekil 5.19'dan incelenirse C_D 'nin $x/D=+1.5$ değeri haricinde çok büyük bir değişme görülmekte, $x/D=+1.5$ değerinde ise çift silindirin diğer değişik durumlarına göre bir artış gözlenmektedir (Şekil 5.19).

Çift Silindir Durumunda Atalet Kuvveti Katsayısının Akım + Dalga Durumunda Değişimi:

Ortamda kararlı akım ile dalga etkisinin birlikte görüldüğü durumlarda C_M atalet kuvveti katsayısının KC ile değişimi incelendiğinde genel olarak hareketin genliğinin az olduğu küçük KC sayılarında C_M 'in önemli olduğu, hareketin genliğinde ki artış

(büyük KC sayıları) ile birlikte akım yapısının kararlı akıma benzemesi ile C_M 'in azalarak etkisini yitirdiği görülmektedir. Genel olarak çift silindir durumunda ölçüm silindirinin diğer silindirin mansabında bulunduğu konumlarda C_M değerleri (x/D negatif) ölçüm silindirinin diğer silindirin menbaında bulunduğu (x/D pozitif) konumlarına göre, öndeki silindirin kararlı akım etkisini azaltması ile ek kütledeki artış sonucu daha büyük olmaktadır.

a) $e/D=0$ durumu: Atalet kuvveti katsayısının KC ile değişimi, çift silindirin oluşturduğu değişik sınır şartları ve Re sayısının 1.3×10^4 ve 2×10^4 olduğu iki farklı akım koşullarında C_D 'nin KC ile değişimi Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'den incelendiğinde, C_M 'in çift silindir durumunda aldığı değerler tek silindir değerlerinden daha küçük kaldığı görülür. C_M değerleri $Re=1.3 \times 10^4$ olduğu akım koşullarında KC'nin artışı ile hızlı bir şekilde azalmaktadır. Re sayısının değerinin 2×10^4 'e çıktığı akım koşullarında kararlı akım etkisi daha fazla hissedildiğinden, küçük KC sayılarında C_M değerleri daha azalmakta ve KC ile C_M 'in değişimi daha küçük bir aralıkta kalmaktadır. Burada dikkati çeken nokta, x/D 'nin pozitif değerlerinde özellikle $x/D=+1.5$ değerinde C_M 'in küçük değerler almasıdır. Bunu sebebi olarak akımdaki kararlı akım etkisinin dominant olması sonucu menbadaki silindirde zaten küçük olan ek kütle etkisinin mansaptaki silindir tarafından azaltılmasıdır. x/D 'nin negatif değerlerinde ise, menbadaki silindir akımın kararlı akım etkisini perdelemekte ve mansapta kalan ölçüm silindirinde ek kütle oluşmasına sebep olmaktadır (Şekil 5.21).

b) $e/D=0.20$ durumu: Silindirin bu gömülme oranlarında akım + dalga etkisinde Re sayısının 0.8×10^4 ve 1.8×10^4 değerleri için C_M 'in KC ile değişimi Şekil 5.22 ile Şekil 5.23'den görülebilir. Re sayısının 0.8×10^4 olduğu deney serisinde x/D 'nin pozitif değerleri için tek silindirdeki C_M değerleri yakın değerler alırken, x/D 'nin negatif değerlerinde özellikle küçük KC sayılarında daha büyük C_M değerleri ortaya çıkmaktadır. C_M değerleri genel olarak bu akım şartlarında KC'nin artışı ile azalmaktadır (Şekil 5.22). Akım ortamında kararlı akım etkisi arttırılırsa ($Re=1.8 \times 10^4$), genel olarak çift silindir durumunda tek silindir durumuna benzer bir değişim görülmektedir. Özellikle x/D 'nin pozitif değerlerinde, KC sayısı büyük

değerler aldığında C_M 'in etkisi ortadan kalkmakta ve akım doğrultusunda hakim kuvvet sürüklenme kuvveti olmaktadır (Şekil 5.23).

a) $e/D=0.48$ durumu: Şekil 5.24 ile Şekil 5.25'den C_M 'in iki farklı Re sayısında ($Re=0.7 \times 10^4$ ve 1.2×10^4) KC ile değişimi görülmektedir. Re sayısının 0.7×10^4 değerinde olduğu deney serisinde, tek silindire göre çift silindir durumunda C_M değerleri daha büyük olmakta ve x/D ile C_M çok fazla değişmemektedir. Büyük KC sayılarında özellikle $x/D=+2$ durumunda C_M küçük değerler almaktadır (Şekil 5.22). Re sayısı 1.2×10^4 'e çıktığında ise büyük KC sayılarında çift silindir durumunda C_M ihmal edilebilecek boyutlarda olmaktadır. KC 'nin küçük değerlerinde ise çift silindir durumunda C_M değerleri tek silindirdeki C_M 'den büyük değerler almaktadır (Şekil 5.25). Bu gömülme oranında C_M değerleri diğer gömülme oranlarından daha küçüktür.

Akım + Dalga Durumunda Çift Silindir Sınır Koşullarında Kaldırma Kuvveti Katsayısının (C_{LMAX}) Değişimi:

Akım + dalga etkisi durumunda C_{LMAX} 'ın aldığı değerler genel olarak incelendiğinde, Re sayısının büyük olduğu akım koşullarında basınç dağılımındaki değişme nedeni ile C_{LMAX} 'ın değerleri azalmaktadır. Bunun sebebi, ayrılma noktasının silindir üzerindeki hareketi sonucunda silindirin akıma göre arka tarafındaki negatif basınç değerlerinin küçülmesidir.

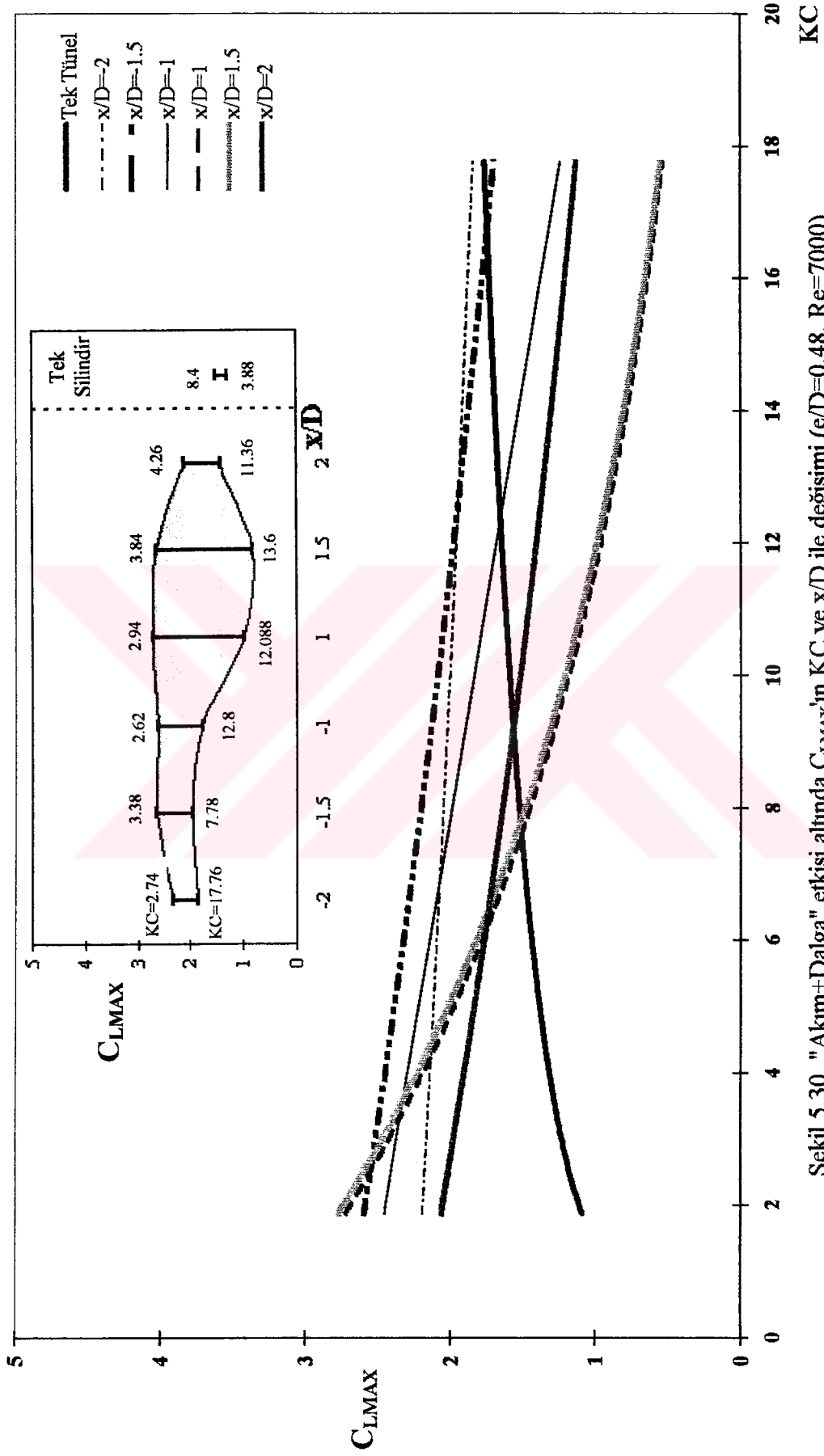
a) $e/D=0$ durumu: Şekil 5.26 ile Şekil 5.27'den C_{LMAX} 'ın iki farklı Re sayısında (1.3×10^4 ve 2×10^4) KC ile değişimi görülmektedir. Re sayısının 1.3×10^4 olduğu akım koşulları için $x/D=+2$ ve $+1.5$ değerlerinde silindir üzerindeki basınç dağılımının mansaptaki silindirden etkilenmediği görülmekte, bunun sonucunda bu konumlarda C_{LMAX} değerleri tek silindir durumu gibi olmaktadır. Diğer x/D oranlarında ise C_{LMAX} KC ile çok azalmasına rağmen, Şekil 2.26'dan görüleceği gibi dar bir bantta kalmaktadır. Re sayısının 2×10^4 değerini aldığı akım + dalga koşullarında çift silindirin değişik konumlarında C_{LMAX} 'ın yine dar bir bantta kaldığı ve değerlerin genel olarak tek silindir durumuna benzer olduğu görülmektedir. Re

sayısının büyümesi ile basınç dağılımı etkileneceğinden $Re=2 \times 10^4$ değerinde C_{LMAX} 'ın değerleri genel olarak $Re=1.3 \times 10^4$ olduğu duruma göre daha küçük olmaktadır.

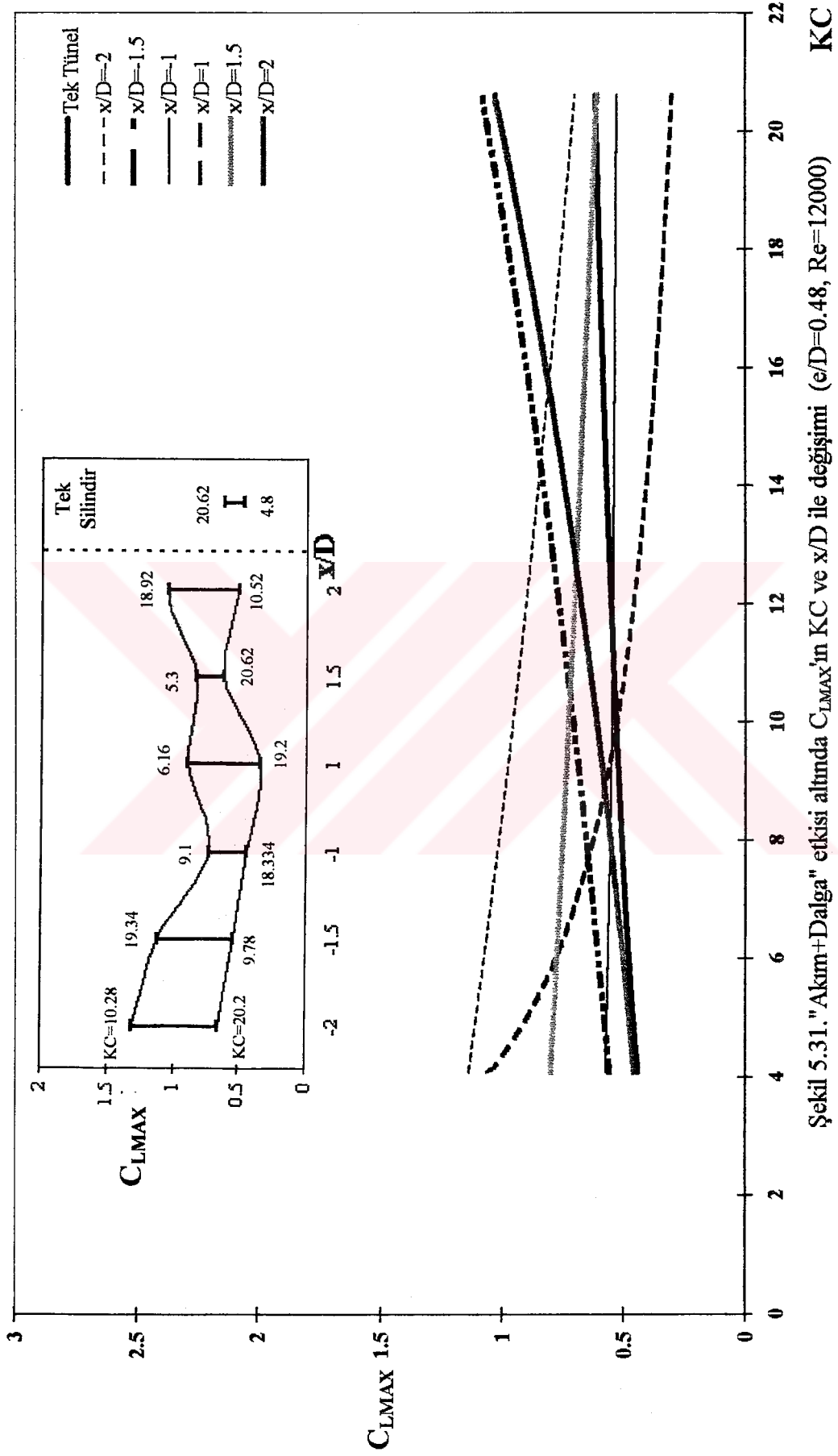
b) $e/D=0.20$ durumu: Gömülme oranının artışı ile akım + dalga durumunda, özellikle küçük Re ($Re=0.8 \times 10^4$) sayılarında x/D 'nin pozitif değerleri için C_{LMAX} 'ın ani bir artış gösterdiği Şekil 5.28'den görülmektedir. Re sayısının değeri 1.8×10^4 'e çıktığında yine x/D 'nin pozitif değerlerinde bir artış görülmesine rağmen, bu $Re=0.8 \times 10^4$ 'deki kadar belirgin değildir. $Re=1.8 \times 10^4$ olduğu akım koşullarında C_{LMAX} 'ın değerleri diğer seriye oranla daha küçük olmaktadır (Şekil 5.29).

c) $e/D=0.48$ durumu: C_{LMAX} 'ın bu gömülme oranındaki değerleri iki farklı Re sayısı için (0.7×10^4 ve 1.2×10^4) Şekil 5.30 ile Şekil 5.31'den görülebilir. Re sayısının 0.7×10^4 olduğu akım koşullarında, çift silindir durumunda tek silindir durumuna göre C_{LMAX} 'ın KC ile değişimi terstir. KC büyüdükçe C_{LMAX} azalmaktadır. Çift silindir durumunda C_{LMAX} 'ın KC ile değişimi x/D 'nin negatif değerlerinde daha az olmakta, x/D 'nin pozitif değerlerinde ise büyük KC sayılarında daha küçük C_{LMAX} değerleri ile karşılaşılmaktadır. Re sayısının 1.2×10^4 olduğu akım koşullarında, çift silindir durumunda x/D 'nin +2 ve -1.5 değerleri için C_{LMAX} , KC ile artmakta, diğer x/D oranlarında ise C_{LMAX} 'ın değeri KC 'nin artması ile azalmaktadır (Şekil 5.31).

Bu gömülme oranında kaldırma kuvveti, ayrılma noktasının yerine karşı çok hassastır (Şekil 5.1). Çift silindir durumunda diğer silindirin etkisi ile ayrılma noktasının yerinde meydana gelecek çok küçük değişimler, silindire düşey yönde etkiyen negatif basınç değerlerini azaltıp arttırabilmekte ve bu nedenle C_{LMAX} , bu gömülme oranında kararlı bir değişme göstermemektedir.

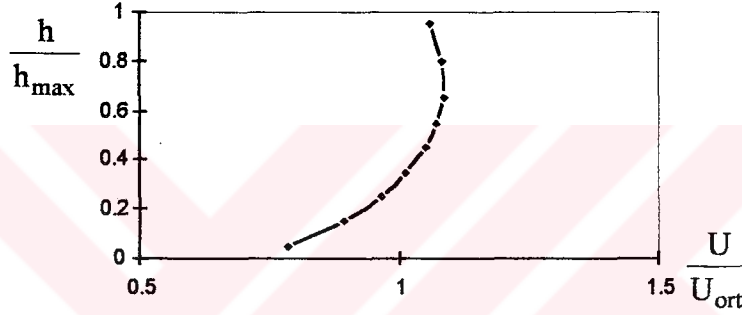


Şekil 5.30. "Akım+Dalga" etkisi altında C_{LMAX} 'ın KC ve x/D ile değişimi ($e/D=0.48$, $Re=7000$)



5.3.4. $h=20$ cm su derinliğinde kuvvet katsayılarının değişimi

Tabana oturan bir silindire etkiyen hidrodinamik kuvvetlerde su derinliğinin değişimi sonucu meydana gelecek değişimlerin belirlenebilmesi için deney kanalında 20cm su derinliğinde; kararlı akım, sadece dalga ve akım+dalga etkisinde değişik akım koşullarında ve gömülme oranlarında kuvvet katsayıları belirlenmiştir. Akım şartları (Re ve KC değerleri), daha önce verilen 40 cm. su derinliğinde yapılan deneylere yakın tutulmuştur. Deney kanalında 20cm. su derinliği için, akımın silindirden etkilenmediği bir kesitteki hız dağılımı Şekil 5.32'den görülmektedir.



Şekil 5.32 Deney kanalında $h=20$ cm derinlikteki kararlı akım durumunda hız dağılımı.

Şekil 5.32'de hız değerleri ortalama hıza (U_{ort}), derinlik değerleri de maksimum su derinliği 20 cm.'ye oranlanarak boyutsuz olarak verilmiştir. Şekilden, bu su derinliğinde hız dağılımının, Şekil 4.7'de verilen $h=40$ cm derinlikte elde edilen hız dağılımına göre daha üniform olduğu görülmektedir.

Kararlı akım durumunda kuvvet katsayıları;

Bu su derinliği ve değişik gömülme oranları için kararlı akım durumunda belirlenen kuvvet katsayıları Tablo 5.3'de görülmektedir.

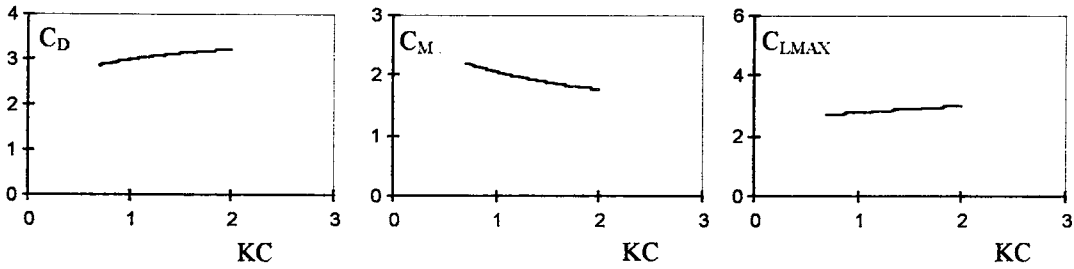
Tablo 5.3. $h=20\text{cm}$ derinlikte kararlı akım etkisinde tek silindire ait kuvvet katsayıları

e/D	Re	C_D	C_L
0	2×10^4	0.78	0.74
	0.9×10^4	0.92	0.84
0.20	1.6×10^4	0.65	0.67
	0.79×10^4	0.77	0.77
0.48	1×10^4	0.34	1.44
	0.58×10^4	0.52	1.73

Tablodan da görüldüğü gibi, kuvvet katsayılarında Tablo 5.2’de benzer akım şartlarının sağlandığı 40cm derinlikte elde edilen sonuçlara göre bir miktar artış vardır. Bu artışın sebebi, 20 cm su derinliğinde hız dağılımının 40cm derinlikte elde edilen hız dağılımına göre daha üniform yapıda olmasıdır. Hız dağılımındaki üniformluk ile silindir yüzeyinde durak noktası seviyesindeki pozitif basınç değerleri artmakta ve buna bağlı olarak C_D ve C_L kuvvet katsayılarında da artış olmaktadır.

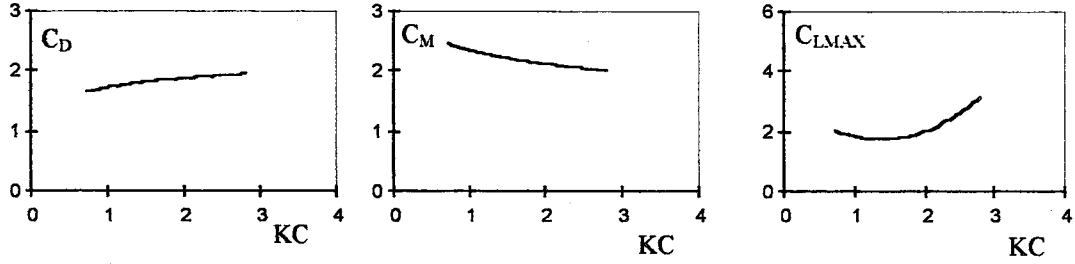
Dalga etkisinde kuvvet katsayıları;

Dalga etkisi ile silindire etkiyen kuvvetin akım doğrultusundaki ve akıma dik doğrultudaki kuvvet bileşenlerine ait katsayıların KC ile değişik gömülme oranlarındaki değişimleri Şekil 5.33, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35’de verilmiştir.

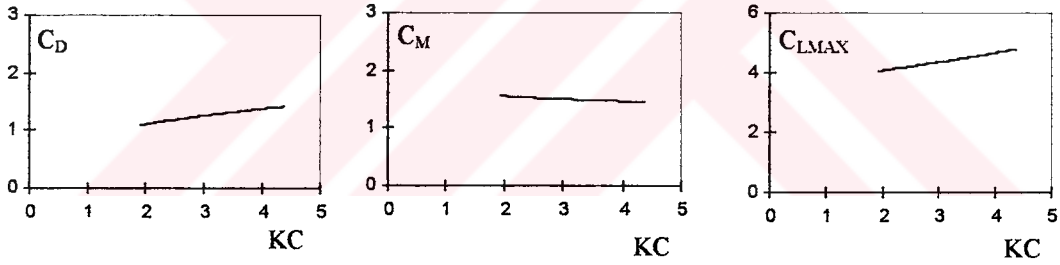


Şekil 5.33 Kuvvet katsayıları C_D , C_M ve C_{LMAX} ’ın pür dalga durumunda KC ile değişimi ($e/D=0$, $h=20\text{ cm}$)

Kuvvet katsayılarının KC ile değişimi, 40 cm su derinliğinde kuvvet katsayılarında belirlenen değişim ile paralellik göstermektedir. 20cm su derinliğinde, C_D ve C_{LMAX} kuvvet katsayılarının değerlerinde 40cm'ye göre bir artış varken, atalet kuvveti katsayısı C_M 'de azalma görülmektedir. C_D ve C_{LMAX} 'ta görülen bu artışa hız dağılımındaki üniformalık neden olurken, C_M 'deki azalmanın sebebi, su derinliğinin azalması ile ek kütlede ortaya çıkan azalmadır.



Şekil 5.34 Kuvvet katsayıları C_D , C_M ve C_{LMAX} 'ın pür dalga durumunda KC ile değişimi ($e/D=0.2$, $h=20$ cm)

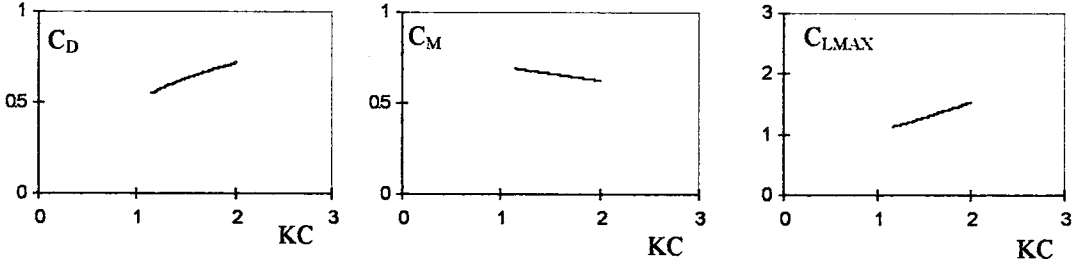


Şekil 5.35 Kuvvet katsayıları C_D , C_M ve C_{LMAX} 'ın pür dalga durumunda KC ile değişimi ($e/D=0.48$, $h=20$ cm)

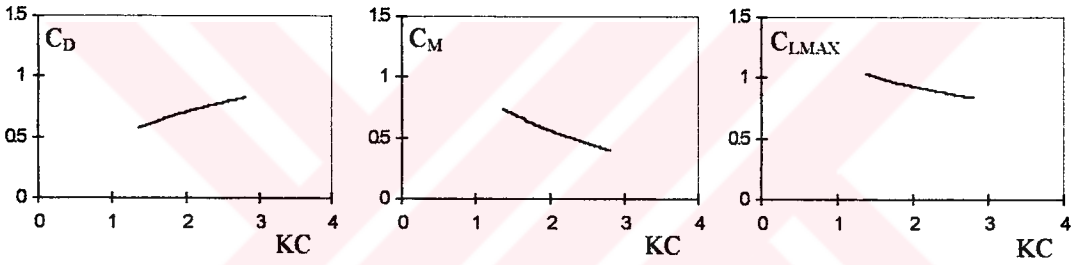
Akım+Dalga etkisinde kuvvet katsayıları;

Akım ortamında kararlı akım ile dalganın birlikte görülmesi durumunda kuvvet katsayıları tek silindir için, C_D , C_M ve C_{LMAX} 'ın KC ile değişimi değişik gömülme oranlarında Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'de verilmiştir. Deneylerde $e/D=0$ durumunda $Re = 1 \times 10^4$, $e/D = 0.2$ durumunda $Re = 0.9 \times 10^4$ ve $e/D=0.48$ durumunda $Re=0.6 \times 10^4$ 'tür. Kararlı akım hızının maksimum dalga hızına oranı α , sabit ve

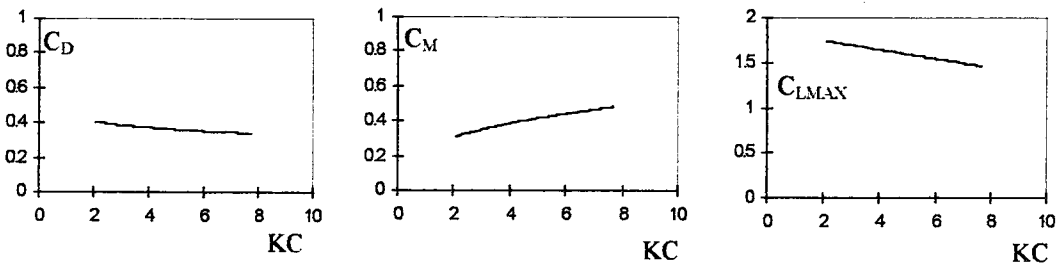
yaklaşık olarak 5'tir. Kuvvet katsayılarının değişimi su derinliğinin 40 cm olduğu değerlerle karşılaştırılırsa, pür dalga durumuna benzer şekilde C_D ve C_{LMAX} katsayılarında bir artış varken, C_M 'de ise bir miktar azalma görülmektedir.



Şekil 5.36 Akım + Dalga durumunda C_D , C_M ve C_{LMAX} kuvvet katsayılarının $e/D=0$ durumunda KC ile değişimi ($Re=1 \times 10^4$, $\alpha=5$)



Şekil 5.37 Akım + Dalga durumunda C_D , C_M ve C_{LMAX} kuvvet katsayılarının $e/D=0.20$ durumunda KC ile değişimi ($Re=1 \times 10^4$, $\alpha=5$)



Şekil 5.38 Akım + Dalga durumunda C_D , C_M ve C_{LMAX} kuvvet katsayılarının $e/D=0.48$ durumunda KC ile değişimi ($Re=0.48 \times 10^4$, $\alpha=5$)

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada akıntılı bir deniz ortamında tabana oturan (veya değişik oranlarda tabana gömülü olan) tek veya değişik konumlarda yerleştirilmiş çift silindir üzerine gelen kuvvetler deneysel olarak incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda;

a) Çeşitli "kararlı akım", "salt dalga" ve "akıntı+dalga" koşulları ile değişik sınır koşulları altında, silindir üzerinde ölçülen basınç değerleri yardımıyla akımın yapı üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

b) Silindir üzerinde ölçülen basınç dağılımı kullanılarak silindire etkiyen kuvvetler belirlenmiş ve bunlar, C_D , C_M ve C_L kuvvet katsayıları ile ifade edilmişlerdir. Kuvvet katsayılarının olay üzerinde etkili olan Re ve KC gibi boyutsuz sayılar ile değişimleri grafikler halinde verilmiştir. Kuvvet katsayılarının değişiminden, "akıntı+dalga" koşullarının sistemin stabilitesi açısından oldukça önemli olduğu görülmüştür. Ölçme değerlendirme sisteminin test edilmesi amacıyla, "kararlı akım" ve "salt dalga" etkisinde tabana oturan tek silindir durumunda elde edilen kuvvet katsayıları değerleri ve değişimleri bu konuda daha önce yapılmış olan araştırmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında paralellik olduğu gözlenmiştir. Silindirin gömülme oranının da (e/D) kuvvet katsayıları üzerinde etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir.

c) Sistemin çift silindir olması durumunda, silindirlerin birbirlerine göre konumları (ara uzaklıkları ve birbirlerine göre menba veya mansapta olmaları), tek silindir konumundan farklı olarak, hem silindirler üzerindeki kuvvet ve kuvvet katsayıları, hem de yakın bölgedeki akımın yapısı üzerinde etkili olan çok önemli bir parametre olmaktadır. Bu nedenle, tek silindir için hazırlanarak uygulanmış olan "deney

programı"na, çift silindir durumu için silindirler arasındaki uzaklık da (x/D) bir parametre olarak eklenerek yeni bir test matrisi (deney programı) hazırlanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, değişik gömülme oranları ve silindirler arası uzaklık değerleri için akım ve dalga koşullarına bağlı olarak C_D , C_M ve C_L kuvvet katsayıları belirlenmiş ve ayrı ayrı grafikler halinde verilmiştir. Tek silindir konumundaki değerlerle karşılaştırılabilmesi için aynı grafikler üzerinde tek silindir değerleri de işaretlenmiştir.

d) İnceleme ve değerlendirmeye esas alınan silindirin yer ve konumuna bağlı olarak, çift silindir halinde "silindire gelen kuvvetler"de önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu da, bu tür sistemlerin tasarımında, herbir silindirin diğerinden bağımsız olarak düşünülmemeyeceğini ve her iki silindirin karşılıklı etkileşiminin de sistem stabilitesi üzerinde çok etkili olacağını göstermektedir. Buradan da, pratikte bağımsız tek silindir için kullanılan tasarım ve hesap yöntemleri ile elde edilmiş grafiklerin, çift silindir halinde ve özellikle çift silindirin bazı kritik konumları için aynen kullanılmasının mümkün olmayacağı sonucu çıkmaktadır. Dolayısıyla, tasarım sırasında tek silindir hali için de geçerli olan "fiziksel laboratuvar model deneyleri", çift silindir durumunda çok daha önem kazanmakta, hatta zorunlu hale gelmektedir. Deneyler sırasında silindir merkezleri arası uzaklığın $1.5D$ ve $2D$ olduğu durumlarda kuvvet katsayılarının zaman zaman oldukça büyük değerler aldıkları görülmüştür. Sistemin stabilitesi açısından bu kritik konuma dikkat edilmelidir.

e) Pek çok parametrenin olay üzerinde etkili olduğu böyle bir konuda yapılan bu araştırma, her ne kadar çok sayıda ve uzun bir deneysel çalışma sonucunda tamamlanabildi ise de, burada elde edilen sonuçlar, sadece konunun önemini ve olayın mekaniğini açıklaması ve tek silindir konumundan farklı bir boyutunun olduğunu göstermesi bakımından önem taşımaktadır.

f) Bu çalışma sonucunda çift silindir konfigürasyonu için ilk kez verilen C_D , C_M ve C_L kuvvet katsayılarının, KC , Re , e/D (gömülme oranı) ve x/D (silindir arası uzaklıkları) parametreleriyle değişim grafikleri, bu parametreler için uygulamada karşılaşılabilecek geniş bir değişim aralığı içinde sınırlı bir bölgeyi içermektedir.

Dolayısıyla bu grafikler, pratikte sadece sınırlı koşullar altında kullanılabilirler. Bu bilgilerin genelleştirilebilmesi için daha çok sayıda ve daha geniş değişim aralığında deneylerin yapılması gerekmektedir.

g) Bu çalışma kapsamı içine alınamayan, ancak bir bütünlük içinde tamamlanabilmesi için bundan sonra yapılacak yeni çalışmalarla,

- Akım derinliğinin olay üzerindeki etkilerinin,
- Daha büyük KC ve Re değerleri için kuvvet katsayılarının değişiminin,
- Değişik silindir ve taban konfigürasyonlarında ve yine değişik "akım", "salt dalga", "akım+dalga" etkileri altında taban hareketleri ve silindire yakın bölgedeki akım-cisim etkileşiminin , ayrı ayrı araştırılması gerekmektedir.



KAYNAKLAR

- ACHENBACH, E., (1968), Distribution of Local Pressure and Skin Friction Around a Circular Cylinder in Cross-Flow up to $Re = 5 \times 10^6$, J. Fluid Mech., Vol. 34, pp. 625.
- ACHENBACH, E., (1971), Influence of Surface Roughness on the Cross-Flow Around a Circular Cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 46, pp. 321-335.
- ACHENBACH, E., (1977), The Effect of Surface Roughness on the Heat Transfer From a Circular Cylinder to the Cross Flow of Air, Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 20, pp. 359-369.
- ACHENBACH, E., HEINECKE, E., (1981), On Vortex Shedding From Smooth And Rough Cylinders in The Range of Reynolds Numbers 6×10^3 to 5×10^6 , J. Fluid Mech., Vol. 109, pp. 239-251.
- ANGRILLI, F., BERGAMASCHI, S., COSSALTER, V., (1982), Investigation of Wall Induced Modifications to Vortex Shedding From a Circular Cylinder, ASME, J. of Fluid Eng., Vol. 104, pp. 518.
- AVCI, İ., BAYAZIT, M., ÇOKGÖR, Ş., SÜMER, M., (1996), Deniz Tabanına Oturan Bir Tünel Yakınındaki Akım Alanı ve Tünele Etkiyen Kuvvetler, Proje No. INTAG 816, Rapor, TÜBİTAK.
- BATCHELOR, G.U., (1967), An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press.
- BEARMAN, P.W., ZDRAVKOVICH, M.M., (1978), Flow Around a Circular Cylinder Near a Plane Boundary, J. Fluid Mech., Vol. 89, No. 1, pp. 33-48.
- BEARMAN, P.W., GRAHAM, J.M.R., (1979), Hydrodynamic Forces on Cylindrical Bodies in Oscillatory Flow, Proc. 2nd Int. Conf. on the Behaviour of Offshore Structures, London.
- BEARMAN, P.W. GRAHAM, J.M.R., SINGH, S., (1979), Forces on Cylinders in Harmonically Oscillating Flow. Mechanics of Wave Induced Forces on Cylinders, ed.T.L. Shaw, Pitman.
- BEARMAN, P.W. GRAHAM, J.M.R., NAYLOR, P., OBASAJU, E.D., (1981), The Role of Vortices in Oscillatory Flow About Bluff Cylinders, Proc. Int. Symp. on Hydrodyn. in Ocean Engr., Trondheim, Norway.

- BEARMAN, P.W., OBASAJU, E.D., (1989), Transverse Forces on a Circular Cylinder Oscillating in-line with a Steady Current, Proc. 8th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMEA, The Hague, March 19-23, 1989, Vol. 2, pp. 253-258.
- BLOOR, M.S., (1964), The Transition to Turbulence in The Wake of a Circular Cylinder. J. Fluid Mech., Vol. 19, pp. 290-304.
- BRYNDIUM, M.B., JACOBSEN, V., TSAHALIS, D.T., (1988), Hydrodynamic Forces on Pipelines: Model Tests, 7th Int. Conf. On OMAE, 1988, Houston, Texas, February 7-12, 1988, pp. 9-21.
- CHAKRABARTI, S.K., (1987), Hydrodynamics of Offshore Structures, Springer.
- CHAKRABARTI, S.K., (1990), Nonlinear Methods in Offshore Eng., ELSEVIER, Amsterdam.
- CHAO, J.C., LAMBRAKOS, K.F., EXXON PRODUCTION RESEARCH CO., VERLEY, R.L.P., (1989), Hydrodynamic Force Characteristics for Submarine Pipelines, 21st Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 1-4, 1989, 181-188.
- ÇOKGÖR, Ş., (1996), Akıntılı Bir Deniz Ortamında Tabana Oturan Silindire Etkiyen Kuvvetler, Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu 1996, Samsun, TMMOB, İnşaat Mühendisliği Odası.
- DAVIES, M.J.S., GRAHAM, J.M.R., BEARMAN, P.W., (1990), In line Forces on Fixed Cylinders in Regular and Random Waves, Environmental Forces on Offshore Structures and their Prediction, Advances in Underwater Technol., Ocean Science and Offshore Engineering, Vol. 26, November 28-29, 1990, pp. 113-136.
- DURSTHOFF, W., MAZURKIEWICZ, B., (1988), Effect of Seabed Proximity on the Hydrodynamic Forces Exerted on a Submerged Cylinder, 7th Int. Conf. On OMAE, 1988, Houston, Texas, February 7-12, 1988, pp. 49-53.
- DRESCHER, H., (1956), Messung der Auf Querangeströmte Zylinder Ausgeübten Zeitlich veränderlichen Drücke, Z. Flugwiss, Vol. 4, pp. 17-21.
- FREDSE, J., (1985), Kræfter på Cylindre Og Rørledninger, Noter Til Offshoreteknik, (5751), ISVA.
- FREDSE, J., SÜMER, B.M., ANDERSEN, J., HENSEN, E.A., (1985), Transverse Vibrations of a Cylinder Very Close to a Plane Wall, OMAE Dallas, Texas, pp. 601-609.
- FREDSE, J., HENSEN, E.A., (1987), Lift Forces on Pipelines in Steady Flow. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 113, No.2, 139.

- GERARD, J.H., (1978), The Wakes of Cylindrical Bluff Bodies at Low Reynolds Number, Phil. Transactions of the Royal Soc. London, Series A, 288(A1354), pp. 351-372.
- GRASS, A.J., RAVEN, P.W.J., STUART, R.J., BRAY, J.A., (1984), The Influence of Boundary Layer Velocity Gradients and Bed Proximity on Vortex Shedding From Free Spanning Pipelines, Trans. ASME, J. Energy Res. Technology, Vol. 106, pp. 70-78.
- GRASS, A.J., KEMP, P.H., (1979), Flow Visualization Studies of Oscillatory Flow Past Smooth and Rough Circular Cylinders. In: Mechanics of Wave-Induced Forces on Cylinders, ed. T.L. Shaw, Pitman. pp. 406-420.
- GÜVEN, O., PATEL, V.C., FARELL, C., (1977), A Model For High-Reynolds-Number Flow Past Rough-Walled Circular Cylinder, Trans. ASME, J. of Fluids Eng., Vol. 99, 486.
- GÜVEN, O., PATEL, V.C., FARELL, C., (1979), Surface Roughness Effects on the Mean Flow Past Circular Cylinder, Iowa Inst. Hydraulic Res., Rep. No. 175.
- HOMANN, F., (1936), Einfluss Grosser Zähigkeit Bei Strömung um-Zylinder, Forschung Auf Dem Gebiete Des Ingenieurwesen, Vol. 7, No. 1, pp. 1-10.
- HONJI, H., (1981), Streaked Flow Around an Oscillating Circular Cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 107, pp. 509-520.
- JACOBSEN, V., BRYNDUM, M.B., THATIALSIS, D.T., (1988), Prediction of Irregular Wave Forces on Submarine Pipelines, 7th Int. Conf. On OMAE, 1988, Houston, Texas, February 7-12, 1988, pp. 23-32.
- JENSEN, B.L., SÜMER, B.M., (1986), Boundary Layer Over a Cylinder Placed Near a Wall, Progress Report No. 64, Inst. of Hydrodynamics and Hydraulic Eng., ISVA, Tech. Univ. Denmark, pp. 31-39.
- JENSEN, B.L., SÜMER, B.M., JENSEN, H.R., FREDSE, J., (1988), Flow Around and Forces on a Pipeline Near a Scoured Bed, 7th Int. Conf. On OMAE, 1988, Houston, Texas, February 7-12, 1988, pp. 39-48.
- JENSEN, H.R., JENSEN, B.L., SÜMER, B.M., FREDSE, J., (1989), Flow Visualization and Numerical Simulation of the Flow Around Marine Pipelines on an Erodible Bed in Waves, 8th Int. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Eng., The Hague, March 19-23, 1989, pp. 129-136.
- JENSEN, B.L., SÜMER, B.M., JENSEN, H.R., FREDSE, J., (1990), Flow Around and Forces on a Pipeline Near a Scoured Bed in Steady Current, Trans. of the ASME, J. of Offshore Mech. and Arctic Eng., Vol. 112, pp. 206-213.

JONSSON, I.G., (1990), Wave Current Interactions. In: The Sea, eds. B. Le Mehaute and D.M. Hanes, Wiley-Interscience, N.Y.9A, pp. 65-120.

JUSTESEN, P., HANSEN, E.A., FREDSOE, J., BRYNDUM, M.B., JACOBSEN, V., (1987), Forces on and Flow Around Near-Bed Pipelines in Waves and Current. Proc. 6th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engrg. Symp., ASME, Houston, TX, March 1-6, 1987, II, pp. 131-138.

JUSTESEN, P., (1989), Hydrodynamic Forces on Large Cylinders in Oscillatory Flow. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 4, pp.497-514.

JUSTESEN, P., (1991), A Numerical Study of Oscillating Flow Around a Circular Cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 222, pp. 157-196.

KALGHATGI, S.G., SAYER, P.G., (1997), Hydrodynamic Forces on Piggyback Pipeline configurations, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE, Vol. 123, No.1, pp. 16-22.

KEULEGAN, G.H., CARPENTER, L.G., (1958), Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid, J. Research of the National Bureau of Standards, Vol 60, No. 5, Research paper 2857, pp. 423-440.

KIYA, M., (1968), Study on the Turbulent Shear Flow Past a Circular Cylinder, Bulletin Faculty of Eng., Hokkaido University, Vol. 50, pp. 1-101.

KIYA, M., TAMURA, H., ARIE, M (1980), Vortex Shedding From a Circular Cylinder in Moderate-Reynolds-Number Shear Flow., J. Fluid Mech., Vol. 141, pp. 721-735.

KLOPMAN, G., KOSTENSE, J.K. (1989), The Loading on a Vertical Cylinder in Random Waves at high Reynolds number, Delft Hydraulics, October 1989, Number No 426.

LAMMERT, W.F., HALE, J.R., JACOBSEN, V., (1989), Dynamic Response of Submarine Pipelines Exposed to Combined Wave and Current Action, 21st Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 1-4, 1989, 159-170.

LECOINTE, Y., PIQUET, J., (1989), Flow Structure in the Wake of an Oscillating Cylinder, J. of Fluids Eng., Vol. 111, pp. 139-148.

MAULL, D.J., MILLINER, M.C., (1978), Sinusoidal Flow Past a Circular Cylinder Coastal Engineering, Vol. 2, pp. 149-168.

MAZURKIEWICZ, B.K., (1987), Offshore Platforms and Pipelines, Federal Republic of Germany, Trans. Tech. Publications.

- MOE, G., VERLEY, R.L.P., (1980), Hydrodynamic Damping of Offshore Structures in Waves and Current. 12th Annual Offshore Technology Conf., Paper No OTC 3798, Houston, TX, May 5-8, 1980.
- MORISON, J.R., O'BRIEN, M.P., JONSON, J.W.B., SCHAAF, S.A., (1950), The Forces Exerted By Surface Waves On Piles, J. Petrol. Technol., Petroleum Transactions, AIME (American Inst. Mining Engrs), Vol. 189, pp. 149-154.
- OTSUKA, K., IKEDA, Y., TANAKA, N., (1990), Viscous Forces Acting on a Horizontal Circular Cylinder in Regular and Irregular Waves, 7th Int. Conf. On OMAE, 1988, Houston, Texas, February 7-12, 1988, pp. 129-138.
- PEARCEY, H.H., (1990), On Effects of Wake Re-Encounter for Wave Forces on Cylinders, Environmental Forces on Offshore Structures and their Prediction, Advances in Underwater Technol., Ocean Science and Offshore Engineering, Vol. 26, November 28-29, 1990, pp. 159-183.
- PEREGRINE, D.H., (1976), Interaction of Water Waves and Currents, Advances in Applied Mechanics, Vol. 16, pp. 9-117.
- PRESER, F., (1992), Belastung Horizontaler Rohrkörper in Meeresbodennähe Durch Seegeng im Übergangsbereich, Universität, Hannover, Franzivs-Institut, Hannover.
- RAVEN, P.W.C., STUART, R.J., LITTLEJOHNS, P.S., (1985), Full-Scale Dynamic Testing of Submarine Pipelines Spans, 17th Annual OTC, Paper No. 5005, Houston, Texas, May 6-9, 1985.
- REED, K., AARSNES, J.V., BELTRAND, E., ANDERSON, E., (1990), Wave and Current Forces on Conductor Pipe Groups, 7th Int. Conf. On OMAE, 1988, Houston, Texas, February 7-12, 1988, pp. 185-202.
- ROSHKO, A., (1961), Experiments on the Flow Past a Circular Cylinder at Very High Reynolds Number, J. Fluid Mech., Vol. 10, pp. 345-356.
- ROSHKO, A., STEINOLFFSON, A., CHATTOORGOON, V., (1975), Flow Forces on a Cylinder Near a Wall or Near Another Cylinder, Proc. 2nd US Conf. Wind Engineering Research, Fort Collins, Co., Paper IV-15.
- SARPKAYA, T., (1976a), In-line And Transverse Forces on Smooth and Sand-Roughened Cylinders in Oscillatory Flow at High Reynolds Numbers, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, Tech. Rep. NPS-69SL76062.
- SARPKAYA, T., (1976b), Forces on Cylinders Near a Plane Boundary in a Sinusoidally Oscillating Floud. Trans, ASME, J. Fluids Engng., Vol. 98, pp. 499-505.
- SARPKAYA, T., (1977), In line and Transverse Forces on Cylinders in Oscillatory Flow at High Reynolds Numbers, J. of Ship Research, Vol. 21, No 4, pp. 200-216.

- SARPKAYA, T., RAJABI, F., (1979), Hydrodynamic Drag on Bottom Mounted Smooth and Rough Cylinders in Periodic Flow, 11th Annual Offshore Technology Conference, April 30-May 3, 1979, Houston, Texas, pp. 219-226.
- SARPKAYA, T., ISAACSON, M., (1981), Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold Company.
- SARPKAYA, T., STORM, M., (1985), In-line Force on a Cylinder Translating in Oscillatory Flow, Applied Ocean Research, Vol. 7, No. 4, pp. 188-196.
- SARPKAYA, T., (1986a), Force on a Circular Cylinder in Viscous Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter Numbers, J. Fluid Mech., Vol. 165, pp. 61-71.
- SARPKAYA, T., (1986b), In-line and Transverse Forces on Smooth and Rough Cylinders in Oscillatory Flow at High Reynolds Numbers, Technical Report No. NPS-69-86-003, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- SARPKAYA, T., (1987), Oscillating Flow About Smooth and Rough Cylinders, J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, Vol. 109, pp. 307-313.
- SARPKAYA, T., (1990), On the Effect of Roughness on Cylinders, Proc. of Offshore Mech. and Arctic Engrg. Conf., Feb. 18-22, 1990, Houston, TX, 1(A), pp.47-55.
- SCHEWE, G., (1983), On The Force Fluctuations Acting on a Circular Cylinder in Cross-Flow From Subcritical up to Transcritical Reynolds Numbers, J. Fluid Mech., Vol. 133, pp. 265-285.
- SCHLICHTING, H., (1979), Boundary Layer Theory, McGraw-Hill Book Company.
- SINGH, S., (1979), Forces on Bodies in Oscillatory Flow, P.D. Thesis, University of London.
- SOLSBY, R.L., HAMN, L., KLOPMAN, G., MYRHAVG, D., SIMONS, R.R., THOMAS, G.P., (1993), Wave-Current Interactions Within and Outside the Bottom Boundary Boundary Layer, Coastal Engineering, Vol.21, pp. 41-69.
- SOTBERG, T., LEIRA, B.J., VERLEY, R.L.P., (1989), Probabilistic Stability Design of a Submarine Pipeline System, 8th Int. Conf. Of OMAE, The Hague-March, 19-23, 1989, pp. 103-111.
- SÜMER, B.M., JENSEN, B.L., FREDSE, J., (1990), Pressure Measurements Around a Marine Pipeline, Proc. 9th Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Vol. I, Part A, pp. 85-91.
- SÜMER, B.M., JENSEN, B.L., FREDSE, J., (1991), Effect of a Plane Boundary on Oscillatory Flow Around a Circular Cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 225, pp. 271-300.

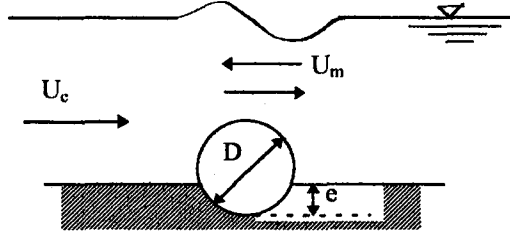
- SÜMER, B.M., (1992), Lecture Notes, United Nations Development Program, (TOKTEN), İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası.
- SÜMER, B.M., JENSEN B.L., FREDSE, J., (1992), Pressure Measurement Around a Pipeline Exposed to Combined Waves and Current.
- SÜMER, B.M., FREDSE, J., (1997), Hydrodynamics Around Cylindrical Structures, World Scientific, Advances Series on Ocean Engineering, Vol. 12, pp. 550.
- THOMSON-MILNE, L.M., (1962), Theoretical Hydrodynamics, Macmillan.
- THOMSCHKE, H., (1971), Experimentelle Untersuchung der Stationären Umströmung von Kugel und Zylinder in Wandnähe, Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, West Germany.
- WILLIAMSON, C.H.K., (1985), Sinusoidal Flow Relative to Circular Cylinders. J. Fluid Mech., Vol. 155, pp.141-174.
- WILLIAMSON, C.H.K., (1988), The Existence of Two Stages in the Transition to Three-Dimensionality of a Cylinder Wake, Phys. Fluids, Vol. 31, No. 11, pp. 3165-3168.
- WILLIAMSON, C.H.K., (1989), Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Number, J. Fluid Mech., Vol. 206, pp. 579-627.
- VAN RIJN, L.C., NIEUWJAAR, M.W.C., VAN DER KAAY, T., NAP, E., VAN KAMPEN, A., (1993), Transport of Fine Sands by Currents and Waves, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 119, No. 2, ASCE, pp. 123-143.
- VON MÜLLER, W., (1929), Systeme von Doppelquellen in der Ebenen Strömung, Zeitschrift F. Angew, Math. und Mech., 9, Heft 3, pp. 200-213.
- YAMAMOTO, T., NATH, J.H., SLOTTA, L.S., (1974), Wave Forces on Cylinders Near Plane Boundary, J. Waterway, Port, Coastal Ocean Engng. Div., ASCE, Vol. 100, pp 345-360.
- YAMAMOTO, T., NATH, J.H., (1976), High Reynolds Number Oscillatory Flow by Cylinders, Proc. of 15th ICCE Conf., Vol. II, pp. 2321-2340.
- YÜCE, M., (1995), Deniz Tabanına Oturan Silindir Etrafindaki Akım Alanı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- ZDRAVKOVICH, M.M., (1985), Forces on a Circular Cylinder Near a Plane Wall. Applied Ocean Research, Vol. 7, pp. 197-201.

EK

DENEYLER İÇİN BELİRLENEN TEST MATRİSİ



TABLO A1. Deneyler İçin Belirlenen Test Matrisi

Tek Silindir Halinde*Kararlı Akım*

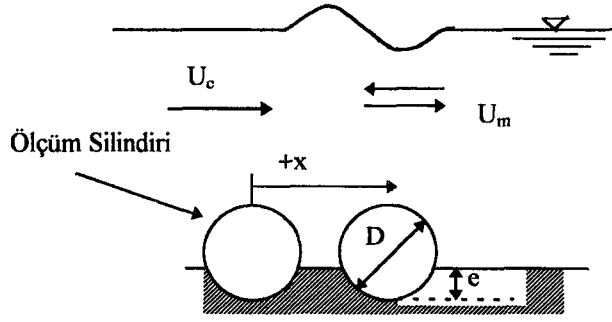
Re	Gömülme Oranı (e/D)	Su Derinliği, (h) (cm.)
2x10 ⁴	0	20
		40
1.8x10 ⁴	0	20
		40
1.5x10 ⁴	0	20
		40
1.2x10 ⁴	0	20
		40
0.8x10 ⁴	0	20
		40
1.7x10 ⁴	0.20	20
		40
0.84x10 ⁴	0.20	20
		40
1.4x10 ⁴	0.48	20
		40
0.68x10 ⁴	0.48	20
		40

Salt Dalga

$KC = \frac{U_m T}{D}$	Gömülme Oranı (e/D)	Su Derinliği, (h) (cm.)	Dalga Periyodu, (T) (s.)
0.8	0	20	0.7
		40	
1.2	0	20	1.6
		40	
2	0	20	3.2
		40	
1	0.20	20	0.7
		40	
1.45	0.20	20	1.6
		40	
2.4	0.20	20	3.2
		40	
1.2	0.48	20	0.7
		40	
1.8	0.48	20	1.6
		40	
3	0.48	20	3.2
		40	

Kararlı Akım+ Dalga

$KC = \frac{(U_m + U_c)T}{D}$	$\alpha = \frac{U_c}{U_m}$	$Re = \frac{U_c D}{\nu}$	Gömülme Oranı (e/D)	Su Derinliği, (h) (cm.)	Dalga Periyodu, (T) (s.)
1	5	1.3×10^4	0	20	0.8
2	5	1.3×10^4	0	40	1.6
5	5	1.3×10^4	0	20	3.2
0	5	2×10^4	0	40	0.8
	5	2×10^4	0	40	1.6
	5	2×10^4	0	40	3.2
1.2	5	0.8×10^4	0.20	20	0.8
2.4	5	0.8×10^4	0.20	40	1.6
6	5	0.8×10^4	0.20	20	3.2
3.6	5	1.8×10^4	0.20	40	0.8
6	5	1.8×10^4	0.20	40	1.6
12	5	1.8×10^4	0.20	40	3.2
1.5	5	0.7×10^4	0.48	20	0.8
3	5	0.7×10^4	0.48	40	1.6
7.5	5	0.7×10^4	0.48	20	3.2
4.5	5	1.2×10^4	0.48	40	0.8
7.5	5	1.2×10^4	0.48	40	1.6
15	5	1.2×10^4	0.48	40	3.2

Çift Silindir Halinde**Kararlı Akım**

Re	Silindirlerin Konumu (x/D)	Gömülme Oranı (e/D)	Su Derinliği, (h) (cm.)
2×10^4	+2	0	40
	+1.5		40
	+1		40
	-1		40
	-1.5		40
	-2		40
1.8×10^4	+2	0	40
	+1.5		40
	+1		40
	-1		40
	-1.5		40
	-2		40
1.7×10^4	+2	0.20	40
	+1.5		40
	+1		40
	-1		40
	-1.5		40
	-2		40
0.84×10^4	+2	0.20	40
	+1.5		40
	+1		40
	-1		40
	-1.5		40
	-2		40
1.4×10^4	+2	0.48	40
	+1.5		40
	+1		40
	-1		40
	-1.5		40
	-2		40
0.68×10^4	+2	0.48	40
	+1.5		40
	+1		40
	-1		40
	-1.5		40
	-2		40

Salt Dalga

$KC = \frac{U_m T}{D}$	Silindirlerin Konumu (x/D)	Gömülme Oranı (e/D)	Su Derinliği, (h) (cm.)	Dalga Periyodu, (T) (s.)
0.8	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0	40 40 40 40 40 40	0.7
1.2	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0	40 40 40 40 40 40	1.6
2	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0	40 40 40 40 40 40	3.2
1	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.20	40 40 40 40 40 40	0.7
1.45	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.20	40 40 40 40 40 40	1.6
2.4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.20	40 40 40 40 40 40	3.2
1.2	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.48	40 40 40 40 40 40	0.7
1.8	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.48	40 40 40 40 40 40	1.6
3	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.48	40 40 40 40 40 40	3.2

Kararlı Akım+ Dalga

$KC = \frac{(U_m + U_c)T}{D}$	$\alpha = \frac{U_c}{U_m}$	$Re = \frac{U_c D}{\nu}$	Silindirlerin Konumu (x/D)	Gömülme Oranı (c/D)	Su Derinliği, (h) (cm.)	Dalga Periyodu, (T) (s.)
1	5	1.3×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0	40 40 40 40 40 40	0.8
2	5	1.3×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0	40 40 40 40 40 40	1.6
5	5	1.3×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0	40 40 40 40 40 40	3.2
3	5	2×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0	40 40 40 40 40 40	0.8
5	5	2×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0	40 40 40 40 40 40	1.6
10	5	2×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0	40 40 40 40 40 40	3.2

Kararlı Akım+ Dalga (Devam)

$KC = \frac{(U_m + U_c)T}{D}$	$\alpha = \frac{U_c}{U_m}$	$Re = \frac{U_c D}{\nu}$	Silindirlerin Konumu ($\sqrt{x}/D$)	Gömölme Oranı (e/D)	Su Derinliği, (h) (cm.)	Dalga Periyodu, (T) (s.)
1.2	5	0.8×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.20	40 40 40 40 40 40	0.8
2.4	5	0.8×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.20	40 40 40 40 40 40	1.6
6	5	0.8×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.20	40 40 40 40 40 40	3.2
3.6	5	1.8×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.20	40 40 40 40 40 40	0.8
6	5	1.8×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.20	40 40 40 40 40 40	1.6
12	5	1.8×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.20	40 40 40 40 40 40	3.2

Kararlı Akım+ Dalga (Devam)

$KC = \frac{(U_m + U_c)T}{D}$	$\alpha = \frac{U_c}{U_m}$	$Re = \frac{U_c D}{\nu}$	Silindirin Konumu (x/D)	Gömülme Oranı (e/D)	Su Derinliği, (h) (cm.)	Dalga Periyodu, (T) (s.)
1.5	5	0.7×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.48	40 40 40 40 40 40	0.8
3	5	0.7×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.48	40 40 40 40 40 40	1.6
7.5	5	0.7×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.48	40 40 40 40 40 40	3.2
4.5	5	1.2×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.48	40 40 40 40 40 40	0.8
7.5	5	1.2×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.48	40 40 40 40 40 40	1.6
15	5	1.2×10^4	+2 +1.5 +1 -1 -1.5 -2	0.48	40 40 40 40 40 40	3.2

ÖZGEÇMİŞ

Şevket Çokgör 1967 yılında Lüleburgaz'da doğmuştur. Lise öğrenimini Tekirdağ Namık Kemal Lisesinde yapmıştır. 1983 yılında girdiği İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1988 yılında mezun olmuştur. 1989 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı, Su Mühendisliği programında başladığı Yüksek Lisans öğrenimini 1991 yılında Yüksek Mühendis ünvanı alarak tamamlamıştır. 1992 yılından günümüze İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı, Su Mühendisliği programında doktora öğrenimine devam etmektedir.

Şevket Çokgör 1990 yılından beri İTÜ İnşaat Fakültesi, Hidrolik Ana Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

