

154,262

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKARSULARI GEÇEN BORU HATLARI ETRAFINDAKİ
YEREL OYULMALARIN İNCELENMESİ**

İnşaat Müh. İlker YILDIRIM

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hayrullah AĞAÇCIOĞLU

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgiler	1
1.2 Engelden Dolayı Akımda Ve Tabanda Meydana Gelen Değişiklikler	2
1.2.1 Akım Karakteristiklerinde Değişim	2
1.2.2 Hız Alanındaki Değişmeler	2
1.2.3 Basınç Alanındaki Değişmeler	5
1.3 Sınır Tabakasının Oluşumu Ve Ayrılması	7
1.3.1 Engel Etrafında Oluşan Vorteks Sistemler	7
1.3.1.1 Sürüklenen Vorteks Sistem	8
1.3.1.2 Atnalı Vorteks Sistem	8
1.3.1.3 Art-İz (İzli) Vorteks Sistem	8
2. KATI MADDE HAREKETİ VE ENGELİN KATI MADDE HAREKETİNE ETKİLERİ	10
2.1 Giriş	10
2.2 Sürüklenme Hareketinin Başlaması	11
2.3 Akarsuda Katı Madde Taşınımı ve Taban Şekilleri	14
2.4 Katı Madde Taşınımında Denge	14
2.5 Dinamik Dengenin Bozulması	15
3. BORU HATLARI ETRAFINDAKİ OYULMA MEKANİZMASI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	17
3.1 Kararlı Akım Etkisindeki Boru Hatları Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmalarla İlgili Araştırmalar	17
3.2 Dalga ve/veya Gelgit Etkisindeki Boru Hatları Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmalarla İlgili Araştırmalar	41
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	51
4.1 Giriş	51
4.2 Deney Kanalı ve Malzemesinin Tanıtılması	51
4.3 Deney Öncesi Çalışmalar	53
4.3.1 Üçgen Savak Anahtar Eğrisi	53

4.4	Taban Malzemesinin Özellikleri	53
4.5	Taban Malzemesi Kritik Hızlarının Tayini	54
4.6	Boyut Analizi	55
4.7	Ölçek Etkileri	55
4.8	Deneyleerin Yapılışı.....	56
5.	DEĞERLENDİRME	59
5.1	Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D); Akımın Froude Sayısı (Fr) İle Değişimi	59
5.1.1	Kum Taban Üzerine Ve Akım Yönüne Dik Olarak Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi .	59
5.1.2	Kum Taban Üzerine, Akıma 30°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi .	62
5.1.3	Kum Taban Üzerine, Akıma 60°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi .	64
5.2	Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D); Rölatif Akım Derinliği (y_n/D) İle İlişkisi.....	65
5.2.1	Kum Taban Üzerine, Akım Yönüne Dik Olarak Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Rölatif Akım Derinliği İle Değişimi.....	65
5.2.2	Kum Taban Üzerine, Akıma 30°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Rölatif Akım Derinliği İle Değişimi	68
5.2.3	Kum Taban Üzerine, Akıma 60°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Rölatif Akım Derinliği İle Değişimi	69
5.3	Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D); Boru Reynolds Sayısı (Re) İle İlişkisi	71
5.3.1	Kum Taban Üzerine, Akıma Dik Olarak Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Boru Reynolds Sayısı İle Değişimi	71
5.3.2	Kum Taban Üzerine, Akıma 30°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Boru Reynolds Sayısı İle Değişimi .	73
5.3.3	Kum Taban Üzerine, Akıma 60°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Boru Reynolds Sayısı İle Değişimi .	75
5.4	Rölatif Oyulma Çukuru Genişliğinin (L/D); Akımın Froude Sayısı (Fr) İle İlişkisi	76
5.4.1	Kum Taban Üzerine Ve Akım Yönüne Dik Olarak Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Çukuru Genişliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi	76
5.4.2	Kum Taban Üzerine, Akıma 30°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Çukuru Genişliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi	79
5.4.3	Kum Taban Üzerine, Akıma 60°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Çukuru Genişliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi	80
5.5	Oyulma Çukurunun Atak Açısı İle Değişimi	82
5.6	Rölatif Hızın (V_0/V_{kr}) Rölatif Oyulma Derinliği (S/D) Ve Rölatif Oyulma Çukuru Genişliği (L/D) İle Değişimi	86
6.	SONUÇLAR	88
	KAYNAKLAR.....	89
	ÖZGEÇMİŞ	92

SİMGE LİSTESİ

a	Engel yarıçapı
A	Akım en kesit alanı
α	Atak açısı
B	Kanal genişliği
β	Periyot parametresi
C_D	Direnç katsayısı
C_p	Basınç katsayısı
d	Tane çapı
d_{50}	Malzemenin yüzde ellisini geçiren elek çapı
d_{60}	Malzemenin yüzde altmışını geçiren elek çapı
d_{90}	Malzemenin yüzde doksanını geçiren elek çapı
D	Boru çapı
D^*	Boyutsuz malzeme çapı
Δ	Rölatif yoğunluk
e	Bozulmamış taban ile boru arasındaki açıklık
e^*	Borunun düz tabandan rölatif açıklığı
Fr	Akımın Froude sayısı
Fr^*	Tane Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
G	Akışkanın ağırlığı
γ	Suyun özgül ağırlığı
γ_s	Taban malzemesi özgül ağırlığı
γ_s^*	Bağıl özgül ağırlık
h	Kanaldaki su derinliği
H_0	Yerel dalga yüksekliği
H_m	Boru merkezinden itibaren ölçülen oyulma derinliği
if	Taban basınç gradyanı
δ	Sınır tabakası kalınlığı
j_0	Kanal eğimi
KC	Keulegan-Carpenter sayısı
k_s	Pürüzlülük katsayısı
ξ	Surf parametresi
L	Oyulma çukuru genişliği
L/D	Rölatif oyulma çukuru genişliği
L_0	Yerel dalga boyu
μ	Suyun dinamik viskozitesi
n	Porozite
ν	Suyun kinematik viskozitesi
P^*	Engel durgunluk düzlemindeki bir noktanın basıncı
P_0	Engelden yeter uzaklıktaki bir noktanın basıncı
P_a	Mutlak basınç
P_0^i	Manometrik basınç
Q	Debi
q	Oyulma çukuru boşluğundan geçen akım debisinin gelen akım debisine oranı
q_{bot}	Oyulma çukuru birim genişliğinden geçen akım debisi
q_0	Gelen akım debisi
$q_{T(B)}$	Taban geometrisine bağlı olarak taşıma kapasitesi
$q_{T(S)}$	Membadan gelen katı madde miktarı
r	Engel merkezine göre eğrilik yarıçapı

r^1	Korelasyon katsayısı
R	Hidrolik yarıçap
R^2	Regresyon
ρ	Suyun özgül kütlesi
ρ_s	Taban malzemesinin özgül kütlesi
Re	Boru Reynolds sayısı
Re^*	Tane Reynolds sayısı
S	Oyulma çukuru derinliği
S_m	Maksimum denge oyulma derinliği
S_0	Yatay eğimli kanal tabanında gerçekleşen oyulma derinliği
S/S_0	Normalleştirilmiş oyulma derinliği
S/D	Rölatif denge oyulma derinliği
T	Dalga periyodu
θ	Akıma göre sapma açısı
τ_{kr}	Kritik kayma gerilmesi
τ_0	Taban kayma gerilmesi
τ^*	Katı madde geçişine bağlı olarak verilmiş boyutsuz Shields parametresi
U_R	Ursell sayısı
U_{RP}	Boru Ursell sayısı
v	Tabanın geometrisi
V	Herhangi bir noktadaki akım hızı
V_{avg}	Ortalama jet hızı
V_{eff}	Efektif hız
V_{kr}	Taban malzemesi hareketi için kritik hız
V_m	Yörüngesel hızın yatay bileşeninin maksimum değeri
V_p	En dar kesitteki ortalama akım hızı
V_r	Radyal hız bileşeni
V_0	Rahatsız edilmemiş ortalama akım hızı
V_0^i	Engelden yeter uzaklıktaki akım hızı
V_θ	Teğetsel hız bileşeni
V^*	Kayma hızı
V_{*kr}	Kritik kayma hızı
x	Akım yönünde engelden itibaren ölçülen mesafe
y	Akım derinliği
y_b	Dalga kırılma derinliği
y/H_0	Dalga parametresi
y_{kr}	Kritik derinlik
y_n	Normal akım derinliği
y_n/D	Rölatif akım derinliği

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Durgunluk düzlemi ve akım çizgilerinde sapmalar (Hjorth, 1975)	2
Şekil 1.2 Silindirik koordinat sisteminde engel etrafındaki akım çizgileri ve hız bileşenleri (Hjorth, 1975)	3
Şekil 1.3 Borunun yatak üzerinde olması halinde engel etrafında hız dağılımı (Hjorth, 1975)	4
Şekil 1.4 Yatak üzerindeki boru etrafında türbülans dağılımı (Hjorth, 1975)	4
Şekil 1.5 C_p basınç katsayısının teorik dağılımı (Hjorth, 1975)	6
Şekil 1.6 Dairesel bir engel etrafında oluşan vorteks sistemler (Shen et al., 1966)	9
Şekil 2.1 Üniform bir kanalın birim boyunda etkili kuvvetler. (Bayazıt, 1971)	10
Şekil 2.2 Shields diyagramı (Shields, 1936)	12
Şekil 2.3 Bonnefille'in verdiği diyagram (Bonnefille, 1963)	13
Şekil 3.1 Chao ve Hennessy (1972) tarafından verilmiş değişkenler (Chao ve Hennessy, 1972)	17
Şekil 3.2 Ölçülen ve tahmin edilen oyulma derinliklerinin karşılaştırılması (Chiew – Melville, 1987)	22
Şekil 3.3 e/D ve Froude sayısının fonksiyonu olarak boru hatları altındaki yerel oyulmaların değişimi (Maza, 1987)	23
Şekil 3.4 Oyulma başlangıcı ve üç vorteks sistemi (Mao, 1988)	24
Şekil 3.5 Kum parçackılarının efektif hızının hareket yönünün şematik izahı (Mao, 1988) ...	25
Şekil 3.6 Farklı atak açıları için art-iz oluşumu ve kesitin şematik izahı (Mao, 1988)	26
Şekil 3.7 Oyulma profilleri ($t=400$ dk.), $\tau_*=0.018$, $D=100$ mm, $V_0=25$ cm/s (Sümer et al., 1988)	27
Şekil 3.8 Deneylerde uygulanan boru gömme boyutları (Chiew, 1990)	28
Şekil 3.9 Tünel oyulması gerçekleşmediğinde meydana gelen oyulma biçimi (Chiew, 1990)	29
Şekil 3.10 Boru hattı etrafındaki basınç dağılımları (Chiew, 1990)	30
Şekil 3.11 Chiew tarafından verilmiş, y_n/D 'nin q ve e/D parametrelerine bağlı olarak değiştiği grafik (Chiew, 1991)	32
Şekil 3.12 y_n/D 'nin q' ye bağlı değişimi (Chiew, 1991)	33
Şekil 3.13 Tipik denge oyulma profili (Chiew, 1991)	34
Şekil 3.14 Oyulma çukuru boyutları (Moncada ve Aguirre, 1999)	35
Şekil 3.15 (a) Rölatif oyulma derinliğinin (S/D) Re ve τ_* ile değişimi; (b) rölatif oyulma derinliğinin (S/D) Re ve Fr ile değişimi (Moncada ve Aguirre, 1999)	36
Şekil 3.16 Hareketli taban şartlarında Froude sayısının (Fr) rölatif oyulma derinliğine (S/D) etkisi (Moncada ve Aguirre, 1999)	37
Şekil 3.17 y_n/D 'nin S/D 'ye etkisi (Moncada ve Aguirre, 1999)	38
Şekil 3.18 Froude sayısının (Fr) rölatif oyulma genişliği (L/D) ile değişimi (Moncada ve Aguirre, 1999)	39
Şekil 3.19 $Fr/D^{0.59}$ parametresinin rölatif oyulma genişliğine (L/D) etkisi (Moncada ve Aguirre, 1999)	39
Şekil 3.20 Boru pozisyonunun denge oyulma derinliğine etkisi (Moncada ve Aguirre, 1999)	40
Şekil 3.21 Farklı boşluk oranları (e/D) ve %2 taban eğimi için oyulma çukurunun boyutsuz profilleri (Moncada ve Aguirre, 1999)	41
Şekil 3.22 Art-iz etkisi; a)akıntı, b)dalga (Sümer ve Fredsoe, 1990)	41
Şekil 3.23 Dalgalı ortamda oyulma derinliğinin boru Reynolds sayısı ve Shields parametresi ile değişimi (Sümer ve Fredsoe, 1990)	44
Şekil 3.24 Maksimum denge oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999)	46
Şekil 3.25 Rölatif oyulma derinliğinin β parametresi ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999) ..	47
Şekil 3.26 Normalleştirilmiş oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999)	48

Şekil 3.27 Rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999)....	49
Şekil 3.28 Bütün taban eğimleri için boru Ursell sayısının (U_{RP}) rölatif oyulma derinliği ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999).....	49
Şekil 3.29 Maksimum oyulma derinliğinin konumu (Çevik ve Yüksel, 1999)	50
Şekil 4.1 Kanalin planı	52
Şekil 4.2 Kanalin boy kesiti	52
Şekil 4.3 Savak anahtar eğrisi	53
Şekil 4.4 : Taban malzemesi granülometri eğrisi.....	54
Şekil 4.5 Atak açısı.....	56
Şekil 5.1 3 cm çaplı dairesel boru ile 3x3 cm boyutlu kutu kesit için S/D-Fr değişimi.....	59
Şekil 5.2 4 cm çaplı dairesel boru ile 4x4 cm boyutlu kutu kesit için S/D-Fr değişimi.....	60
Şekil 5.3 5 cm çaplı dairesel boru ile 5x5 cm boyutlu kutu kesit için S/D-Fr değişimi.....	60
Şekil 5.4 Rölatif oyulma derinliğinin akımın Froude sayısı ile değişimi.....	61
Şekil 5.5 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, S/D-Fr değişimi grafikleri	63
Şekil 5.6 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ, sol ve eksen kısımları için çizilen, S/D-Fr değişimi grafikleri	63
Şekil 5.7 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, S/D-Fr değişimi grafikleri	64
Şekil 5.8 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, S/D-Fr değişimi grafikleri.....	65
Şekil 5.9 Rölatif oyulma derinliğinin rölatif akım derinliği ile değişimi.....	66
Şekil 5.10 4 cm çaplı dairesel boru ve 4x4 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölatif oyulma derinliklerinin rölatif akım derinlikleri ile değişimi	66
Şekil 5.11 5 cm çaplı dairesel boru ve 5x5 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölatif oyulma derinliklerinin rölatif akım derinlikleri ile değişimi	67
Şekil 5.12 Dairesel ve kutu kesitli borular için bulunan rölatif oyulma derinliklerinin rölatif akım derinlikleri ile değişimi.....	67
Şekil 5.13 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-rölatif akım derinliği değişimi grafikleri.....	68
Şekil 5.14 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3x3cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-rölatif akım derinliği değişimi grafikleri.....	69
Şekil 5.15 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-rölatif akım derinliği değişimi grafikleri.....	70
Şekil 5.16 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3x3cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-rölatif akım derinliği değişimi grafikleri.....	70
Şekil 5.17 Rölatif oyulma derinliğinin boru Reynolds sayısı ile değişimi.....	71
Şekil 5.18 4 cm çaplı dairesel boru ve 4x4 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölatif oyulma derinliklerinin boru Reynolds sayıları ile değişimi	72
Şekil 5.19 5 cm çaplı dairesel boru ve 5x5 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölatif oyulma derinliklerinin boru Reynolds sayıları ile değişimi	72
Şekil 5.20 Dairesel ve kutu kesitli borular için bulunan rölatif oyulma derinliklerinin boru Reynolds sayıları ile değişimi.....	73
Şekil 5.21 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği- Reynolds sayısı değişimi grafikleri	74
Şekil 5.22 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3x3cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ sahil,	

sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-Reynolds sayısı değişimi grafikleri.....	74
Şekil 5.23 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği- Reynolds sayısı değişimi grafikleri	75
Şekil 5.24 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutundaki kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-Reynolds sayısı değişimi grafikleri.....	76
Şekil 5.25 L/D'nin Froude sayısı ile değişimi	77
Şekil 5.26 4 cm çaplı dairesel boru ve 4x4 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölatif oyulma çukuru genişliklerinin akımın Froude sayıları ile değişimi	77
Şekil 5.27 5 cm çaplı dairesel boru ve 5x5 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölatif oyulma çukuru genişliklerinin akımın Froude sayıları ile değişimi	78
Şekil 5.28 Dairesel ve kutu kesitli borular için bulunan rölatif oyulma çukuru genişliklerinin akımın Froude sayıları ile değişimi	78
Şekil 5.29 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma çukuru genişliği-Froude sayısı değişimi grafikleri.....	79
Şekil 5.30 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutundaki kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni çizilen, rölatif oyulma çukuru genişliği-Froude sayısı değişimi grafikleri.....	80
Şekil 5.31 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni çizilen, rölatif oyulma çukuru genişliği-Froude sayısı değişimi grafikleri	81
Şekil 5. 32 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutundaki kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni çizilen, rölatif oyulma çukuru genişliği-Froude sayısı değişimi grafikleri.....	81
Şekil 5.33 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için dairesel kesitli borular etrafındaki S/D-Fr ilişkisi.....	82
Şekil 5.34 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için kutu kesitli borular etrafındaki S/D-Fr ilişkisi	83
Şekil 5.35 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için dairesel kesitli borular etrafındaki S/D-yn/D ilişkisi.....	83
Şekil 5.36 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için kutu kesitli borular etrafındaki S/D-yn/D ilişkisi.....	84
Şekil 5.37 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için dairesel kesitli borular etrafındaki S/D-Re ilişkisi.....	84
Şekil 5.38 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için kutu kesitli borular etrafındaki S/D-Re ilişkisi	85
Şekil 5.39 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için dairesel kesitli borular etrafındaki L/D-Fr ilişkisi.....	85
Şekil 5.40 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için kutu kesitli borular etrafındaki L/D-Fr ilişkisi	86
Şekil 5.41 Akım yönüne dik olarak yerleştirilen engeller etrafındaki rölatif oyulma derinliklerinin rölatif hız ile değişimi	86
Şekil 5.42 Akım yönüne dik olarak yerleştirilen engeller etrafındaki rölatif oyulma çukuru genişliklerinin rölatif hız ile değişimi.....	87

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Araştırmacılar tarafından yapılan deneylerin sınır şartları (Chiew, 1991)	18
Çizelge 3.2 a ve b pozisyonlarındaki borular için basınç gradyanlarının karşılaştırılması (Chiew, 1990)	30
Çizelge 3.3 Ortalama basınç gradyanları (Chiew, 1990)	31
Çizelge 4.1 Deney sınır şartları	58



ÖNSÖZ

Bu tez, akarsuları geçen boru hatları etrafındaki yerel oyulmaların incelenmesi amacıyla, Yıldız Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında yapılan bir dizi deneyden elde edilmiş sonuçların yorumlanmasını içermektedir.

Tez, elde ettiğimiz deney sonuçları ile daha önceden konuyla ilgili çalışma yapmış araştırmacıların elde ettikleri sonuçlar karşılaştırılarak desteklenmiştir.

Bu çalışmayı yöneten ve çalışmanın her aşamasında büyük ilgi ve desteğini gördüğüm, Sayın Hocam Doç. Dr. Hayrullah Ağaçcıoğlu'na gösterdiği yakın ilgiden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca manevi desteğini esirgemeyen Hidrolik Anabilim Dalının tüm elemanlarına teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

Su, petrol, gaz ve benzeri sıvıları taşıyan boru hatları, çoğu zaman bir akarsu, göl ya da denizi geçmek zorunda kalmaktadır. Yatak üzerinde veya yatağa gömülü olarak yerleştirilen bu boru hatları etrafında, akım etkisi ile oyulmalar görülmektedir. Akım yönüne dik yerleştirilen bu boru hatları etrafında oluşacak oyulmaların tahmin edilebilmesi, mühendislik çalışmaları açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada, dairesel ve kutu kesitli borular kullanılarak yapılan deneyler konu edilmektedir. Yapılan boyut analizi sonucu, rölatif akım derinliği (y_n/D), borunun Reynolds sayısı (Re) ve akımın Froude sayısına (Fr) bağlı olarak, rölatif denge oyulma derinliği (S/D) ve rölatif oyulma çukuru genişliği (L/D) boyutsuzları elde edilmiştir.

Birinci bölümde, oyulma hareketi tanımlanmış ve bu harekete etki eden faktörler incelenmiştir. Ayrıca çeşitli engellerden dolayı akımda ve tabanda meydana gelen değişiklikler üzerinde durulmuştur.

İkinci bölümde, katı madde hareketi ve engelin katı madde hareketine etkileri üzerinde durulmuştur.

Üçüncü kısımda oyulma hadisesinin genel olarak incelenmesi yapılmış ve boru hatları etrafındaki vorteksten dolayı oluşan iki boyutlu akım konusu incelenmiştir.

Dördüncü bölümde ise konuyla ilgili yapılan deneysel çalışmadan bahsedilmiştir.

Beşinci ve altıncı bölümlerde, deney sonuçları değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde, deneysel çalışmadan elde edilen oyulma derinliklerinin çeşitli çaplara bağlı olarak değişimini veren eğriler çizilmiştir.

Deneyler dikdörtgen kanalda yapılmış ve üç farklı çaptaki borular taban üzerine yerleştirilmiştir. Sonuçlar, rölatif akım derinliğinin (y_n/D) oyulma sürecine etkisinin ihmal edilebilecek mertebede olduğunu, bunun aksine, akımın Froude sayısının oyulma sürecine önemli ölçüde etki ettiğini göstermiştir. Oyulma çukurunun karakteristik boyutları ile akımın Froude sayısı arasında iyi bir korelasyon elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Denizaltı boru hatları, yerel oyulmalar, akarsu geçişleri, maksimum oyulma derinliği tahmini.

ABSTRACT

Pipelines that are used to convey water, petroleum gas or any other fluid must generally be crossed a river. The scour around the pipes may become partially exposed to action of a current. Prediction of the scour produced below pipelines placed transversally to a current on a movable bed constitutes an important problem in engineering problems. In this study, the scour depths around both cross-sections type of pipe, which have the curricular, and the square shape are experimentally investigated. The results of dimensionless analysis obtained showed that the relative equilibrium scour depth S/D and the relative scour hole length (L/D) are dependent on the relative flow depth (y_n/D) , Reynolds number of the pipe (Re) and Froude number of the flow (Fr) .

The first chapter discusses the description of scour and its properties. The factors affected the scour has also explained.

In the second chapter, the sediment transport mechanism and handicaps which effects the scour under the pipelines were also explained.

In the third section, scour caused by straight and unobstructed currents were examined. Two dimensional flow around the pipelines was also explained.

In the fourth chapter, scour depths under the pipelines was examined for the different diameters of pipes by the help of experimental studies.

In the fifth and sixth sections, experimental results were evaluated.

Experiments were performed in a rectangular laboratory channel. Pipes of three different sizes were located on the top of the bed. Although the obtained results showed that the relative flow depth (y_n/D) exerts a negligible influence on the scour process. Froude number of flow was found to be an important parameter in the definition of the scour process. Good correlations were achieved the relationship between Froude number of flow and dimensions of scour hole as the most important parameters.

Keywords: Submarine pipelines, local scours, river crossings, prediction of maximum scour depth.

1. GİRİŞ

Akarsu yatağına yerleştirilen herhangi bir yapı, akımda bazı değişikliklere yol açar. Bu değişimlerin önceden tahmin edilmesi gerekir. Zaman içinde önceden tahmin edilemeyen problemlerin ortaya çıkması yapının görevini yerine getirememesine yol açar.

Akarsulara yatay olarak yerleştirilen boru hatları ve tüneller akım kesitinin bir kısmını kapatarak, akım alanında bir takım değişikliklere neden olurlar. Bunlar engel etrafındaki akım çizgilerindeki sapmalar, sınır tabakasının oluşması ve ayrılması, vorteks sistemler ve sekonder hareketler gibi yersel olaylardır.

Akım karakteristiklerindeki bu yersel değişmelerden tabandaki katı madde hareketi de etkilenir. Katı madde dengesinin bozulmasıyla engel etrafında oyulmalar başlar.

Oyulma derinlikleri önceden yeterli doğrulukta tahmin edilerek projelendirme yapılmaz veya oyulmanın meydana getireceği problemlere karşı yeterli tedbir alınmazsa, boru hattında deformasyonlar olur.

Bu sebeple, olaya etkili parametrelerin önemine, engelin değişen tip ve durumuna göre, oyulmanın nasıl ve ne ölçüde ortaya çıkacağını bilmek gerekir.

1.1 Genel Bilgiler

Hareketli tabanlı bir akarsuya yerleştirilen herhangi bir engel, o noktada akım karakteristiklerinde değişmelere yol açar. Engel etrafında akıma ait hız ve basınç alanlarındaki değişmeler, bunlara bağlı olarak da engel etrafında bulunan sınır tabakasından ayrılmalar meydana gelir. Ayrılmalar sonucu çeşitli biçim ve büyüklükte vorteks sistemler ve sekonder hareketler oluşur.

Akarsulardaki taban malzemesi hareketi, akım karakteristiklerindeki yukarıda sözü edilen değişikliklerin bir fonksiyonu olduğundan, akarsuda böyle bir değişikliğe yol açan engel etrafındaki katı madde hareketini ve varsa oyulma-yığılma gibi problemlerin inceleme ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır.

Buradan hareketle, genelde bir engelin kendisini çevreleyen akım karakteristiklerinde ne tür değişiklikler oluşturduklarını görelim.

1.2 Engelden Dolayı Akımda Ve Tabanda Meydana Gelen Değişiklikler

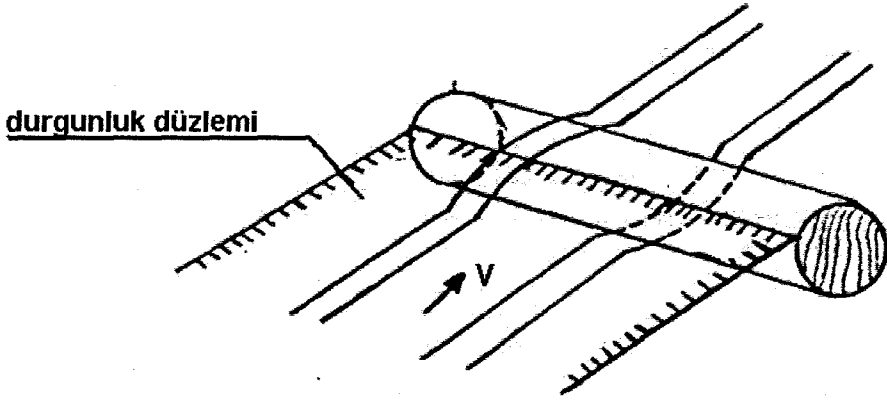
1.2.1 Akım Karakteristiklerinde Değişim

Doğrusal bir kanalda akıma yerleştirilen herhangi bir engel, yerel olarak akımın karakteristiklerinde çok önemli değişikliklere neden olur (Üç, 1979). Bu değişimler;

- 1) Engelden dolayı akım çizgilerinde meydana gelen sapmalar ve bunun neticesi olarak da engel etrafında hız ve basınç alanlarında değişimler,
 - 2) Engel etrafında sınır tabakasının oluşması, hız ve basınç alanlarındaki değişimlerin neticesi olarak, sınır tabakasından ayrılmalar,
 - 3) Sınır tabakasından ayrılmanın neticesinde engel etrafında çeşitli biçim ve büyüklükte vorteks sistemlerin oluşması ve sekonder hareketler,
 - 4) Engel etrafında oluşan vorteks sistemler ve sekonder akımın etkisiyle tabanda dengede bulunan katı maddelerin yerinden sökülmesi ve taşınması,
 - 5) Engel etrafında oyulmanın başlaması ve oyulma çukurunun oluşması,
- olarak sıralanabilir.

1.2.2 Hız Alanındaki Değişimler

Yapılan teorik ve deneysel çalışmalarda, engelin simetri eksenini üzerindeki akım çizgilerinin, engele yaklaştıkça hızlarının azaldığı ve engelin etrafında sıfır olduğu gösterilmiştir. Engel üzerinde hızın sıfır olduğu bu noktaya “durgunluk noktası” denir. Şekil 1.1 de “durgunluk düzlemi” gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Durgunluk düzlemi ve akım çizgilerinde sapmalar (Hjorth, 1975)

Hjorth (1975), kanal tabanına yarı gömülü bir boru etrafındaki hız dağılımını silindirik koordinat sisteminde,

$$V_r = -V_o' \times \left| 1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right| \times \cos \theta \quad (1.1)$$

$$V_\theta = V_o' \times \left| 1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right| \times \sin \theta \quad (1.2)$$

şeklinde ifade etmiştir. Herhangi bir (r, θ) noktasındaki toplam hızı ise;

$$V = V_o' \times \left| 1 - 2 \times \left(\frac{a}{r} \right)^2 \times \cos 2\theta + \left(\frac{a}{r} \right)^4 \right|^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

şeklinde ifade etmiştir. Burada :

V_r = Radyal hız bileşeni

V_θ = Teğetsel hız bileşeni

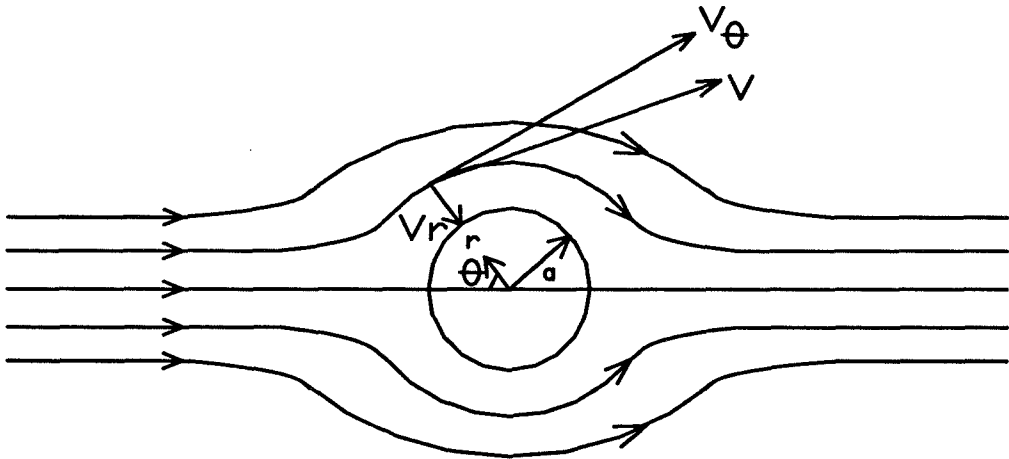
V = Herhangi bir noktadaki akım hızı,

a = Engel yarıçapı,

r = Engel merkezine göre eğrilik yarıçapı,

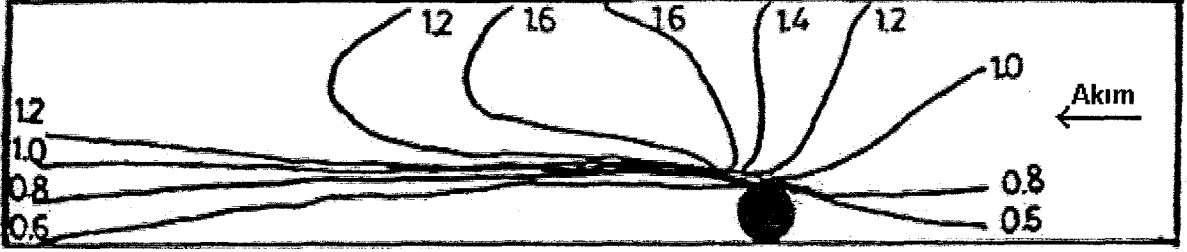
θ = Akıma göre sapma açısı,

V_o' = Engelden yeter uzaklıktaki akım hızıdır.

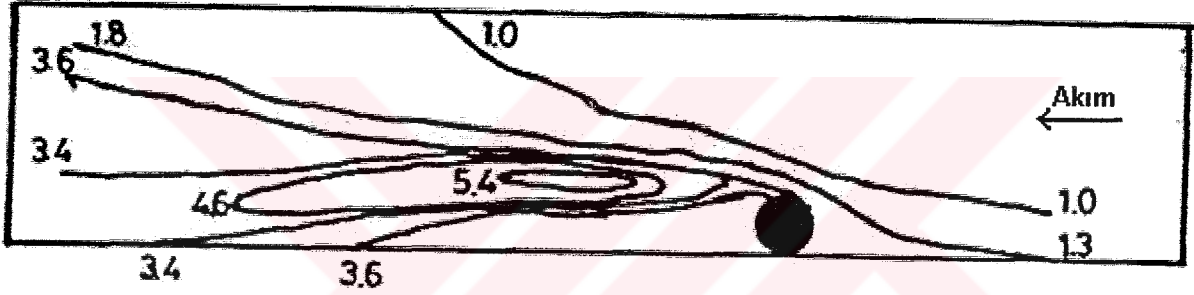


Şekil 1.2 Silindirik koordinat sisteminde engel etrafındaki akım çizgileri ve hız bileşenleri (Hjorth, 1975)

Gerçekte engelin oluşturduğu türbülans bu hız dağılımını bozmaktadır. Borunun yatak üzerinde olması halinde Hjorth (1975)'un deneysel çalışmalarında elde ettiği bu değerler Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.3 Borunun yatak üzerinde olması halinde engel etrafında hız dağılımı. ($V_o = 21,7$ cm/s $D = 2$ cm $y_n = 14$ cm. Çizgiler, V/V_o rölatif hız değerlerini ifade etmektedir.) (Hjorth, 1975)



Şekil 1.4 Yatak üzerindeki boru etrafında türbülans dağılımı. ($V_o = 21,7$ cm/s $D = 2$ cm $y_n = 14$ cm. Çizgiler, yerel türbülansın yaklaşan akımın ortalama türbülansına oranını ifade etmektedir.) (Hjorth, 1975)

Burada;

V = Engel etrafında herhangi bir noktadaki akım hızı,

V_o = Ortalama akım hızı,

D = Boru çapı,

y_n = Normal akım derinliğidir.

Borunun hemen önünde ve arkasında V/V_o değerleri, boru sırtına göre küçük olmaktadır. Buna göre boru üzerinde hız maksimumdur. Borunun yarı gömülü olması halinde ise, memba ve mansap tarafındaki V/V_o değerleri, tamamen yatak üzerindeki boruya oranla bir miktar artmakta, fakat boru üzerinde azalmaktadır.

1.2.3 Basınç Alanındaki Değişmeler

Akıma yerleştirilen herhangi bir engel, akımın hız ve basınç alanında değişimlere neden olur. Basınç alanındaki değişimleri görebilmek için engelden yeterli uzaklıkta bir nokta ile, engelin durgunluk düzlemindeki bir nokta arasında Bernoulli denklemini yazılırsa, engel önündeki basınç;

$$P_* = P_o + \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (1.4)$$

Burada;

P_* = Engel durgunluk düzlemindeki bir noktanın basıncı,

P_o = Engelden yeter uzaklıktaki bir noktanın basıncı,

$\frac{V^2}{2g}$ = Dinamik basınçtır.

Engel etrafındaki basınç dağılımı ise ;

$$P_* = \frac{1}{2g} \times V^2 \times (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (1.5)$$

şeklindedir. Genellikle basınç dağılımı ;

$$C_p = \frac{(P_a - P_o')}{\frac{1}{2g} V^2} \quad (1.6)$$

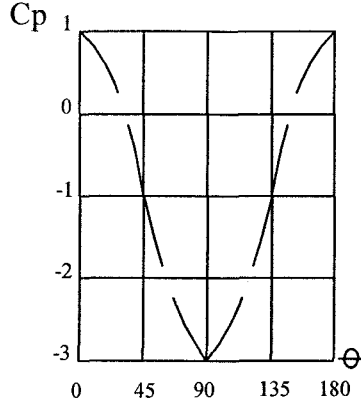
şeklinde boyutsuz olarak verilir. Burada:

C_p = Basınç Katsayısı

P_a = Mutlak Basınç

P_o' = Manometrik Basınçtır.

C_p 'nin θ ile değişimi 1.5 denklemi esas alınarak Hjorth (1975) tarafından elde edilmiş ve Şekil 1.5'de verilmiştir.



Şekil 1.5 C_p basınç katsayısının teorik dağılımı (Hjorth, 1975)

Boru etrafında basınç dağılımı farklılık gösterir. Hjorth (1975) yatak üzerinde ve yarı gömülü boru için ortalama basınç dağılımlarını ölçmüştür.

Deneyler, boru üzerindeki ortalama basınç düşmesinin, yatak üzerindeki boruda $\rho \times \frac{V_p^2}{2}$, yarıya kadar gömülü boruda $\frac{2}{5} \times \rho \times \frac{V_p^2}{2}$ olduğunu göstermiştir. Boru yakınlarında basınç değişim aralığı, ortalama basınca yaklaşık olarak eşit bulunmuştur. Basınç değişim aralıkları borunun yatak üzerindeki durumuna göre farklılık göstermektedir. Yatak üzerindeki boru için $\rho \times V_p^2$, yarıya kadar gömülü borular için $\frac{3}{4} \times \rho \times V_p^2$ 'dir. Burada V_p , en dar kesitteki ortalama hızdır.

Engel etrafındaki türbülansın akıma etkileri aşağıdaki gibi sıralanabilir :

- 1) Serbest akımda türbülans şiddetinin değişimi, engel etrafındaki akım biçimini ve Reynolds gerilmelerini değiştirir.
- 2) Bazı gövdelerde akımın tekrar birleşmesi bir faktör olarak kabul edilmeyebilir. Böylelikle sahip gövdelerde türbülans şiddetinin artması, direnç katsayısının (C_D) da artmasına neden olur.
- 3) Türbülansın artmasıyla birlikte, gövdenin şekline bağlı olarak tekrar irtibatlı veya yaklaşık irtibatlı gövdeler, artan ve eksilen C_D katsayısına sahip olabilirler.
- 4) Yukarıdaki maddede sözü edilen etkiye en çok duyarlı gövdeler, uzunluğunun genişliğine oranı bire yakın olan gövdelerdir.
- 5) 3. ve 4. maddede belirtilen gövdelerde türbülans şiddetinin yaklaşık %10 değişmesiyle gövde kenarındaki basınç dağılımı %100'e kadar değişebilir (Üç, 1979).

Roshko (1961) yaptığı araştırmada $10^6 - 10^7$ Reynolds sayısı değerlerine kadar yeni ölçümler yapmış, bu ölçümler sonucunda silindirik engelin arkasındaki basınçta bir düşme, buna karşılık C_D katsayısında %70 değerine kadar bir artma olduğunu gözlemiştir. C_D direnç katsayısını

$$C_D = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \times \cos\theta \times d\theta \quad (1.7)$$

şeklinde, C_p basınç katsayısından elde etmiştir.

1.3 Sınır Tabakasının Oluşumu Ve Ayrılması

Katı bir cismin yüzeyine yapışık çok ince bir tabakada etkili olan viskoz kuvvetler ve bunlarla aynı mertebeden olan atalet kuvvetleri, akışkan partiküllerinin, bu tabakanın dışındakilere göre gecikmesine sebep olurlar. Dış akımın bölge kalınlığına oranla çok ince bir kalınlıkta olan sınırdaki bu tabakaya sınır tabakası adı verilir (Durgun, 1964).

Diğer bir deyişle sınır tabakası, cıdarın yavaşlatıcı etkisinin görülmediği dış akımın V hızına %1 kadar yaklaştığı bölgeye verilen addır (Commolet, 1963).

“Genelleştirilmiş sınır tabakası hipotezleri” olarak adlandırılan ve sınır tabakasındaki akım için ileri sürülen hipotezler şunlardır :

- 1) Cıdara yapışık δ kalınlığındaki bir tabakanın dışında akışkan ideal olarak düşünülebilir. Yani bu bölgede viskozitenin etkisi ihmal edilebilir ve potansiyel hareketin tüm varsayımları uygulanabilir.
- 2) δ sınır tabakası kalınlığı, tabaka içindeki diğer çizgisel uzunluklarla kıyaslandığında çok küçüktür. Yani, L , sınır tabakası içindeki uzunluk ölçüleri mertebesinde ise $L \gg \delta$ bağıntısı vardır.
- 3) Eğer, V , sınır tabakası dışındaki yüzey koordinatları yönündeki hızların mertebesinin sabit değerleri ise, Reynolds sayısı yeter derecede büyüktür ve en az $(L/\delta)^2$ mertebesindedir.
- 4) Sınır tabakasına teğet hız bileşenleri, yerel hızlar (V) mertebesindedir. Buradan süreklilik denklemi, sınıra dik normal hız bileşenlerinin büyüklük mertebesinin $V\delta/L$ olduğunu ifade eder.
- 5) Sınır tabakası içindeki akım türbülanslı ise, Reynolds kayma gerilmeleri, $\rho V^2 \delta/L$ mertebesindedir. Reynolds normal gerilmeleri ise ρV^2 ile $\rho V^2 \delta/L$ mertebesi arasındadır (Hug, 1975).

1.3.1 Engel Etrafında Oluşan Vorteks Sistemler

Bunlar genellikle üç türlü olmakla birlikte, engel özelliklerine ve olayın mekanizmasına bağlı olarak, her olayda hepsi oluşmayabilir veya oluşunlar bile aynı derecede etkili olmayabilirler.

Bu vorteks sistemler ;

- 1) Sürüklenen vorteks sistemler
- 2) Atnalı vorteks sistem
- 3) Art-iz (izli) vorteks sistemler

1.3.1.1 Sürüklenen Vorteks Sistem

Bu tip vorteks sistemler aynı köşede birleşen yüzeyler arasında sonlu basınç farkları olan durumlarda meydana gelir. Engelin duraklama düzlemi ile kanal tabanının birleştiği yerde oluşan yüksek basınç gradyanları bu vortekslerin oluşmasına neden olur. Genelde tam batık engellerde oluşur.

Taban akımının sınır tabakasından ayrılması ve durgunluk düzleminden aşağı doğru inen akımın sınır tabakasından ayrılması neticesinde oluşan çevri hareketleri bu vorteks sistemleri oluştururlar (Shen et al., 1966).

1.3.1.2 Atnalı Vorteks Sistem

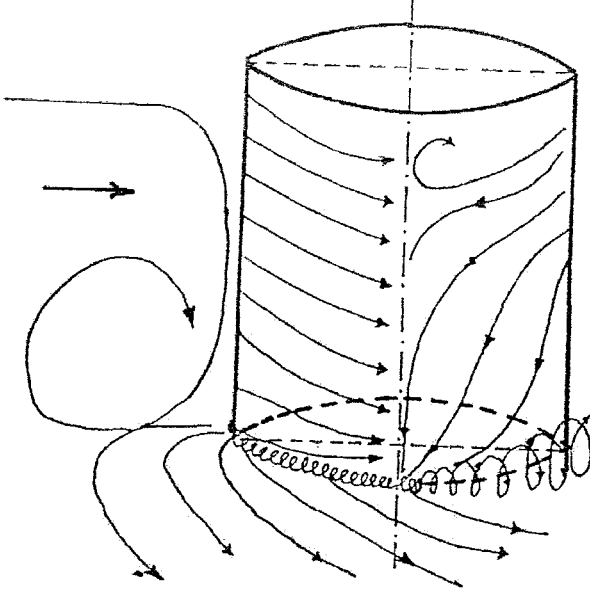
Engelin membaında oluşan aşağı yönlü düşey hız bileşeninin tabana vardığında yansıdığını ve saptığını biliyoruz. Yön değiştiren bu hız bileşenlerinin bir bölümü sürüklenen vorteks sistemi oluştururken, diğer bir bölümü ise tekrar yükselerek hareketlerine devam ederler. Bu olayların sonucu olarak engelin tabanı yakınında bir çevrinti hareketi oluşur. İşte bu yeni çevri hareketine atnalı vorteks sistem denir.

Atnalı vorteks sistemin oluşması için yeter büyüklükte bir basınç değişiminin oluşması gerekir. Bu ise ancak küt burunlu engellerde olur. Bu takdirde sınır tabakasından ayrılma olacak ve atnalı vorteks sistemi oluşturmak üzere engel önünde yuvarlanacaktır.

1.3.1.3 Art-İz (İzli) Vorteks Sistem

Hızların daha büyük ve akım çizgilerinin eğrilik yarıçaplarının küçük olduğu hallerde, sekonder hareketin artan hız yönünde yükselerek gittiği açık olarak görülür. Yüzeyden kaçmak için dönerek yükselmekte olan bu iki çevri, genel hareket tarafından sürekli olarak beslenirler. Bunun sonucu olarak, bu hareketin de helekodial yörüngeli olacağı açıktır.

Engelin mansabında bu iki çevriden biri, ötekinden daha önce oluşur. Fakat bu çevri, kendi parçacıklarıyla genel hareketin sürtünmesi sonucu frenlenir. Bu olay derhal küçük olan diğer çevrinin biraz daha büyük ölçekte oluşmasına neden olur. Şekil 1.6'da dairesel bir engel etrafında oluşan vorteks sistemler görülmektedir.



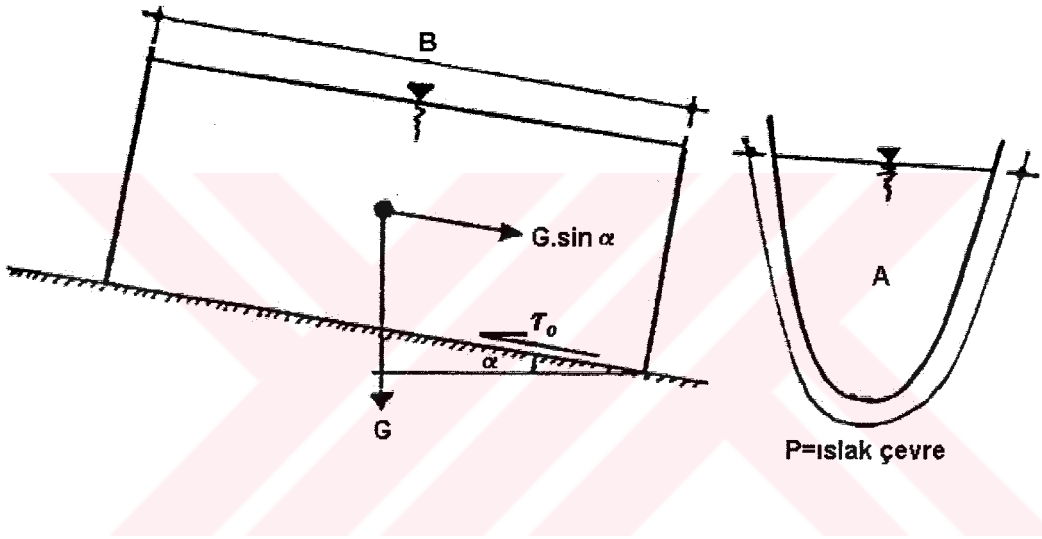
Şekil 1.6 Dairesel bir engel etrafında oluşan vorteks sistemler (Shen et al., 1966)

2. KATI MADDE HAREKETİ VE ENGELİN KATI MADDE HAREKETİNE ETKİLERİ

2.1 Giriş

Doğadaki akarsuların yatakları hemen her zaman akımın belli şartları altında hareket edebilen katı madde tanelerinden oluşmuştur.

Üniform bir akımda kuvvetlerin dengesi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Akışkanın kanal sınırlarına etkilediği kayma gerilmesi (τ_0), akışkan kütlesini etkileyen yerçekimi kuvvetinin kanal eksenine paralel bileşenine eşit olmasını gerektirir. Bu 2.1 eşitliğinde gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Üniform bir kanalın birim boyunda etkili kuvvetler. (Bayazıt, 1971)

$$G \times \sin \alpha = \tau_0 \times B \times P \quad (2.1)$$

Bu eşitlik ara işlemlerle şu hale gelir;

$$\gamma \times B \times A \times \sin \alpha = \tau_0 \times B \times P \quad , \quad R = \frac{A}{P} \quad , \quad \tau_0 = \gamma \times R \times J \quad (2.2)$$

Eğer tedirgin edici kuvvetler (sürüklenme, kaldırma kuvveti gibi) ağırlık ve kohezyon gibi stabilite kuvvetlerinden büyükse tabandaki tanenin dengesi bozulur. Yapılan deneylerden kayma gerilmesinin 0’dan başlayarak artırıldığında belli bir değerden itibaren tanelerin taban üzerinde hareket etmeye başladıkları gözlenmiştir. Bu durumda bazı tanelerin kayarak veya yuvarlanarak hareket ettikleri görülür. Bu hareket şekline “Sürüntü Hareketi” denir. Taban kayma gerilmesinin daha da artması halinde, sürüntü hareketi yapan tanelerden bir kısmı

tabandan ayrılarak akıma karışacak, kısa bir süre akımla birlikte hareket ettikten sonra tekrar tabana dönecektir. Bu şekilde “sıçrama” hareketi başlamış olacaktır. Bunun nedeni, tane yakınındaki basıncın değişmesi veya bir başka tanenin çarpması olabilir. Akım hızının daha da artırılması halinde, tanelerin hareketi şiddetlenir. Tabandan türbülans çevrileri vasıtasıyla ayrılan bazı taneler uzak noktalara taşınırlar. Askı halinde hareket eden bu tanelerin hareket şekline ise “Askı Hareketi” denir. Bu hareket tanelerin çökme hızlarının, akımın türbülans hızının düşey bileşeni tarafından yenilmesiyle olur (Bayazıt, 1971).

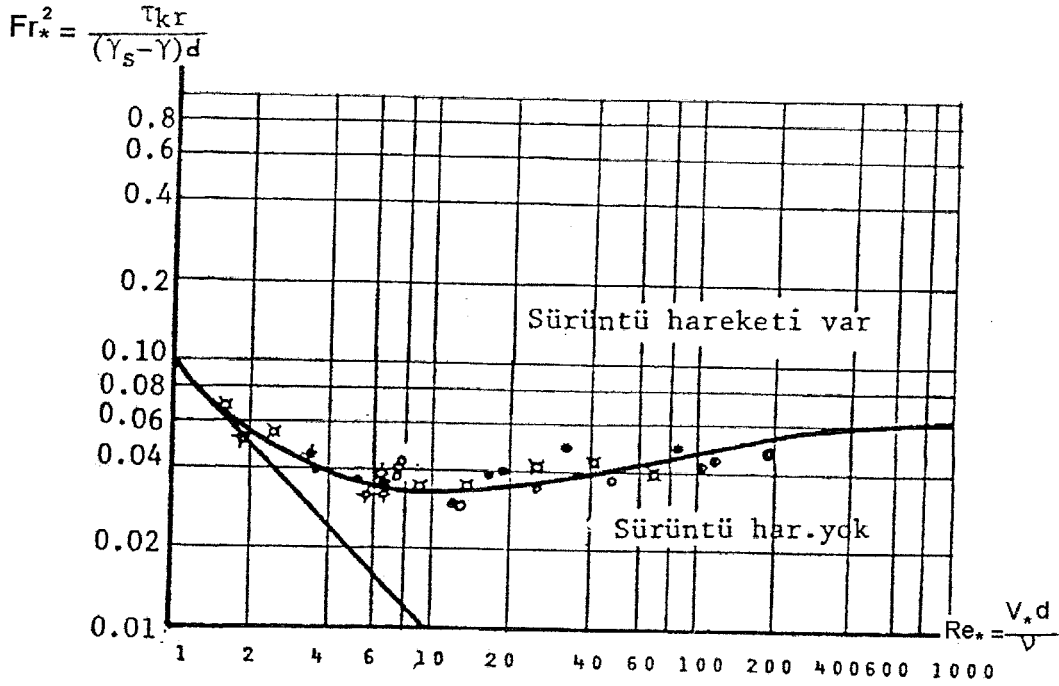
2.2 Sürüklenme Hareketinin Başlaması

Taban kayma gerilmesinin (τ_0) kritik kayma gerilmesinden (τ_{kr}) daha büyük olduğu değerlerde tabanda hareket başlar.

Bu kavramı ilk defa Shields (1936) kullanmıştır. Kayma gerilmelerine sadece düzen bozucu kuvvetlerin neden olduğu kabulünden hareketle, yaptığı deneysel çalışmalardan şu sonuçlar çıkarılmıştır.

- 1) Taban kayma gerilmesi, yalnızca verilmiş bir sıvıdaki verilmiş bir malzeme tipi için, sürüklenme başlangıcı tane Reynolds sayısına bağlıdır. ($Re_* = \frac{V_* \times d}{\nu}$)
- 2) Malzemenin sürüklenme başlangıcındaki kritik kayma gerilmesi, tane çapıyla, üniform geometrik malzeme için, su altındaki birim hacim ağırlığı ($\gamma_s - \gamma$) ile orantılıdır. ($\gamma_s - \gamma$) değerleri 0,3 - 3,3 arasında geçerlidir.

Shields’in bu sonuçlardan hareketle çizdiği, tane Froude sayısının, tane Reynolds sayısına göre değişimini gösteren eğri Şekil 2.2’de verilmiştir. Tabanda hareket, eğrinin üzerinde kalan bölgede var, altında kalan bölgede ise yoktur. Eğri üzerinde laminer, geçiş ve türbülanslı olmak üzere üç bölge söz konusudur.



Şekil 2.2 Shields diyagramı (Shields, 1936)

Ancak Shields diyagramına iki yönden itiraz gelmiştir;

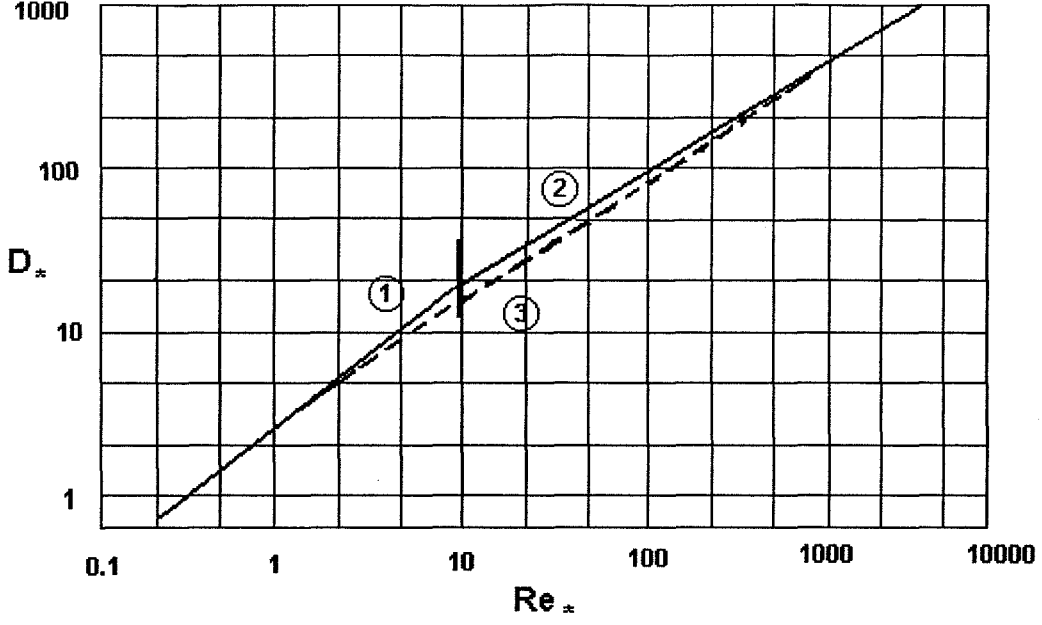
- 1) Fr_* ve Re_* sayılarında bulunan kayma hızı (V_*), bilinmemektedir. V_* 'ın deneme yanılma yoluyla bulunması pratik değildir.
- 2) Shields bu diyagramı elde ederken türbülansı dikkate almamış, sadece düzen bozucu kuvvetleri dikkate almıştır. Fakat tabiattaki akarsuların hemen hepsinde belli miktarda türbülans vardır. Türbülansın akım alanına ve buna bağlı olarak da taban malzemesi üzerine etkileri dikkate alınmamıştır.

Shields diyagramına yapılan bu itirazlardan birincisi Bonnefille (1963) tarafından şöyle giderilmiştir;

$\frac{Fr_*^2}{(Re_*)^2}$ oranından elde edilen “boyutsuz malzeme çapı” olan :

$$D_* = \left[\frac{(\gamma_s - \gamma)}{\rho \times \nu^2} \right]^{1/3} \times d \quad (2.3)$$

ile, Re_* arasında bağıntı kurularak, Shields diyagramı yeniden çizilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Bonnefille'in verdiği diyagram (Bonnefille, 1963)

Şekil 2.3'deki eğrilerin denklemleri;

$$1 \text{ için ; } D_* = 2,5(Re_*)^{4/5} \quad (2.4)$$

$$2 \text{ için ; } D_* = 3,7(Re_*)^{5/8} \quad (2.5)$$

$$3 \text{ için ; } D_* = 2,7 (Re_*)^{2/3} \quad (2.6)$$

olarak sunulmuştur.

Kritik taban kayma gerilmesinin bulunmasında, Shields eğrisi bugün en çok uygulanan bir kriter olmakla birlikte, en büyük eksikliği, türbülans çalkantılarından dolayı akım alanında, dolayısıyla taban malzemesi üzerinde meydana gelebilecek etkileri kapsamamış olmasıdır.

Çeşitli araştırmacılara göre, türbülanslı akımdan sürüklenme başlangıcını veren kritik hız denklemleri aşağıda verilmiştir.

GONCHAROV (1964):

$$V_{kr} = \sqrt{\frac{2 \rho \gamma_s^* d}{\alpha} \log \frac{8,8h}{d}} \quad (2.7)$$

h: Kanaldaki su derinliği

γ_s^* : Bağlı özgül ağırlık

α : 1,75 (tanelerin ortalama hız değerinde harekete geçmesi hali için)

α : 3,5 (tabanda türbülans hızının en büyük değerinde bile hiç hareket olmaması hali için)

HANCU (1971):

$$V_{kr} = a.(gd \frac{\rho_s - \rho}{\rho})^{1/2} . (\frac{h}{d})^{0,2} \quad (2.8)$$

$d_{90} > 0,7$ ise $a=1$

$d_{90} < 0,7$ ise $a=1,2$ ve $1,4$

2.3 Akarsuda Katı Madde Taşınımı ve Taban Şekilleri

Akarsuda katı madde taşınımı, kaynağına göre taban ve yüzey erozyonu olmak üzere ikiye ayrılır. Taban erozyonu iri tanelerin akarsu yataklarından sökülmesidir. Hareket, taban ve akım şartlarına bağlıdır. Taban erozyonu sürüntü ve askı malzemesinin ana kaynağıdır. Yüzey erozyonu ise ince tanelerin yeryüzünden sökülmesidir. Akarsu tabanında hareket eden katı madde içinde çok az yüzde ile bulunur. Bu malzeme kendisini besleyen havzadan akarsuya ulaşır. Genellikle çok ince malzeme olduğu için askı malzemesine kaynak teşkil eder.

Tanelerin harekete geçmesiyle taban yakınındaki akım hızı ve özellikle türbülans karakteristikleri önemli miktarda değişime uğrar. Bunun sonucu olarak da taban kayma gerilmelerinin oranı değişir. Bu değişme oranı, hareket eden tanelerin yüzdesi arttıkça önem kazanır. Akım hızının biraz daha artmasıyla, taban şekli düzlem kalmaz, belirli şekiller oluşur. Bunlara taban şekilleri denir.

2.4 Katı Madde Taşınımında Denge

Hareketli tabanlı bir akarsu taşıdığı debi ve katı madde miktarına uygun bir denge durumundadır. Böyle bir akarsuyun tabanı hareketli olmakla birlikte taban seviyesinde hiçbir değişim meydana gelmez. Gelen malzeme miktarında meydana gelen değişimler akarsuyun tabanında kısa süreli değişmelere neden olsa bile sonuçta gelen malzeme miktarı ile taşıma kapasitesinin eşit olacağı bir denge oluşur. Buna dinamik denge adı verilir.

Dinamik denge halinin en büyük özelliği katı madde hareketinin kararlı karakterde oluşudur. Ancak oyulma ve yığılma için artık kararlı bir karakterden söz edilemez. Zamanla değişim söz konusudur.

2.5 Dinamik Dengenin Bozulması

Kararlı karakterde katı madde hareketi olan akımın önüne bir engel yerleştirecek olursak, akım karakteristiklerinde önemli değişiklikler olur. Diğer taraftan katı madde hareketi, taban yakınlarındaki akım karakteristiklerinin bir fonksiyonu olduğundan, katı madde taşınımındaki dinamik denge bozulacaktır. Dolayısıyla bu bozulma, oyulma ve ardından yığılma şeklinde kendini gösterecektir. Çünkü bu engel, akım hızının yerel olarak büyümesi nedeniyle akımın katı madde taşıma kapasitesinin artmasına neden olmuştur.

Oyulma çukurunun sınır geometrisinin zamanla değişimi, akım alanını ve yersel akım hızını değiştirir. Akımdaki bu değişiklikler sürüntü yükünü de değiştirir. Oyulma devam ettikçe hız azalacağı için taşıma kapasitesi de azalacak ve nihayet membadan gelen katı maddeye eşit olacak ve oyulma duracaktır. Bu bir sınır durumudur. Engel konulmadan önceki dinamik denge durumundan farklı karakterde, zamanla değişmeyen bir denge durumu oluşacaktır. Buna “statik denge” denir.

Engelin sürüntü hareketi üzerine etkisi, sadece akımın karakteristiklerini değiştirmek değildir. Oluşturduğu vorteks sistemler ve türbülans nedeniyle oyulma olayı üzerinde etkili olur. Bu vorteksler daha önce belirttiğimiz gibi üç türdür. Bunların oluşturduğu çevrintili akımın hızlarından doğan oyulma potansiyeli, tanelerin harekete karşı direncini yenecek şiddette ise, engel yakınlarında oyulma başlar.

Oyulma çukuru derinleştikçe sınırında malzemeler çukura doğru kayar. Bunun nedeni, vorteks sistemin dengede olmayışıdır. Böylece oyulma çukuru genişler. Vorteksin taban malzemesini taşıyacak veya askıda tutacak şiddeti kalmadığı zaman oyulma son bulur.

Oyulma olayının kantitatif değerlendirmesi, Laursen (1963) tarafından şöyle yapılmıştır ;

Dinamik denge durumunda yerel bir değişiklik olması halinde, tabanda bir değişim meydana gelecektir. Bu değişim matematiksel olarak şöyle verilebilir;

$$\frac{dv}{dt} = q_{T(B)} - q_{T(S)} \quad (2.9)$$

2.9 bağıntısında,

v = Tabanın geometrisi,

$q_{T(B)}$ = Tabanın geometrisine bağlı olarak taşıma kapasitesi,

$q_{T(S)}$ = Yine o kesite membadan gelen katı madde miktarı,

olarak verilmektedir.

$q_{T(B)} = q_{T(S)}$ ise, oyulma yok. Bu durumda $\frac{dv}{dt} = 0$ olacaktır. Yani

dinamik denge hali söz konusudur.

$q_{T(B)} > q_{T(S)} = 0$ ise, yataktaki katı madde sürüntü hareketi yokken oyulma var (temiz su oyulması). Bunun nedeni, engelden dolayı oluşan vorteks sistem ve türbülans olayıdır.

$q_{T(B)} > q_{T(S)} > 0$ ise, daimi sürüntü maddesi hareketi halinde oyulma var. Yani hem sürüntü hareketi, hem de oyulma var.

$q_{T(B)} < q_{T(S)}$ ise, yerel yığılma vardır.

Köprü ayakları için yapılan deneylerde yaklaşım hızının oyulma olayına etkisi tüm araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir. Oyulma belli bir hız değerinde başlamakta ve büyümektedir. Oyulmaya sebep olan hız değeri şu şekilde sınıflandırılmıştır (Hancu, 1971, Nicollet, 1971).

- 1) $V_0/V_{kr} \leq 0,5$ ise oyulma yoktur.
- 2) $0,5 \leq V_0/V_{kr} \leq 1,0$ ise temiz su oyulması söz konusudur ve bu bölgede oyulma V_0/V_{kr} ile hemen hemen lineer olarak artmaktadır.
- 3) $V_0/V_{kr} \geq 1,0$ ise daimi sürüntü maddesi taşınımı oyulması (hareketli taban oyulması) söz konusudur. Bu bölgede oyulma hız ile artmaz, çünkü oyulma çukurundan çıkan malzeme ile membadan taşınan malzeme arasındaki dinamik denge sediment debisinin şiddetinden etkilenmez.

3. BORU HATLARI ETRAFINDAKİ OYULMA MEKANİZMASI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1 Kararlı Akım Etkisindeki Boru Hatları Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmalarla İlgili Araştırmalar

Chao ve Hennessy (1972):

Chao ve Hennessy (1972), yalnız akım halinde denizaltı boru hatları etrafındaki maksimum oyulma derinliklerinin değerlendirmesini yapmıştır. Çalışmaları şu adımlardan oluşmaktadır:

- 1) Gelen akımın, oyulma çukurundan geçerken sahip olduğu jet hızının hesaplanması.
- 2) Oyulma çukurundaki jet hızı, boru ile taban arasındaki açıklıktaki taban katı madde kayma gerilmesi kritik kayma gerilmesine eşit oluncaya kadar oyulmayı devam ettirmektedir. Oyulma çukuru genişledikçe, jet hızı da azalır. Oyulma derinliğinin hesaplamalar vasıtasıyla bulunabilmesi için oyulmanın temiz su şartlarında gerçekleşmesi, dolayısıyla oyulma çukuruna katı madde taşınımı olmaması gerekmektedir. Katı madde taşınımının söz konusu olduğu durumlarda ve dinamik denge halinde, membadan taşınarak oyulma çukuruna akan katı madde miktarı ile çukurdan çıkan katı madde miktarı eşittir.

Yazarlar, iki boyutlu potansiyel akım teorisinden yola çıkarak, q_{bot} , oyulma çukuru birim genişliğinden geçen debi ve V_{avg} , ortalama jet hızı olmak üzere;

$$q_{bot} = V_0 [H_m - R^2 / (2H_m - R)] \quad H_m \geq R \text{ için} \quad (3.1)$$

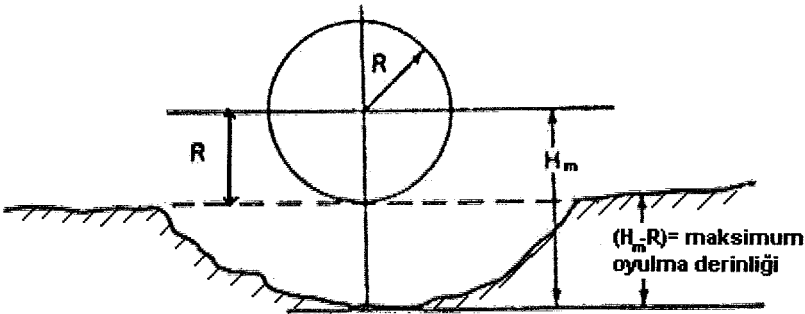
$$V_{avg} = q_{bot} / (H_m - R) = V_0 [(2(H_m/R)^2 - (H_m/R) - 1) / (2(H_m/R)^2 - 3(H_m/R) + 1)] \quad H_m \geq R \text{ için} \quad (3.2)$$

ifadelerini vermiştir. Burada,

V_0 =borunun üzerindeki rahatsız edilmemiş akım hızı;

R =boru yarıçapı;

H_m =boru merkezinden itibaren ölçülen oyulma derinliğidir.



Şekil 3.1 Chao ve Hennessy (1972) tarafından verilmiş değişkenler (Chao ve Hennessy, 1972)

Şekil 3.1, 3.1 ve 3.2 no'lu denklemlerde kullanılan değişkenleri göstermektedir. Bu metodun kullanılmasındaki asıl sakınca, çözüme ulaşma yolunda potansiyel akım teorisinden faydalanmasıdır. Gerçek akışkanlarda, akım ideal değildir ve borunun mansabında sınır tabakasından ayrılma gerçekleşir. Bu akım alanını etkilemektedir. Önerilen bu hesaplama yöntemi oyulma çukurundaki debi ve jet hızı için büyük değerler vermektedir. Aynı zamanda bu yöntem oyulma çukurundaki taban malzemesi için kritik kayma gerilmesi hesabını gerektirmektedir. Ancak araştırmacılar kritik kayma gerilmesinin nasıl hesaplandığı hakkında bilgi vermemişlerdir.

Kjeldsen et al. (1973):

Kjeldsen et al. (1973), deniz altındaki zemine yerleştirilmiş ve tek yönlü akıma maruz boru hatları etrafındaki yerel oyulmayı araştırmışlardır. Deneylerin sınır şartları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Araştırmacılar tarafından yapılan deneylerin sınır şartları (Chiew, 1991)

Kaynak	Su derinliği (m)	Hız (m/s)	Tane çapı (mm)	Boru çapı (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Kjeldsen et al. (1973)	0.43, 1.43	0.20-0.52	0.074	60, 110, 225, 500
İbrahim ve Nalluri (1986)	0.032-0.30	0.19-0.48	0.425, 0.8, 1.5	25, 50, 75

Oyulma derinliği ile ilgili olarak;

S: Boru tabanından itibaren oyulma derinliği;

$V_0^2/2g$: Hız yükü;

D: Boru çapı olmak üzere:

$$S=0,972(V_0^2/2g)^{0,2}D^{0,8} \quad (3.3)$$

ampirik eşitliğini önermişlerdir. 3.3 denklemi, borunun başlangıçta zemine oturtulduğu deney şartları için önerilmiştir. Bu denklem, oyulma derinliğinin, sadece akım hızına ve boru çapına

bağlı olarak değişmekte olduğunu, bunun yanında akım derinliği ve taban malzemesi çapının olaya etkisinin olmadığını kabul eder. Akım hızı ve tane çapı dikkate alınarak Shields parametresi hesaplandığında deney şartlarının hareketli taban durumu için olduğu görülmektedir. Bu durumda katı madde taşınımı olduğundan, oyulma çukurunun memba tarafından sürekli olarak katı madde ile beslendiğini ortaya koymaktadır.

Bijker ve Leeuwestein (1984):

Bijker ve Leeuwestein (1984), deniz tabanına yerleştirilmiş bir boru hattının, hız profilinin tabana yakın bölümünün etkisinde kaldığı akım alanını bozarak taban malzemesinin erozyonuna ve yığılmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar kararlı akım şartlarında çalışmışlardır.

Hareketli tabana yerleştirilmiş, tek yönlü akıma maruz bir boru hattı çevresinde erozyon veya yığılmanın üç farklı bölgede gerçekleştiği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir:

- 1) Borunun membaındaki vortekslerden kaynaklanan ve yine boru membaında gerçekleşen oyulma ya da yığılma,
- 2) Ana akımın boruyu geçtikten sonra tabana ulaşmasıyla ve borunun mansabında art-iz bölgesindeki türbülanslı akım yapısı nedeniyle, mansab tarafında gerçekleşen oyulma ya da yığılma,
- 3) Boru altında artan akım hızı nedeniyle meydana gelen oyulma bölgesi (tünel erozyonu) olarak tanımlamışlardır.

Araştırmacılar, boru etrafındaki erozyonun ana sebebi olarak, borunun etrafındaki akımın taşıma kapasitesindeki yerel artışı göstermişlerdir. Taşıma kapasitesindeki azalmaya bağlı olarak yığılma olayı görülür.

Bijker ve Leeuwestein (1984); Kjeldsen et al. (1973); İbrahim ve Nalluri (1985) isimli araştırmacılar, yaptıkları kapsamlı araştırmalar sonucu, denizaltı boru hatları etrafında gerçekleşen oyulma derinliklerinin belirlenebilmesi için ampirik eşitlikler vermişler ve bu eşitliklerde hız, boru çapı, taban malzemesi çapı, akım derinliği gibi parametreleri göz önüne almışlardır. Bu deneysel çalışmaların çoğu borunun, zemin üzerine oturtulması ile gerçekleştirilmiştir. Ancak, Bijker ve Leeuwestein (1984), kısmen gömülü borular üzerinde de bir takım araştırmalar yapmışlar ve gömme derinliği ile boru çapının oranı olan e/D 'nin artışı ile oyulma derinliğinin azaldığını belirtmişlerdir. e/D oranı 0,5-0,7 seviyesine ulaştığında ise boru altında, oyulma olmadığını belirtmişlerdir. Ancak, araştırmacılar bu deneyleri hangi akım şartlarında gerçekleştirdiklerini ifade etmemişlerdir.

Delft Teknik Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar:

Delft Teknik Üniversitesi'nde denizaltı boru hatları etrafındaki oyulmaların hesaplanmasında kullanılmak üzere bir metot üzerinde durulmuş ve oyulma olayının mekaniği anlaşılmaya çalışılmıştır. Boru etrafındaki akımın uğradığı değişiklik ve buna karşılık taban malzemesinin vermiş olduğu tepki incelenmiştir.

Hollandalı bir araştırma grubu (Hulsbergen, 1984, Leeuwestein et al., 1985), denizaltı boru hatları etrafındaki oyulma derinliklerinin hesaplanabilmesi amacıyla Kjeldsen et al. tarafından gerçekleştirilmiş bir model testi serilerinin sonuçlarını kullanarak, farklı bir ampirik eşitlik öne sürmüşlerdir. (Bu model testin sınır şartları, Bijker ve Leeuwestein'da (1984) bulunabilir.)

$$S = 0,929(V_0^2/2g)^{0,26} \times D^{0,78} \times d_{50}^{-0,04} \quad (3.4)$$

Hollandalı bu çalışma grubunun vermiş olduğu eşitlikte, Kjeldsen'in vermiş olduğu eşitliğin tersine, taban malzemesi çapının, oyulma olayına etkisi olduğu görülmektedir. Araştırmacılar, prototip oyulma derinliğinin tahmininde kullanılmak üzere bir ölçek serisi vasıtasıyla, daha büyük boru çapları ve akım hızları için meydana gelebilecek oyulma derinliklerinin tahmin edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Ayrıca, tek yönlü akım şartları altındaki oyulma derinliklerinin daima basit dalga hareketi şartlarındakinden ya da aynı taban kayma gerilmelerine sahip dalga ve akımların birleştirilmiş etkilerinden büyük olduğu belirtilmiştir.

Hansen et al. (1986):

Hansen et al. (1986), oyulma çukurundaki yatak hızı ile iki geometrik büyüklük arasında bir ilişki tespit etmişlerdir. Bu büyüklükler; e, boru altı ile orijinal zemin seviyesi arasındaki açıklık, S, rölatif denge oyulma derinliği, D, boru çapı olmak üzere; e/D ve S/D'dir. Bunun yanında, akım genişliğinin de bu ilişkiye etki edebileceği belirtilmiştir. Sabit bir e/D değeri için, V_{avg}/V_0 (V_{avg} , oyulma çukurundaki ortalama hız), oyulma derinliklerinin artmasına bağlı olarak azalırken, sabit bir oyulma derinliği için, e/D'nin azalması ile V_{avg}/V_0 artmaktadır. Çalışmada kullanılan matematik model, taban malzemesi taşınımının kritik kayma gerilmesinin, hesaplanarak bulunmuş yatak kayma gerilmesine eşit olduğu durumlarda ulaşılan denge oyulma çukurunu ve yukarıdaki ampirik ilişkiyi temel alır. Modelde, Meyer-Peter ve Müller'in (1948) vermiş oldukları taban malzemesi taşınımı formülü kullanılmıştır.

İbrahim ve Nalluri (1986):

İbrahim ve Nalluri (1986) ise sadece tek yönlü akım şartlarında, deniz altı boru hatları etrafındaki yerel oyulmayla ilgili çalışmalar yapmışlar ve yapılan kapsamlı bir deneysel çalışma neticesinde iki ampirik eşitlik önermişleridir. Çizelge 3.1’de, tek yönlü akım etkisi altında yapılan bu deneylerle ilgili sınır şartları verilmiştir. Bu iki eşitlik şöyledir:

Temiz su durumu için ($V_0/V_{kr} < 1$);

$$S/D = 4,706(V_0/V_{kr})^{0,89}(V_0/(gy_n)^{0,5})^{1,43} + 0,06 \quad (3.5)$$

Hareketli taban durumu için ($V_0/V_{kr} > 1$);

$$S/D = 0,084(V_0/V_{kr})^{-0,3}(V_0/(gy_n)^{0,5})^{-0,16} + 1,33 \quad (3.6)$$

Burada:

V_0 =Ortalama akım hızı;

V_{kr} =Taban malzemesi hareketi için kritik hız;

g =Yerçekimi ivmesi;

y_n =Akım derinliğidir.

Araştırmacılar, 3.5 ve 3.6 denklemlerinde, Kjeldsen’in vermiş olduğu 3.3 denklemindeki gibi, oyulma derinliğinin akım hızı ve boru çapı gibi parametrelere bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Buna ek olarak analizlerine, akım derinliğinin etkisini de dahil etmişlerdir. Denklem 3.5’de, oyulma derinliği, akım hızıyla doğru orantılı, akım derinliği ile ters orantılı olarak değişirken, Denklem 3.6’da bu tam tersidir. Ortaya çıkan bu çelişkinin nedeni, bu denklemlerin tamamıyla eğri uygunluk denklemiyle türetilmesi ve oyulma olayının fiziksel açıklamasına yeterince önem verilmemesidir. Ayrıca 3.6 denklemindeki 1,33 sabiti, çok büyük olduğundan, akım hızı ve yüksekliğinin oyulmaya etkisi gölgede kalmıştır. Akım hızının sıfır olması halinde oyulma derinliğinin 1,33 olduğu görülmektedir. Araştırmacıların vermiş olduğu bu denklemlere bakıldığında, taban malzemesi çapının, kritik hıza dolaylı etkisi bir yana bırakıldığında, oyulma olayına etkisi olmadığı görülür.

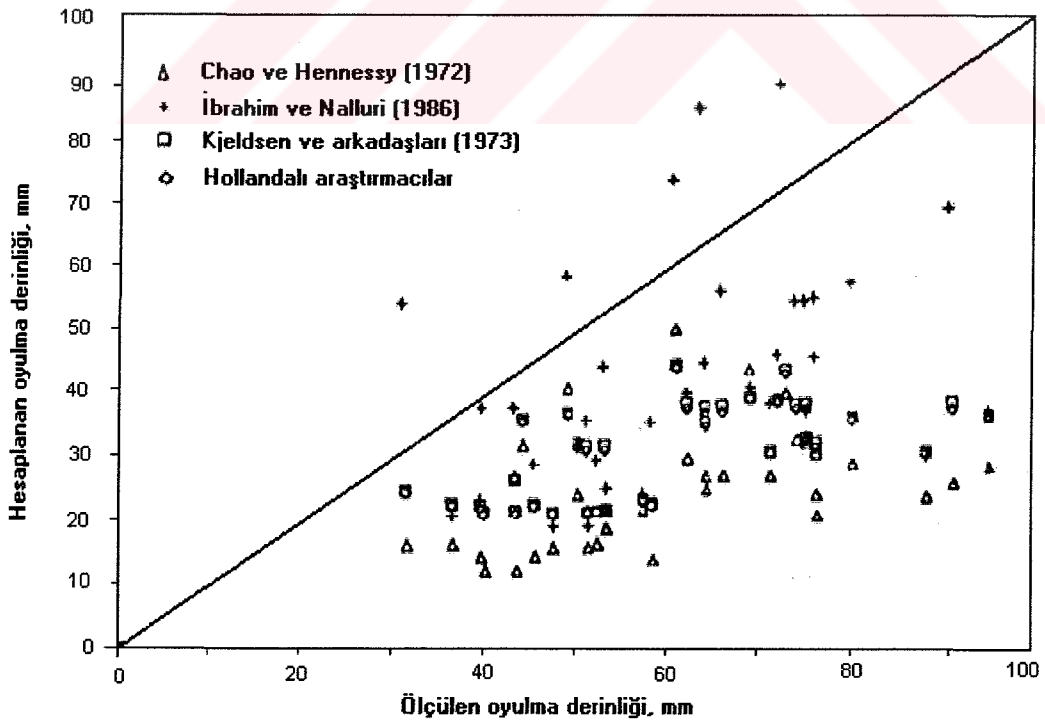
Temiz su oyulması şartlarında yapılan deneylerden elde edilen veriler ile 3.5 denklemi kullanılarak hesaplanan veriler karşılaştırıldığında, hesaplanan verilerin deney sonuçlarından küçük kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.2). Bunun nedeni İbrahim ve Nalluri’nin (1986) vermiş olduğu denklemlerin, 3-4 saatlik bekleme süresi sonucunda ulaşılan temiz su oyulma

derinlikleri göz önüne alınarak elde edilmiş olmasıdır. Oysa temiz su oyulmalarında denge durumuna erişilebilmesi için deneylerin 2-3 gün sürmesi gerekmektedir. Bu nedenle sadece İbrahim ve Nalluri'nin (1986) verileri denklem sonuçlarıyla uyum göstermiştir.

Araştırmacılar, boru hattı altındaki oyulmaya genellikle akıntı, sırf dalga, dalga ve akıntının birleşik etkisinin neden olduğunu belirterek bu çevresel faktörün katı madde dinamik dengesini bozacak şekilde önemli miktarda bir sürüklenmeye neden olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sonucu olarak da katı maddenin oyulma veya yığılması meydana gelmektedir.

Chiew ve Melville (1987):

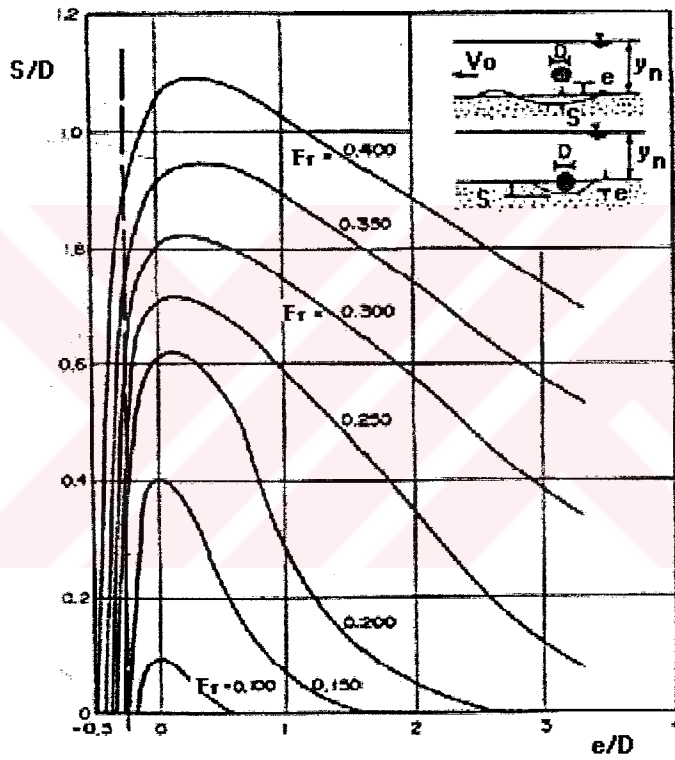
Chiew ve Melville (1987), hareketli taban şartlarında köprü ayakları etrafındaki yerel oyulmalar ile ilgili çalışmaları esnasında, temiz su oyulması şartlarında meydana gelen denge oyulma derinliklerinin, hareketli taban şartlarında meydana gelen denge oyulma derinliklerine nazaran, daha güvenilir olduklarını göstermişlerdir. Buna sebep olarak da, hareketli taban şartlarında meydana gelen taban malzemesi taşınımı nedeniyle, oyulma çukurunun oluşum süreci içerisinde, oyulma çukurunu membadan taşınarak gelen taban malzemesinin doldurarak, olması gerekenden daha küçük bir oyulma derinliği elde edilmesini göstermişlerdir.



Şekil 3.2 Ölçülen ve tahmin edilen oyulma derinliklerinin karşılaştırılması (Chiew – Melville, 1987)

Maza (1987):

Maza (1987), boru hatları altındaki oyulmanın, boru ve düzgün (bozulmamış) taban arasındaki boyutsuz açıklık ve akımın Froude sayısının fonksiyonu olabileceğini göstermiştir. Maza'ya göre (1987), deneylerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak hazırlanmış Şekil 3.3'deki eğrilere bakılarak oyulma derinliği tahmin edilebilir. Şekil 3.3'de, e = bozulmamış taban ile boru arasındaki açıklık (pozitif de olabilir, negatif de), $Fr=V_0/(g.y_n)^{1/2}$, y_n =normal derinlik, S =borunun altında, orijinal dip seviyeden itibaren ölçülen debi oyulma derinliği, V_0 =akımın ortalama hızı olmak üzere , boyutsuz parametreler e/D , Fr ve S/D 'dir ve D =boru çapını göstermektedir.



Şekil 3.3 e/D ve Froude sayısının fonksiyonu olarak boru hatları altındaki yerel oyulmaların değişimi (Maza, 1987)

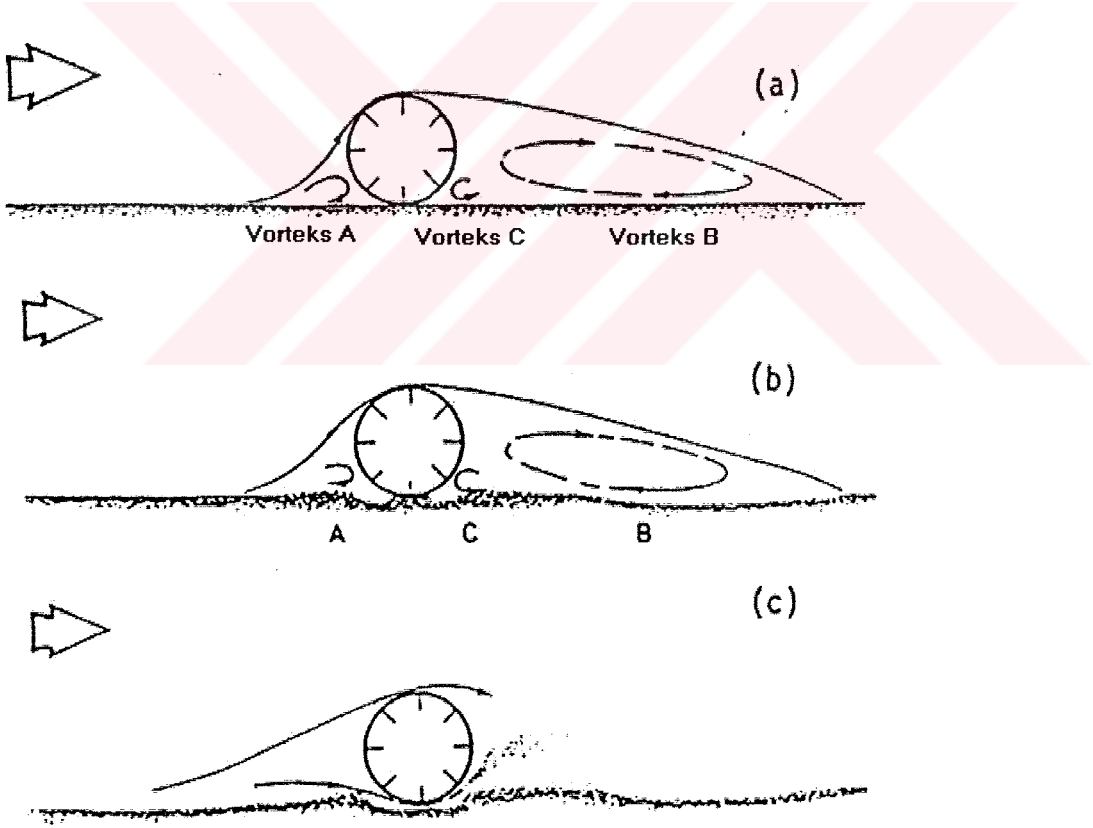
Şekil 3.3'de görülen eğriler, boru hattı altındaki maksimum oyulmanın, verilen e/D ve Fr değerlerinin bir fonksiyonu olarak bulunmasını sağlar. Maza'ya göre (1987) boru hattı altındaki oyulma, boruyu, akım tarafından çevrelenemeyeceği ya da erozyona maruz olmayan bir derinliğe yerleştirerek önlenabilir.

Boru hattı tarafından blokaj etkisine maruz kalmış bir akım kesitinde, yerel Froude sayıları, yaklaşan akımın ortalama Froude sayısından farklılık gösterebilir. Yine de, deforme olmuş

yatak ile akım arasındaki etkileşimin değişimini, düzgün taban Froude sayısı temsil edebilir. Boru hattı altındaki oyulma, boru altındaki basınç dağılımlarına bağlı olarak gelişen duran dalga formasyonları nedeniyle yerçekimi etkilerine de bağlıdır.

Mao (1988):

Mao (1988), zemine oturtulmuş denizaltı boru hatları etrafında üç tip vorteksin gerçekleştiğini belirtmiştir. Şekil 3.4 (a)'da görüldüğü gibi, A vorteksi borunun burnunda, B ve C vorteksleri, borunun mansabında oluşur. Borunun memba ve mansap kısımları arasındaki basınç farkından dolayı boru altında yeraltı suyu akımı oluşur. Mao'ya (1988) göre, yeraltı suyu akımı, doğrudan taban malzemesinin hareketine sebep olmasa da, tanelerin hareket etme kabiliyetlerini artırarak, tabandaki stabilitenin bozulmasına etki yapmaktadır. Böylece, yeraltı suyu akımı ve vortekslerin etkisiyle açılmaya başlayan boru altı, zamanla daha fazla taban malzemesinin taşınmasıyla, büyük bir oyulma çukuruna dönüşür. Şekil 3.4 (c)'de oyulma sürecinin başlangıcı açıkça görülmektedir.



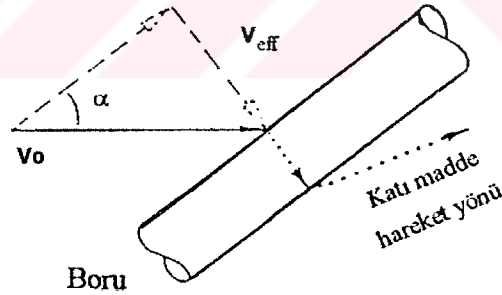
Şekil 3.4 Oyulma başlangıcı ve üç vorteks sistemi (Mao, 1988)

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi boru hattı etrafında oluşan A ve C vorteksleri birbirlerine ters yönde ve borudan uzaklaşan doğrultuda taban malzemesini taşımaktadırlar. Diğer taraftan, B

vorteksi taban malzemesini boruya doğru getirmektedir; ancak bu vorteksin etki alanının C vorteksi ile sınırlandırıldığı belirlenmiştir. Bu nedenle Mao'ya (1988) göre, Şekil 3.4'te görülen C tipi vorteksin, oyulmanın başlangıcına etkisi çok fazla değildir ve B tipi vorteksin gölgesinde kalır.

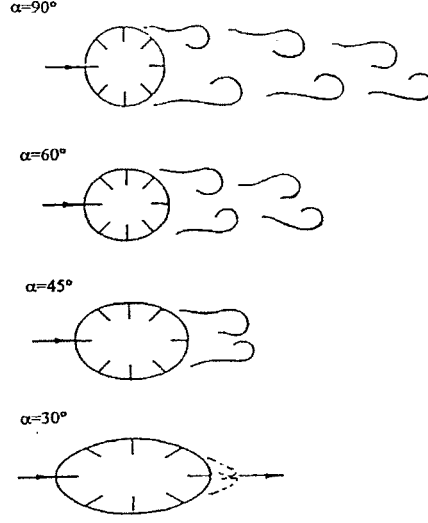
Araştırmacı oyulma olayının başlamasının rahatsız edilmemiş akım hızına bağlı olduğunu belirtmiştir. Akım hızının büyümesi durumunda vortekslerin şiddeti de artmakta, borunun her iki tarafındaki basınç farkı artarak oyulmanın başlaması kolaylaşmaktadır. Çok küçük rahatsız edilmemiş akım hızlarında yerel oyulma mekanizmasının tam olarak gelişmediği ve boru hattı altında oyulmanın başlamadığı belirtilmiştir.

Araştırmacı çalışmasının ikinci aşamasında atak açısının etkisini de incelemiştir. Atak açısının 30° 'den büyük olması durumunda oyulma çukurunun daha hızlı geliştiğini ve atak açısının artmasıyla oyulma çukuru boyutlarının da büyüdüğünü belirtmiştir. Oyulma çukurunun tabanı yakınında kum tanelerinin hareketini kontrol eden hızın boruya normal bileşeni olup bu hız efektif akım hızı olarak adlandırılmıştır ($V_{eff}=V_0\sin\alpha$, burada V_{eff} efektif hız, V_0 rahatsız edilmemiş akım hızıdır). Oyulma çukurunun serbest akım hızının bir fonksiyonu olduğu, böylece küçük efektif akım hızlarında daha sığ oyulma çukurlarının oluştuğu belirtilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Kum parçacıklarının efektif hızının hareket yönünün şematik izahı (Mao, 1988)

Borunun kesit alanı atak açısıyla değişmektedir, eğer yapı akım çizgilerine uyum sağlamayan bir kesite sahipse daha kuvvetli vorteks saçılımlarına neden olmakta ve oyulma çukuru büyümektedir (Şekil 3.6). Dolayısıyla, atak açısıyla yaklaşan akım boru hattını gördüğü izdüşüm kesitiyle değişmekte ve oyulma çukuru atak açısının küçülmesiyle küçülmektedir.

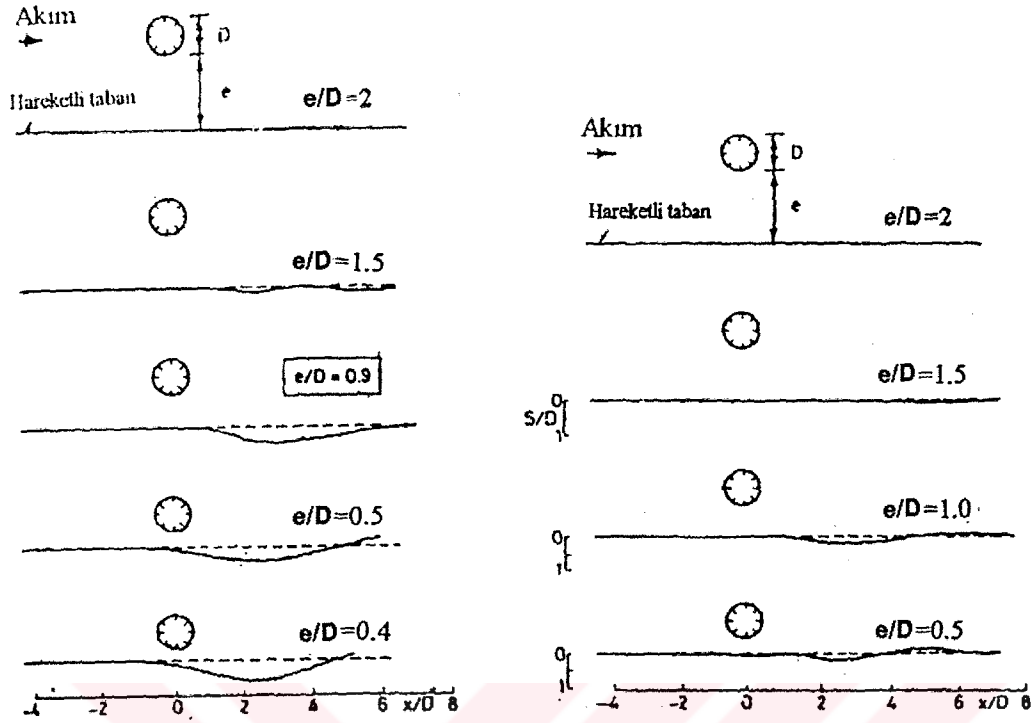


Şekil 3.6 Farklı atak açıları için art-iz oluşumu ve kesitin şematik izahı (Mao, 1988)

Sümer et al. (1988):

Sümer ve arkadaşları (1988) yapmış oldukları çalışmada kararlı akıma maruz boru hatları altındaki oyulma üzerine art-iz etkisini araştırmışlardır. Yapmış oldukları deneyler, borudan düzenli olarak saçılan ve mansap yönünde taşınan büyük ölçekli vortekslerin oluşturduğu organize art-iz akımının, borunun mansabında oyulma oluşturduğunu göstermiştir. Boru hattının gel-git akımı veya dalgaya maruz kalması halinde, borunun mansabındaki oyulma işleminin anlaşılabilmesi için öncelikle tek yönlü akım halinin incelenmesinin önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Araştırmacılar vorteks saçılımlarının oyulma olgusu üzerine etkisini araştırmak için kontrollü koşullar altında bir seri deney yapmışlardır. Bu deneylerde boru hattı, vorteks saçılımlarından başka etkileri minimuma indirmek için tabandan yeterince büyük açıklıkta yerleştirilmiş ve Shields parametresi de 0.018 gibi oldukça küçük bir değer seçilmiştir. Şekil 3.7 oyulmanın borunun tam altında değil biraz mansabında başlayıp geliştiğini gösterdiğinden, oyulmanın art-iz etkisi ile meydana geldiği belirtilmiştir.



Şekil 3.7 Oyulma profilleri ($t=400$ dk.), $\tau_*=0.018$, $D=100$ mm, $V_0=25$ cm/s (Sümer et al., 1988)

Taban boyunca vorteks saçılımlarının etkilediği bölge sonlu bir uzunluğa sahiptir. Yapılan deneyler sonucunda e/D oranının 0.6 olduğunda taban boyunca vortekslerin etkilediği bölgenin uzunluğu $x/D \approx 8$ 'dir. $e/D=0.2$ 'den küçük olduğunda vorteks saçılımlarının sönümlendiği bilinmektedir. Boru ile taban arasındaki mesafe azaldıkça vorteks saçılımlarının etkilediği bölgenin uzunluğunun azalmasından dolayı mansap oyulmasının akım doğrultusunda azaldığı belirtilmiştir.

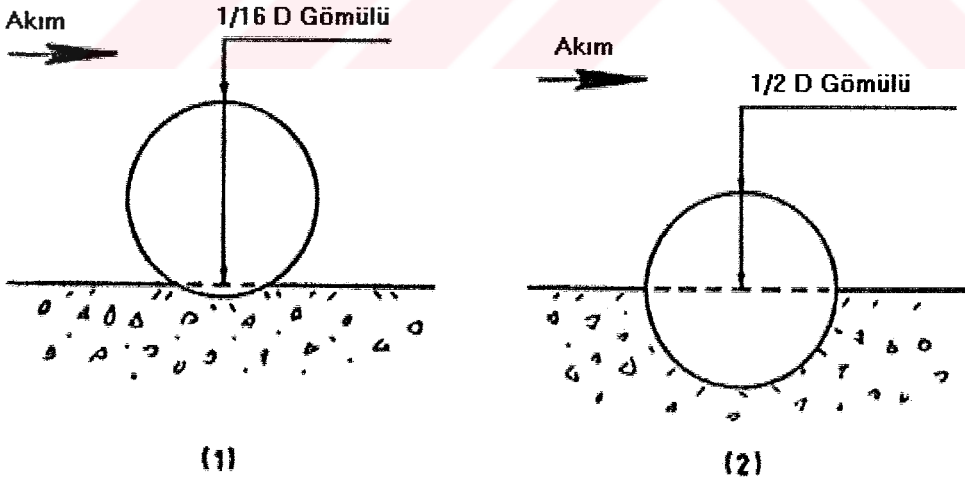
Bu çalışma Reynolds sayısının $1-2.5 \times 10^4$ değerleri arasında kritik altı rejiminde yürütülmüştür. Ancak Reynolds sayısının büyük değerlerinde, oyulma mekanizmasına hakim olan vorteks saçılımları muhafaza edildiğinden bu şekil değişmemektedir. Ayrıca prototipte borunun yüzeyi deniz canlıları ile kaplanarak $k_s/D > 3 \times 10^{-3}$ şartını sağladığında tamamen pürüzlü cidar gibi davrandığından bu durumda vorteks saçılımı üzerine Reynolds sayısının etkisinin kaybolduğu belirtilmiştir.

Chiew (1990):

Chiew (1990), hareketli tabandaki denizaltı boru hatları çevresinde meydana gelen yerel oyulmanın mekaniğinin anlaşılabilmesi için tek yönlü akım şartlarında detaylı bir deneysel

çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, tünel oyulmasının akım derinliğinin azalmasıyla eş zamanlı olarak başladığını belirtmiştir. Oyulmanın, borunun mansabında başladığı ve borulanmanın etkisiyle malzemenin boru altından fışkırma şeklinde mansap tarafına doğru hareketlendiği görülmüştür. Mansap çevrileri, borunun membaında bir düşük basınç alanı yaratır ve boru altında tünel şeklinde bir oyulma gerçekleşir. Tünelden taşınan taban malzemesinin oyulma çukurunun mansabında yaklaşık olarak boru çapının yarısı yüksekliğinde kum eşiği oluşturduğu ve zamanla bu kum eşiğinin mansaba doğru ilerlediği gözlenmiştir. Art-iz bölgesindeki türbülans ile borunun üzerinden geçen ana akımın birleşmesi sonucunda mansap erozyonunun baskın olmaya başladığı, böylece oyulma derinliğinin dinamik dengeye ulaşincaya kadar devam ettiği belirtilmiştir.

Araştırmacı, boru hattını $1/16 D$ ve $1/2 D$ ye kadar gömerek beş farklı akım derinliğinde, üç farklı boru çapı kullanarak deneylerini yürütmüştür. Şekil 3.8'deki 1 pozisyonunda yerleştirilen borular için, y_n/D değerinin 3,5'ten büyük değerlerinde tünel oyulması görülmeyeceği, eğer boru 2 pozisyonunda yerleştirilirse, hiçbir rölatif akım derinliğinde tünel oyulması gerçekleşmeyeceği belirtilmiştir. Her iki örnekte de oyulmanın meydana gelmediği hallerde, art-iz bölgesindeki ters akımın, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, taban malzemesini borunun mansap tarafını tamamen kapatıncaya kadar memba yönüne doğru taşıdığını ve tünel oyulmasının başlamasını engellediğini gözlemlemiştir.



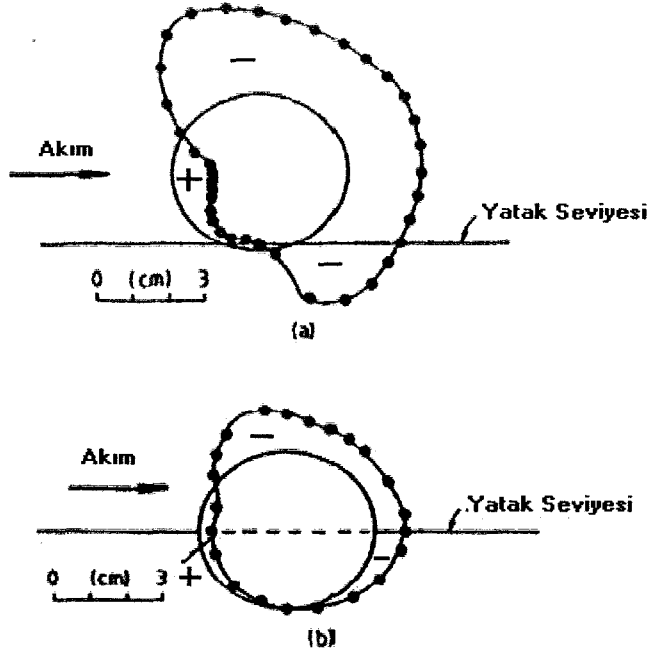
Şekil 3.8 Deneylerde uygulanan boru gömme boyutları (Chiew, 1990)



Şekil 3.9 Tünel oyulması gerçekleşmediğinde meydana gelen oyulma biçimi (Chiew, 1990)

Bir denizaltı boru hattında, membadaki durgunluk basıncı ve boru mansabının ayrılma bölgesindeki düşük basınç tarafından basınç gradyanı meydana gelir. Mansap basınç gradyanının, taban malzemesinin sahip olduğu boşluk suyu gradyanını aşması halinde, borulanma oluşur. Borunun mansabındaki katı madde bu hızlandırıcı şartla karşılaştığında kum tanelerinin ağırlıkları azalmakta ve bu taban malzemesi mansaba doğru taşınmaktadır. Erozyon olayı ilerleyen bir olgudur. Taban erozyona uğradıkça katı madde hareketi, basınç gradyanındaki artış miktarı ile azalmaktadır. Membada, Şekil 3.4 (a)'da verilen A tipi bir vorteks oluşur ve taban malzemesinin kolayca kazılmasına sebep olur. Sonuç olarak, borulanma ve vortekslerin etkileri birleşerek, boru altında tünel oyulmasına neden olurlar.

Chiew (1990) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, boru etrafındaki basınç gradyanının büyüklüğü ölçülmüştür. Bu değerler, boşluk suyu gradyanı ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma, hangi şartlarda oyulmanın gerçekleşip gerçekleşmediğini ortaya koymuştur. Şekil 3.10 ve Çizelge 3.2, silindir etrafında ölçülen basınç dağılımlarını ve mansap basınç gradyanını göstermektedir. Ayrıca Çizelge 3.2'de, memba ve mansap arasındaki basınç farkları değerlendirilerek hesaplanan ortalama basınç gradyanları da yer almaktadır. Sonuçlar a pozisyonundaki boru için, mansap basınç gradyanının, boşluk suyu gradyanını ($i_f = 0,9$) aştığını, b pozisyonundaki boru için ise aşmadığını göstermiştir. a pozisyonundaki boruda tünel oyulması gerçekleşmiş, b pozisyonundaki boruda gerçekleşmemiştir. Bu da bize, tünel oyulmasının başlangıcında borulanmanın etkin rol oynadığını göstermiştir.



Şekil 3.10 Boru hattı etrafındaki basınç dağılımları (Chiew, 1990)

Çizelge 3.2 a ve b pozisyonlarındaki borular için basınç gradyanlarının karşılaştırılması (Chiew, 1990)

Pozisyon (1)	Basınç Gradyanları		i_f (4)	Sonuçlar (5)
	Mansap (2)	Ortalama (3)		
1	12 mm/6.3 mm (1.91)	26 mm/24.3 mm (1.07)	0.9	Borulanma olur
2	3 mm/6.3 mm (0.48)	11 mm/75.4 mm (0.15)	0.9	Borulanma olmaz

Araştırmacı oyulmanın, y_n/D 'nin küçük değerlerinde gerçekleştiğini söylemiş ve oyulmanın, borunun mansap kısmında başladığını ifade etmiştir.

Kohezyonsuz zeminler için bu tip bir erozyonun, boşluk suyu gradyanını;

$$(i_f), i_f = (1-n)(\Delta-1) \quad (3.7)$$

bağıntısındaki değerin aşılmasıyla gerçekleştiği belirtilmiştir. Burada, n = porozite, Δ = rölatif yoğunluktur (Bowles, 1984).

Araştırmacı hangi basınç gradyanında, nasıl bir tünel oyulması olduğunu belirlemek amacıyla bir dizi deney yapmıştır. Sonuçlar, genellikle zemin mekaniğinde kullanılan boşluk suyu gradyanı formülünün (3.7 bağıntısı), denizaltı boru hatları etrafındaki oyulmalar söz konusu olduğunda da kullanılabileceğini göstermiştir. Çizelge 3.3, deneylerden elde edilen kritik basınç gradyanlarını göstermektedir. Bu tabloda, hesaplanarak bulunan boşluk suyu gradyanı ile kritik basınç gradyanları arasındaki yakınlık dikkat çekmektedir. Eğer bir kum tabakası içerisinde suyun yukarıya doğru akımı tabandaki katı maddenin ağırlığını yenecek kadar büyük yer altı suyu basıncı uygularsa, katı madde normalden daha hızlı harekete başlamaktadır. Hatta daha büyük bir akım katı maddeyi askı haline bile geçirebilir.

Chiew (1990)'in araştırması, borulanma ile tünel oyulması başlangıcı arasındaki ilişkinin önemini göstermiştir.

Çizelge 3.3 Ortalama basınç gradyanları (Chiew, 1990)

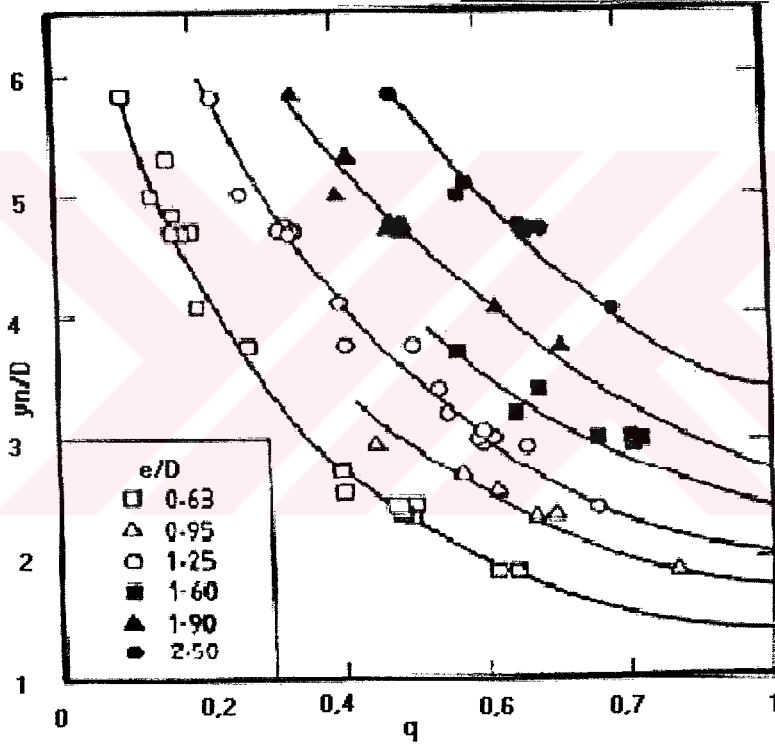
Borunun gömülme derinliği e (mm) (1)	Borunun açıkta kalan kısmının yüksekliği (mm) (2)	Boru sırtı ile su seviyesi arasındaki mesafe (mm) (3)	Ortalama basınç gradyanları (4)	i_f (5)
3	45	25	1,03	0,9
17	31	55	0,90	0,9
24	24	68	0,90	0,9
37	11	24	0,95	0,9

Chiew (1991):

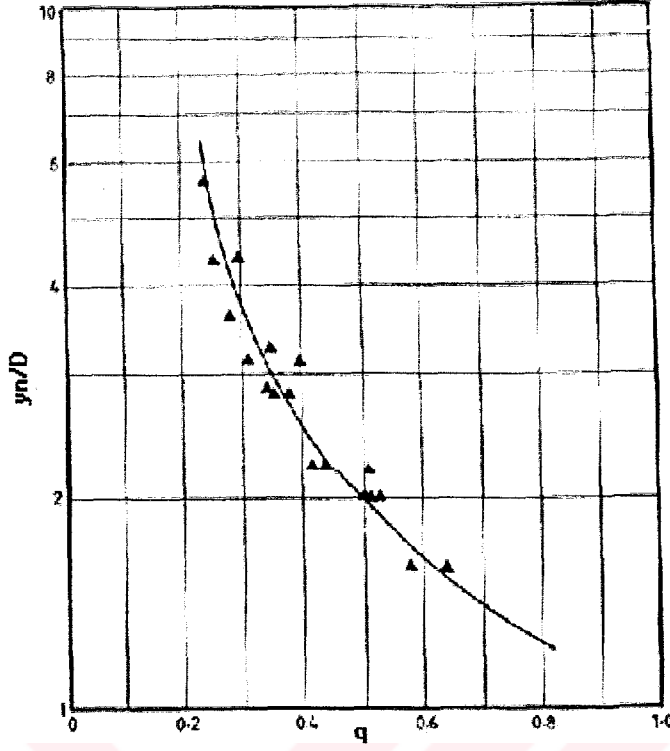
Oyulma çukuruna doğru yaklaşan bir akım iki bileşene ayrılır. Chiew (1991), sığ ve açık kanallarda yapmış olduğu deneyler sonucunda, oyulma çukurundan geçen akım miktarının, bozulmamış akım derinliği, y_n , boru çapı, D , ve bozulmamış taban ile boru arasındaki açıklık,

e, gibi parametrelere bağılı olarak değiştiğini belirtmiştir. Büyük rölatif oyulma derinliklerinde, daha küçük boşluk akımı meydana gelmektedir. Çünkü, yüksek akım derinliklerinde, yaklaşan akım borunun altından geçmek yerine, yönünü değiştirerek, üstünden akıp geçer. Böylece daha küçük miktarda akım, boru altındaki oyulma çukurundan geçebilir. Şekil 3.11’de Chiew’in (1991) elde etmiş olduğu ampirik fonksiyon gösterilmiştir.

Şekil 3.12’de de akım derinliği parametresi, y_n/D , ve boşluktan geçen akımın gelen akıma oranı, q (q_{bot}/q_0), ile ilişkili olarak ampirik bir fonksiyon verilmiştir. Şekil 3.12’de, Şekil 3.11’den farklı olarak, e/D ’nin olaya etkisi olmadığı görülmektedir. Şekil 3.12 de Şekil 3.11 gibi, akım derinliğinin artmasıyla, boru altı boşluk akımının azaldığını belirtmektedir. Şekil 3.12’deki eğriler kullanılarak, boşluk akımı oranı tayin edilebilir.



Şekil 3.11 Chiew tarafından verilmiş, y_n/D ’nin q ve e/D parametrelerine bağılı olarak değiştiği grafik (Chiew, 1991)

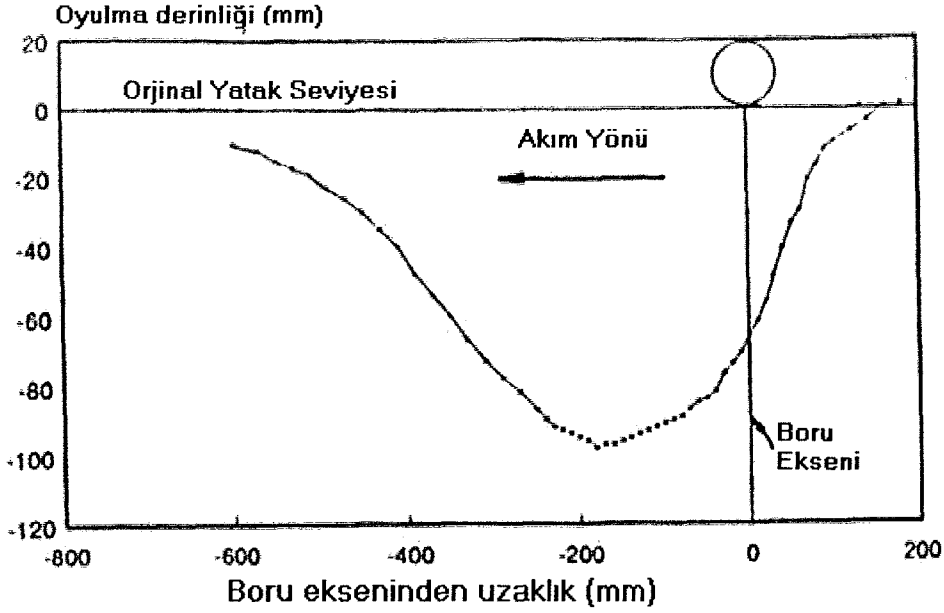


Şekil 3.12 y_n/D 'nin q 'ye bağlı değişimi (Chiew, 1991)

Chiew (1991)'e göre, bir oyulmanın maksimum denge oyulması haline ulaşabilmesi için şu şartların sağlanması gerekir:

- 1) Temiz su oyulması şartlarında, taban malzemesi taşınımı yokken, yatak kayma gerilmesinin, taban malzemesi hareketinin kritik kayma gerilmesine eşit olması durumunda;
- 2) Tek yönlü akım şartlarında maksimum oyulma derinliğine ulaşılabilir.

Şekil 3.13'de, yukarıdaki akım şartlarında gerçekleşmiş tipik bir oyulma profili görülmektedir.



Şekil 3.13 Tipik denge oyulma profili (Chiew, 1991).

Araştırmacı konu ile ilgili, şu iki soruya cevap verilmesinin önemli olduğunu ifade etmiştir:

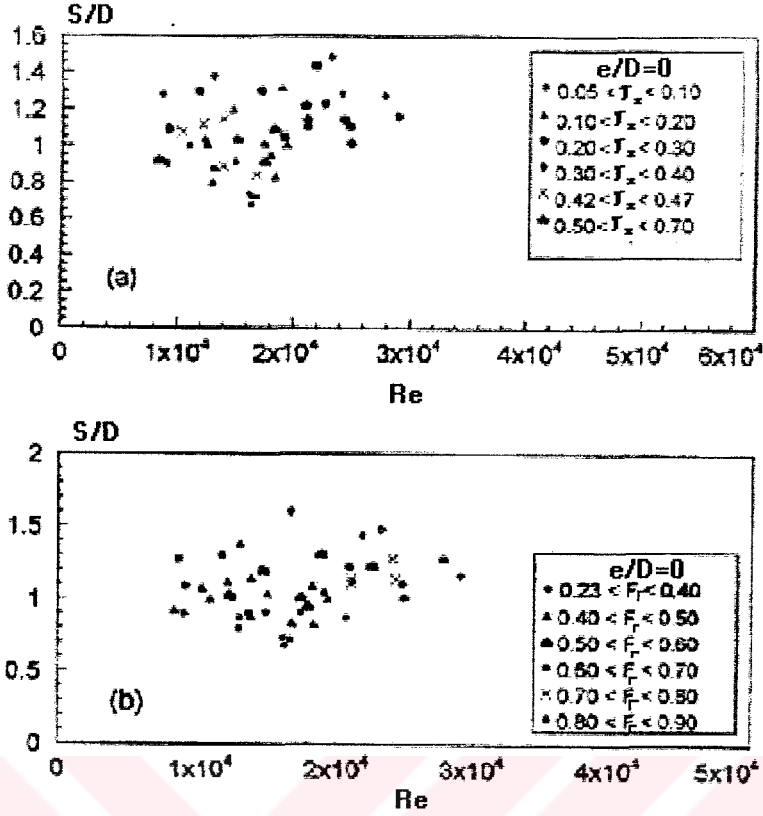
- 1) Yaklaşan akım, boruya temas ettiğinde, gelen akımın ne kadarının oyulma çukurundan, yani boru altından geçtiği bilinmelidir. Çünkü bu, oyulma çukuru boyutlarını doğrudan etkilemektedir.
- 2) Oyulma çukurunun, memba yüzü eğimindeki kritik kayma gerilmesi nedir?

Denge durumuna gelmiş tipik bir oyulma çukuru, Şekil 3.13'de görüldüğü üzere, simetrik bir şekle sahip değildir. Eğim, borunun memba kısmında büyük, mansap kısmında ise daha küçüktür. Chiew (1991)'e göre, memba, eğimi %20-28 aralığında gerçekleşmektedir. Elde edilen bu açılar önemlidir çünkü, buradan yola çıkarak, oyulma çukurundaki gerçek kayma gerilmesine ulaşılabilir. Günümüzde birçok mühendis, taban hareketi başlangıcını Shields'in vermiş olduğu fonksiyonla açıklamayı yeterli görmektedir. Ancak bu fonksiyon sadece yatay ya da yataya yakın zemin eğimlerinde kullanılabilir.

Araştırmacı yaptığı deneylerde, oyulma çukurundaki taban malzemesinin kritik kayma gerilmesi, dik eğime rağmen, Shields'in verdiği fonksiyonla bulunan sonuca oldukça yakındır. Bunun sebebi boru arkasında meydana gelen ters çevrilerdir. Bu ters çevriler, taban malzemesinin kritik kayma gerilmesini doğrudan etkilemektedir.

Moncada ve Aguirre (1999):

Moncada ve Aguirre (1999) ise akarsuları geçen ve akıma dik şekilde yerleştirilmiş boru

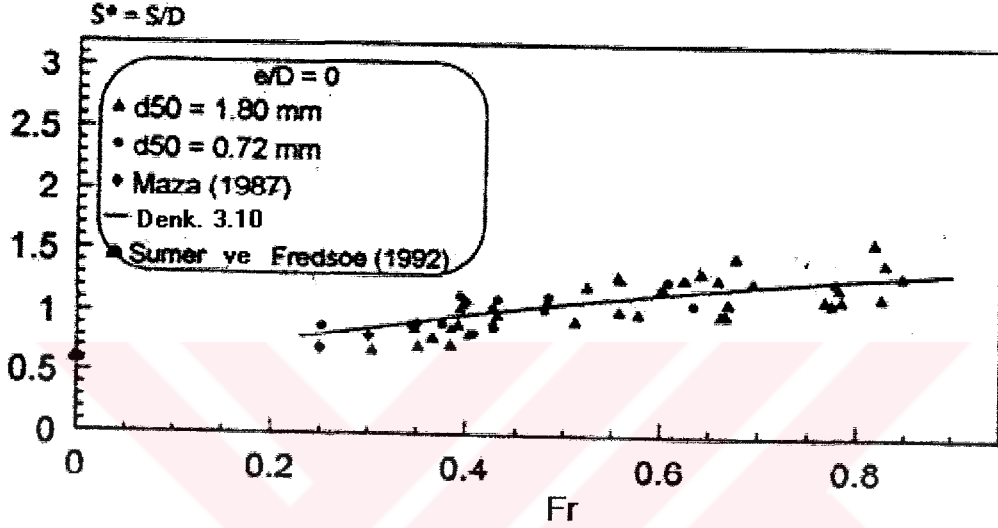


Şekil 3.15 (a) Rölatif oyulma derinliğinin (S/D) Re ve τ_* ile değişimi; (b) rölatif oyulma derinliğinin (S/D) Re ve Fr ile değişimi (Moncada ve Aguirre, 1999)

Moncada ve Aguirre (1999), boru hattı altında gerçekleşen oyulmayı etkileyen değişkenler arasında bir bağıntı kurabilmek için boyutsuz parametreler çalışması yapmışlardır. Şekil 3.15'deki 2 grafikte, boyutsuz oyulma derinliği S/D , Reynolds sayısının ve Shields parametresinin bir fonksiyonu olarak, Şekil 3.15.a'da, Reynolds sayısının ve Froude sayısının bir fonksiyonu olarak ise Şekil 3.15.b'de verilmiştir. Son şekilde Froude sayısının artışı ile oyulma derinliğinin de arttığı görülmektedir. $e/D=0$ için, Re , $9 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ arasında değişmektedir. Sonuç olarak bu şekillerden S/D ile Re arasında net bir ilişki olmadığı görülmektedir. Böylece, boru Reynolds sayısının oyulma çukuru üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir.

Bu şekillerde, esas olarak Froude sayısının oyulmaya etkili bağımsız bir değişken olduğu ifade edilmiştir. Şekil 3.16'da, $e/D=0$ için, deneylerden elde edilen rölatif oyulma derinlikleri (S/D), akımın Froude sayısının birer fonksiyonu olarak gözükmemektedir. Froude sayısı 0,23 - 0,84 arasında değişmektedir. Şekil 3.15 ayrıca, $e/D=0$ değerleri için Şekil 3.3'den bulunan ve çeşitli Fr sayılarına karşılık gelen S/D değerlerini de içermektedir. Buradan elde edilen veriler, Froude sayılarının küçük değerleri (0,20 - 0,40 arasında değişen) için diğer verilerle

uyum sağlamaktadır. Maza'nın (1987) vermiş olduğu ve Moncada-Aguirre'nin (1999) deneylerinden elde edilen sonuçlar, Şekil 3.16'da görüldüğü üzere aynı eğilimdedirler. Şekil 3.16'da, Moncada-Aguirre'nin (1999) deney sonuçlarına bakılırsa, oyulmanın Froude sayısının büyük değerlerinde denge durumuna geldiği ve $Fr \rightarrow 0$ 'a yaklaştığında rölatif oyulma derinliğinin (S/D) 0,55'e yaklaştığı görülmektedir. Sümer ve Fredsoe'nun (1990, 1992) verdikleri verilerde ise bu değer 0,6'ya tekabül etmektedir. Böylece farklı çalışmalardan alınmış bu verilerin iyi uyum gösterdikleri söylenebilmektedir.

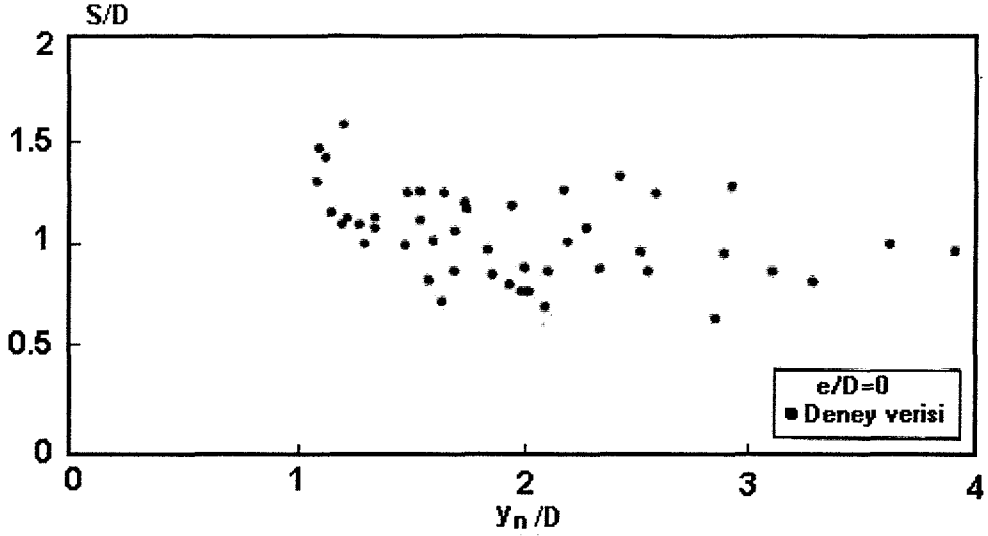


Şekil 3.16 Hareketli taban şartlarında Froude sayısının (Fr) rölatif oyulma derinliğine (S/D) etkisi (Moncada ve Aguirre, 1999)

Şekil 3.16 ayrıca, taban malzemesi çapı ne olursa olsun, oyulma derinliği ile Froude sayısı arasında iyi bir ilişki olduğunu da göstermektedir. $0,2 \leq Fr \leq 0,9$ için

$$S/D = 0,9 \tanh(1,4 \cdot Fr) + 0,55 \quad (3.10)$$

eşitliği verilmiştir. Burada korelasyon katsayısı $r^2 = 0,7$ ve rölatif hata % 10'dur. Şekil 3.17'de ise borunun akıma uyguladığı blokaj etkisini gösterebilmek için S/D 'nin y_n/D ile değişimi verilmiştir. Şekil 3.17'den S/D - y_n/D arasında belirgin bir ilişki elde edilemediği anlaşılmaktadır.



Şekil 3.17 y_n/D 'nin S/D 'ye etkisi (Moncada ve Aguirre, 1999)

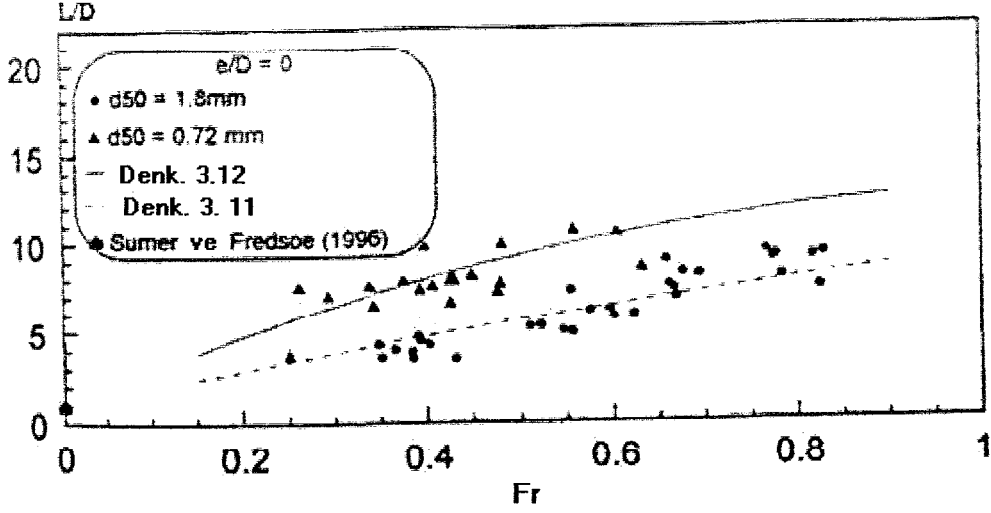
Rölatif oyulma genişliği L/D ile Fr arasındaki ilişki de Şekil 3.18'de verilmiştir. Her iki parametre arasında iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Ayrıca, Fr arttığında L/D 'nin de arttığı, $L/D=1$ için $Fr \rightarrow 0$ 'a yaklaştığı ve küçük tane çaplı zeminlerde büyük oyulma genişliğine erişildiği saptanmıştır. Benzer asimptotik değerler Sümer ve Fredsoe (1996) tarafından da verilmiştir. Araştırmacılar, $d_{50}=1,8$ mm için, aşağıdaki eşitliği elde etmişlerdir.

$$L/D = 13 \tanh(0,74.Fr) + 1,0 \quad (3.11)$$

$d_{50}=0,72$ mm için;

$$L/D = 13 \tanh(1,5.Fr) + 1,0 \quad (3.12)$$

3.11 ve 3.12 denklemleri $0,13 \leq Fr \leq 0,9$ için geçerlidir. 3.11 denkleminde korelasyon katsayısı $r^1=0,64$ ve rölatif hata % 23'dür. 3.12 denkleminde ise korelasyon katsayısı $r^1=0,90$ ve rölatif hata % 6,5'dur.



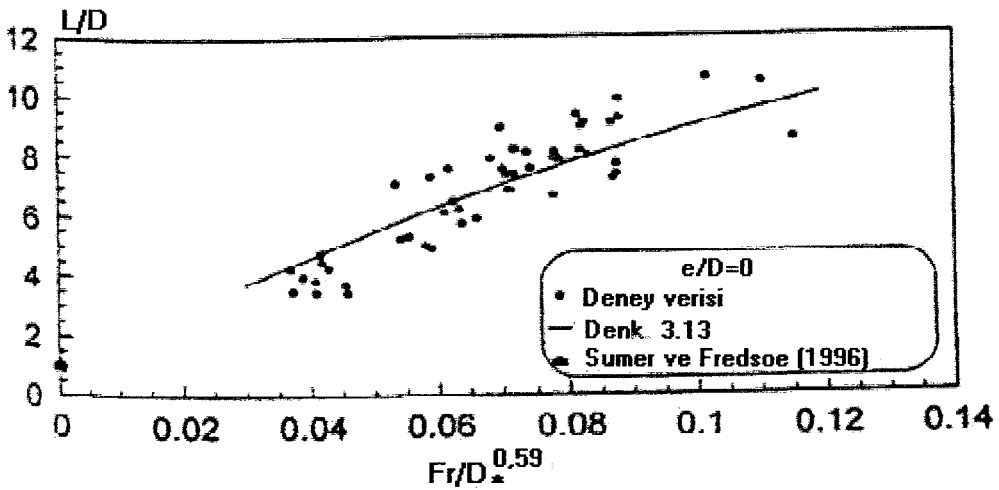
Şekil 3.18 Froude sayısının (Fr) rölatif oyulma genişliği (L/D) ile değişimi (Moncada ve Aguirre, 1999)

Rölatif genişlik L/D ile $Fr/D_*^{0.59}$ arasındaki ilişki Şekil 3.19’da verilmiştir. Burada $D_* = d_{50} \cdot (g \cdot \Delta / \nu^2)^{1/3}$, boyutsuz malzeme çapıdır. 0,59 bir katsayıdır ve $Fr/D_*^{0.59}$ arttığında, L/D de artar yani tane çapı küçüldükçe rölatif oyulma genişliği de (L/D) artar.

$d_{50}=1,8$ mm, $d_{50}=0,72$ mm için ve $e/D=0$ iken:

$$L/D = 13 \tanh(7,2 \cdot Fr/D_*^{0.59}) + 1,0 \quad (3.13)$$

olur ve bu $0,03 \leq Fr/D_*^{0.59} \leq 0,12$ için geçerlidir. Korelasyon katsayısı $r^2=0,71$ ve rölatif hata %26,6’dır.



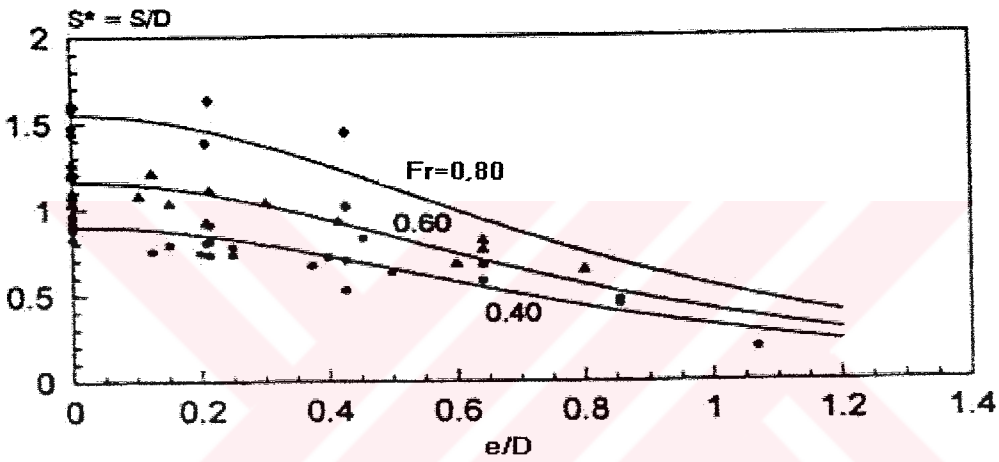
Şekil 3.19 $Fr/D_*^{0.59}$ parametresinin rölatif oyulma genişliğine (L/D) etkisi (Moncada ve Aguirre, 1999)

Şekil 3.20’de, çeşitli Fr değerlerine bağlı olarak, denge oyulma derinliği S/D ile e/D arasındaki ilişki verilmiştir. S/D ve e/D için farklı Fr değerlerinde kullanılabilecek eşitlik şöyledir.

$$S/D = 2Fr \operatorname{sech}(1,7e/D) \quad (3.14)$$

Bu denklem Froude sayısının ortalama değerleri için ($Fr=0,40$; $0,60$; $0,80$ için) elde edilmiştir. 3.14 denkleminde korelasyon katsayısı $r^2=0,85$ ve rölatif hata %14’dür.

Sonuç olarak, Moncada-Aguirre’nin (1999) bulduğu deneysel sonuçların, Maza’nın (1987) vermiş olduğu eğriler demetine uyduğu söylenebilir.

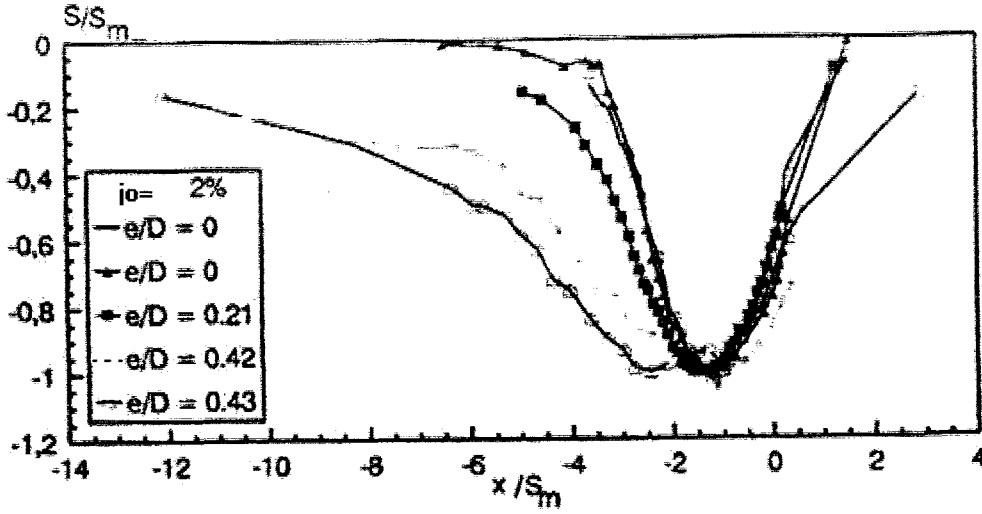


Şekil 3.20 Boru pozisyonunun denge oyulma derinliğine etkisi (Moncada ve Aguirre, 1999)

Deney kapsamında, boşluk oranının (e/D) ve eğimin (j_0) oyulma çukurunun büyüklüğü ve şekli üzerindeki etkisi ile ilgili bir çalışma da yapılmıştır. Şekil 3.21’de, $j_0=\%2$ eğim için çeşitli e/D oranlarına karşılık gelen birçok boyutsuz profil gözükmemektedir. Ayrıca Şekil 3.21’de, e/D ’nin artışına uyumlu olarak, boru hattının mansabındaki hareketli taban malzemesi miktarının arttığı da görülmektedir. Yine e/D ’nin artmasıyla birlikte, maksimum oyulma derinliğinin borunun mansabında oluştuğu açıkça görülmektedir. Şekil 3.21’de;

S_m = Maksimum denge oyulma derinliği,

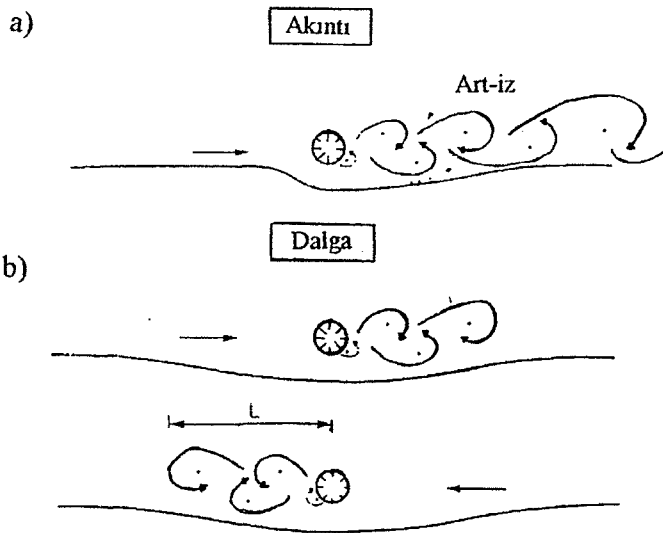
x = Akım yönünde engelden itibaren ölçülen mesafedir.



Şekil 3.21 Farklı boşluk oranları (e/D) ve %2 taban eğimi için oyulma çukurunun boyutsuz profilleri (Moncada ve Aguirre, 1999)

3.2 Dalga ve/veya Gelgit Etkisindeki Boru Hatları Etrafında Meydana Gelen Yerel Oyulmalarla İlgili Araştırmalar

Bu bölümde rüzgar dalgaları veya tedricen değişen gel-git akıntısı gibi iki yönlü kararsız akımın neden olduğu boru hatları etrafındaki yerel oyulma incelenmiştir. Kararlı akım ile arasındaki en önemli fark, kararlı akım halinde boru hattının mansabında meydana gelen art-iz sisteminin bu durumda hem mansab hem de memba tarafında oluşmasıdır. Bu nedenle, kararsız akım halinde kararlı akımdan farklı olarak, oyulma çukuru sadece mansapta değil, borunun her iki tarafında da yumuşak bir eğime sahip olur (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 Art-iz etkisi; a)akıntı, b)dalga (Sümer ve Fredsoe, 1990)

Salınımlı ortamda art-iz şeklinin oluşumunu ve etki mesafesini Keulegan-Carpenter sayısı tayin etmektedir.

$$KC=V_m T/D \quad (3.15)$$

Burada V_m , yörüngesel hızın yatay bileşeninin maksimum değeri, T , dalga periyodu ve D , boru çapıdır. KC sayısının küçük değerlerinde (<5) borunun mansabında art-iz bölgesi oluşmadığı tespit edilmiştir. Daha büyük KC değerlerinde ise borunun mansabında vorteks sokağı oluşmaktadır.

Bijker ve Leeuwestein (1984):

Deniz altı boru hatlarının dalga etkisine maruz kalmaları halinde etraflarında meydana gelen oyulmaları araştırmışlardır. Bu durumda boru hatları yüzey dalgalarından kaynaklanan yörüngesel hızlara maruzdurlar. Yörüngesel hızların yönleri periyodik olarak değiştiğinden, akıntı durumundan farklı yaklaşım gerektirmektedir.

Araştırmacılar, salınımlı akım söz konusu olduğunda oyulma işleminin üç ana konusu olduğunun belirtmişlerdir. Bunlar; taban ve boru boyunca sürtünme, borunun altında ve deniz tabanındaki hızların büyüklüğü ve katı madde taşıma kapasitesidir. Bu parametreler birbirleri ile ilişkilidirler.

Boru ve tabanda meydana gelen sürtünme etkisi türbülanslı akım yapısındaki momentum alışverişinden dolayı sınır tabakasından akımın içine doğru taşınmaktadır. Ancak salınımlı akımda sınır tabakası tam olarak gelişemediğinden sınır tabakasının akıma etkisi salınım periyodu ile sınırlı kalmaktadır.

Salınım periyodunun küçük olması durumunda, borunun altındaki ve deniz tabanındaki hızlar sürtünmeden az etkilenmektedir. Potansiyel akım teorisindeki gibi sürtünmesiz bir boru hattı çevresindeki akım için verilen nümerik modeller salınımlı bir akımda boru altındaki hızlar için olumlu sonuçlar vermiştir.

Araştırmacıların dalga kanalında yapmış oldukları deneyler, salınımlı akımdaki oyulma derinliğinin sadece akıntı etkisi halinde meydana gelenle karşılaştırıldığında daha az olduğunu göstermiştir. Ayrıca, dalga etkisine maruz oyulma derinliğinin, akıntı durumunun aksine boru çapından daha az etkilenmekte olduğu belirtilmiştir. Deneyler esnasında boru hattı etrafında sadece yerel taban hareketi gözlemlendiği ifade edilmiştir.

Leeuwestein et al. (1985):

Araştırmacılar önce tek yönlü akım şartlarında yerel oyulma derinliklerini belirlemiş, daha sonra ters doğrultuda akım vererek gel-git etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarının ikinci aşamasında, değişen hızda akım etkisinde yerel oyulmanın gelişimini belirlemişlerdir. Deneyleri sırasında borunun sarkması ve kendi kendini gömmesi olayını gözlemleyerek, ölçek etkisini de incelemişlerdir.

Çalışmalarının sonuçları şöyle özetlenebilir:

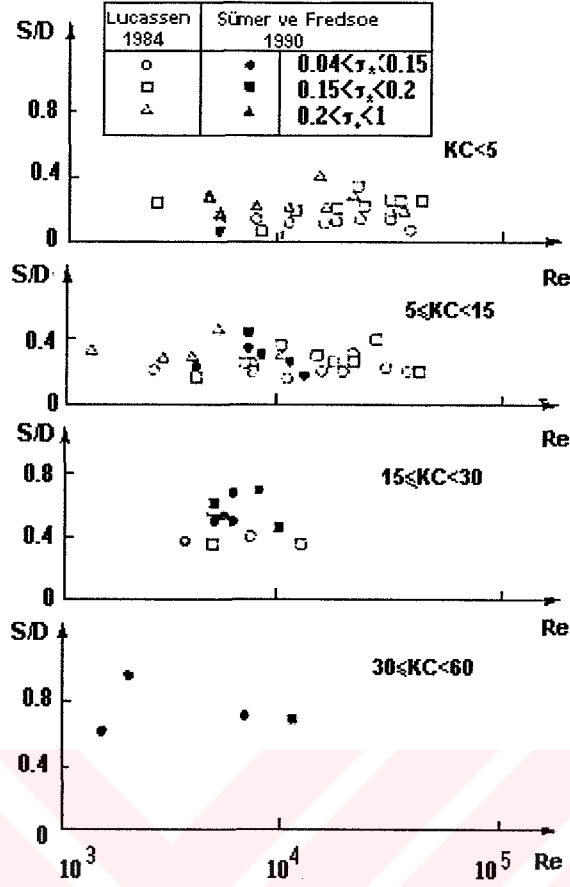
- 1) Boru hattının sarkma miktarı boru çapının 1.4 katı olduğunda oyulma çukurunun yarı genişliği oyulma derinliğinin 8 katı mertebesine erişmekte ve art-iz bölgesinde oyulmaya neden olmaktadır.
- 2) Sarkma miktarı boru çapının iki katı olduğunda bu genişlik oyulma derinliğinin 20 katına ulaşmaktadır.
- 3) Fırtına şartlarında sırf dalga etkisinde yerel oyulma tek yönlü akım durumuna göre daha küçük mertebede gerçekleşmektedir. Akıntıya dalga etkisi süperpoze edildiğinde oyulmanın gelişimi negatif etkilenmektedir.
- 4) İnce malzemeli tabanlarda uzun süreli akıntı etkisi art-iz bölgesinde erozyona neden olmaktadır.

İbrahim ve Nalluri (1986):

Araştırmacılar dalga ile akıntının beraber olması durumunda verilen bir dalga yüksekliği için oyulma derinliğinin artan hızla arttığını ve tek yönlü akım şartlarından daha büyük mertebede gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Oyulma derinliğinin katı madde karakteristiğine, akım ve dalga özelliklerine bağlı olduğu, ayrıca artan dalga yüksekliklerinde oyulma derinliklerinin de arttığı tespit edilmiştir. Temiz su şartlarında, verilen bir tane boyutu için farklı gömülme oranlarında benzer sonuca ulaşılabilceği belirtilmiştir.

Sümer ve Fredsoe (1990):

Araştırmacılar deneylerini, biri dalga kanalı diğeri ise salınımlı U tüpü olmak üzere iki farklı ortamda yürütmüşlerdir. Dalga kanalında su yüksekliği 40 cm'de sabit tutularak 10, 20, 30 ve 50 cm çaplı borular kullanmışlardır. Birkaç deneyleri dışında genellikle hidrolikçe cilalı boruları tercih etmişlerdir.



Şekil 3.23 Dalgalı ortamda oyulma derinliğinin boru Reynolds sayısı ve Shields parametresi ile değişimi (Sümer ve Fredsoe, 1990)

Şekil 3.23’de görüldüğü gibi Reynolds sayısının 10^3 ve 10^5 değerleri arasında oyulma derinliğinin önemli bir değişim göstermediği belirtilmiş ancak Reynolds sayısının 2×10^5 - 3×10^5 değerleri arasında oyulma derinliğinde küçük bir azalma beklenebileceği ifade edilmiştir. Aynı zamanda Şekil 3.23’de oyulma derinliğinin Shields parametresi ile değişiminin oldukça zayıf olduğu görülmektedir.

Araştırmacılar KC sayısının denge oyulma derinliğine etkisini de incelemişler ve rölatif denge oyulma derinliğinin KC sayısı ile oldukça uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıda görüldüğü gibi hidrolikçe pürüzsüz borular için gerçekleştirilen deneylerde Reynolds sayısının ve Shields parametresinin oyulma derinliğine etkisinin çok sınırlı olduğu belirtilmiştir. Ancak prototip şartlarında boru hattının yüzeyi deniz canlıları ile kaplanarak tamamıyla pürüzlü cidar gibi davranmaktadır. Bu pürüzlülük miktarı $k_s/D > 3 \times 10^{-3}$ şartını sağlamaktadır. Bu durumda Reynolds sayısının vorteks saçılımları üzerine etkisinin kaybolduğunu Achenbach ve Heinecke (1981) gözlemlemişlerdir.

Sümer ve Fredsoe (1990) boru pürüzlülüğünün sınır tabakasından ayrılma işlemi üzerine etkisinin olmadığını göstermek için rölatif pürüzlülüğü $k_s/D=0.1$ olan bir boru ile deneyler yapmışlar ve hidrolik cilalı boru ile pürüzlü boru için elde edilen oyulma profilleri arasında önemli fark olmadığını tespit etmişlerdir. Diğer bir ölçek etkisi, dalga kanalında meydana gelen kum dalgacıklarının ise oyulmaya etkisinin önemli mertebede olmadığı belirtilmiştir.

Araştırmacılar ayrıca, denge oyulma derinliğinin belirlenmesinde boru ile taban arasındaki açıklık oranının önemli bir etkisinin olduğunu, ancak bu etkinin KC sayısının artan değerlerinde belirginleştiğini ifade etmişlerdir.

Sümer ve Fredsoe (1991):

Kısmi olarak deniz tabanına gömülü ve dalga etkisine maruz boru hatları etrafındaki oyulmanın başlangıcını incelemişlerdir. Borunun membaında ve mansabında ayrılan vortekslerin etkisi ile oyulma sürecinin başladığını ve bu vortekslerin katı maddeyi hareket ettirebilecek kadar kuvvetli olduğunu belirtmişlerdir.

KC sayısı oyulmanın oluşumunda ve gelişiminde etkili olan vorteksleri kontrol etmektedir. KC sayısı arttıkça oyulmanın büyük gömme derinliklerinde dahi gerçekleşebileceği belirtilmiştir. Bunun nedeni KC sayısının büyümesi ile vortekslerin de büyümesidir.

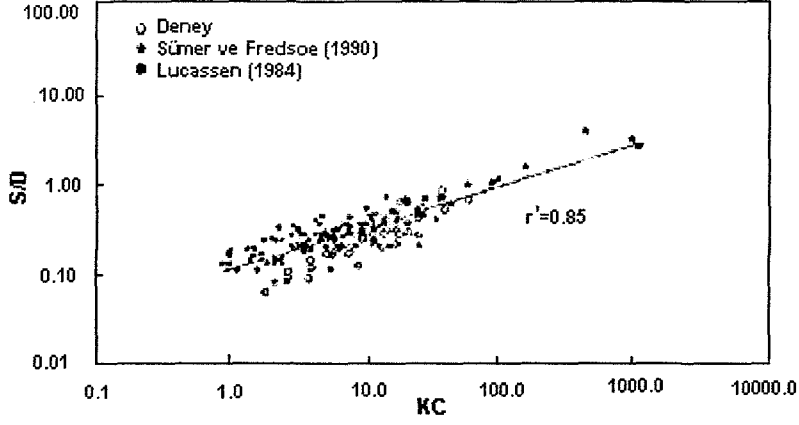
Çevik ve Yüksel (1999):

Araştırmacılar, sığlaşma etkisinin denizaltı boru hatları etrafındaki yerel oyulmalara etkisini tespit edebilmek için 1/5 ve 1/10 taban eğimlerinde ve sırf dalga şartlarında deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Sığlaşma etkisini daha net görebilmek için çalışmalarını ikiye ayırmışlar; önce yatay daha sonra da eğimli tabanda deneyler yapmışlardır.

Yatay taban için yapılan deneylerde dört farklı çapta boru ($D=32.3, 49, 77$ ve 114 mm) kullandıklarını belirtmişlerdir. Oyulma sürecinin ilk aşamalarında, oyulma çukurundaki hızın artmasıyla oyulma derinliği de artmaktadır. Oyulma çukurundan çıkan malzeme memba ve mansapta kum eşiği oluşturur ve oyulma çukuru içindeki hız taban malzemesini taşıyamayacak kadar azaldığında erozyon son bulur, denge oyulma derinliğine erişilir.

Araştırmacılar, D , boru çapı, H , dalga yüksekliği ve T , dalga periyodunun artmasıyla S , denge oyulma derinliğinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Şekil 3.24’de rölatif oyulma derinliği S/D ile KC sayısının ilişkisi verilmektedir. Deney sonuçları, Sümer ve Fredsoe (1990)’nun ve Lucassen (1984)’in verileri ile karşılaştırılmaktadır. Üç araştırmanın verilerinin birbirleriyle

uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.24 Maksimum denge oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999)

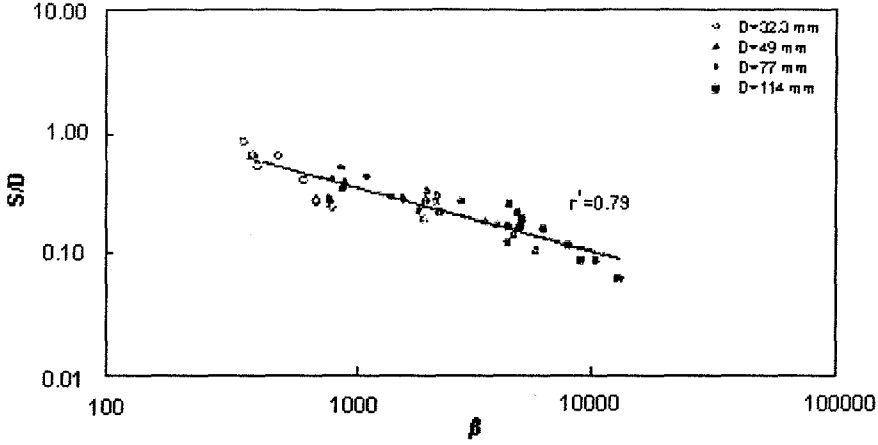
Elde edilen bu eğrinin denklemi şu şekilde verilmiştir:

$$S/D = 0.11 KC^{0.45} \quad (3.16)$$

Kararlı akım şartlarında rölatif oyulma derinliği, S/D , boru Reynolds sayısına (Re) bağlı olarak değişmektedir. Sümer ve Fredsoe (1990) dalga şartlarında, $10^3 < Re < 10^5$ aralığında, oyulma derinliğinin çok az değiştiğini belirtmişlerdir. Karasız akım durumunda KC sayısı oyulma olayında önemli bir parametre haline gelmektedir. Araştırmacılar KC sayısının Reynolds sayısına oranını bir β parametresiyle tanımlamışlardır. β =Periyot parametresi olmak üzere:

$$\beta = KC/Re = vT/D^2 \quad (3.17)$$

β 'nın rölatif oyulma derinliğine etkisi Şekil 3.25'de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, β arttıkça S/D küçülmektedir.



Şekil 3.25 Rölatif oyulma derinliğinin β parametresi ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999)

Elde edilen bu eğrinin denklemi şu şekilde verilmiştir:

$$S/D = 0.18\beta^{-0.59} \quad (3.18)$$

Şekil 3.25'in bir miktar saçılım gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni β parametresinin dalga yüksekliğini içermemesi olarak belirtilmiş ve dalga yüksekliğinin oyulma olayında en az boru çapı ve dalga periyodu kadar önemli olduğu vurgulanmıştır.

Araştırmacılar kanal tabanının eğimli olması hali için yaptıkları deneylerde, sığlaşmanın oyulmaya etkisini araştırmışlardır. Ayrıca aynı dalga şartlarında gerçekleşen eğimli kanaldaki erozyon ile yatay kanaldaki erozyonu karşılaştırmak amacıyla Şekil 3.26 verilmektedir.

S_0 =Yatay eğimli kanal tabanında gerçekleşen oyulma derinliği,

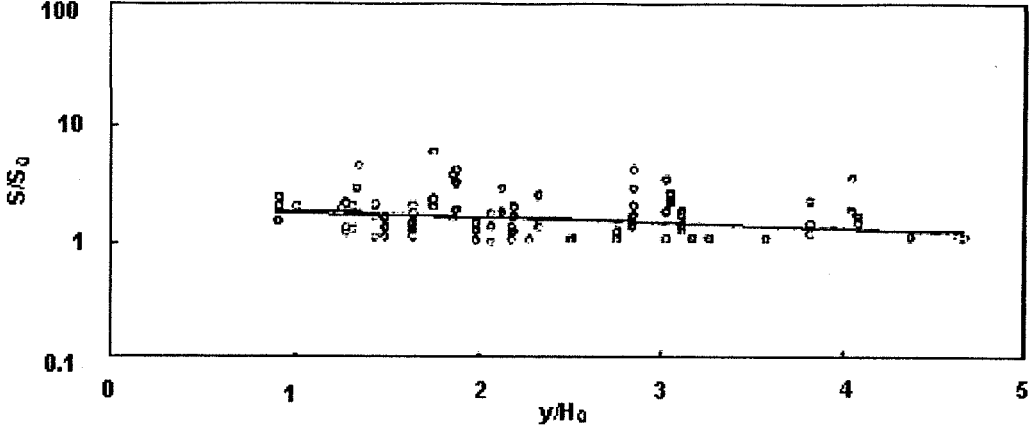
S =Denge oyulma derinliği (eğimli kanallar için),

S/S_0 =Normalleştirilmiş oyulma derinliği,

y =Akım derinliği,

H_0 =Yerel dalga yüksekliği,

y/H_0 =Dalga parametresidir.



Şekil 3.26 Normalleştirilmiş oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999)

Derinlik parametresi artarken normalleştirilmiş oyulma derinliği azalmaktadır. Ayrıca aynı dalga şartlarında, eğimli kanalda meydana gelen oyulma derinliklerinin yatay kanaldaki oyulmaların hemen hemen iki katına ulaştığı görülmektedir.

Ursell sayısı ile rölatif oyulma derinliği arasındaki ilişki Şekil 3.27’de verilmiştir.

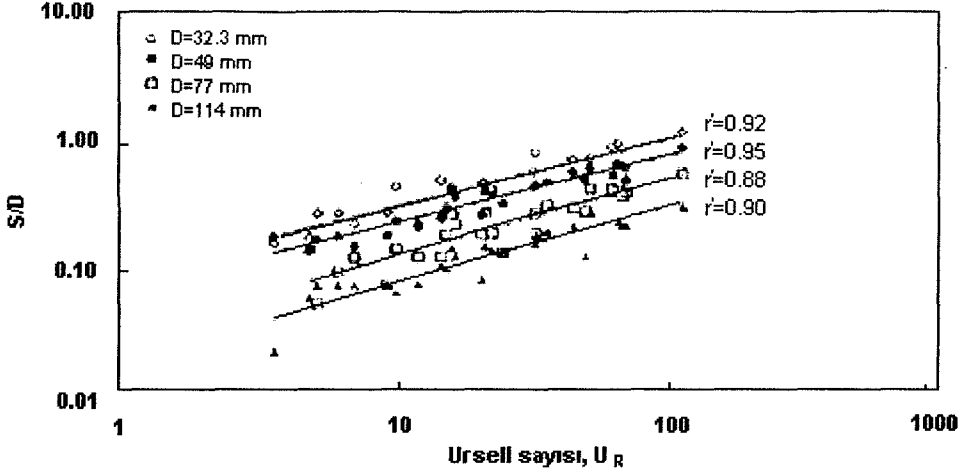
H_0 =Yerel dalga yüksekliği,

L_0 =Yerel dalga boyu,

y =Yerel akım derinliği olmak üzere Ursell sayısı:

$$U_R = H_0 L_0^2 / y^3 \quad (3.19)$$

olarak verilmektedir.

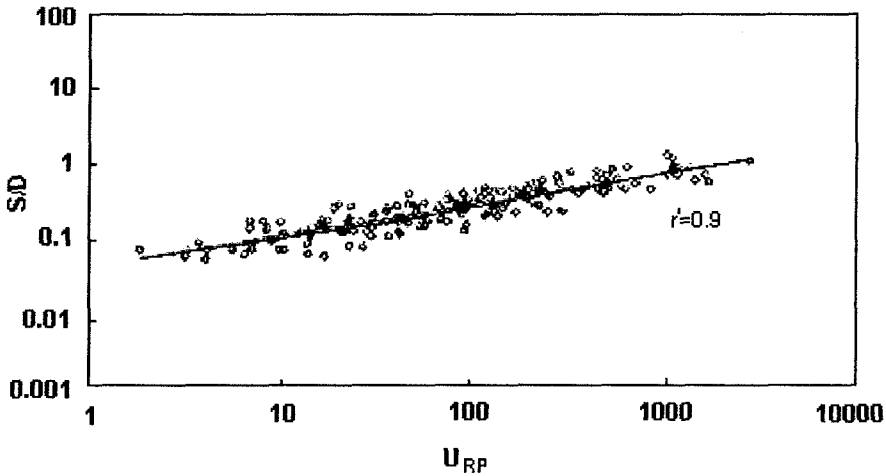


Şekil 3.27 Rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999)

Farklı çaptaki borular için Ursell sayısı ile rölatif oyulma derinliği arasında iyi bir korelasyon elde edilmiştir. Boru çapı Ursell sayısını etkileyen parametrelerden biri olmadığı halde oyulmayı etkileyen önemli değişkenlerdendir. Ursell sayısı boru çapını da içerecek şekilde yazılacak olursa:

$$U_{RP} = U_R (H/D)^2 = H^3 L^2 / \gamma^3 D^2 \quad (3.20)$$

şeklini alır. Burada U_{RP} boru Ursell sayısıdır. U_{RP} 'nin hesaplanması KC sayısının hesaplanmasından daha kolaydır çünkü dalga kırılma şartlarında akım parçacıklarının hızlarının tespit edilmesi oldukça zordur. Şekil 3.28 S/D 'nin U_{RP} ile değişimini göstermektedir.

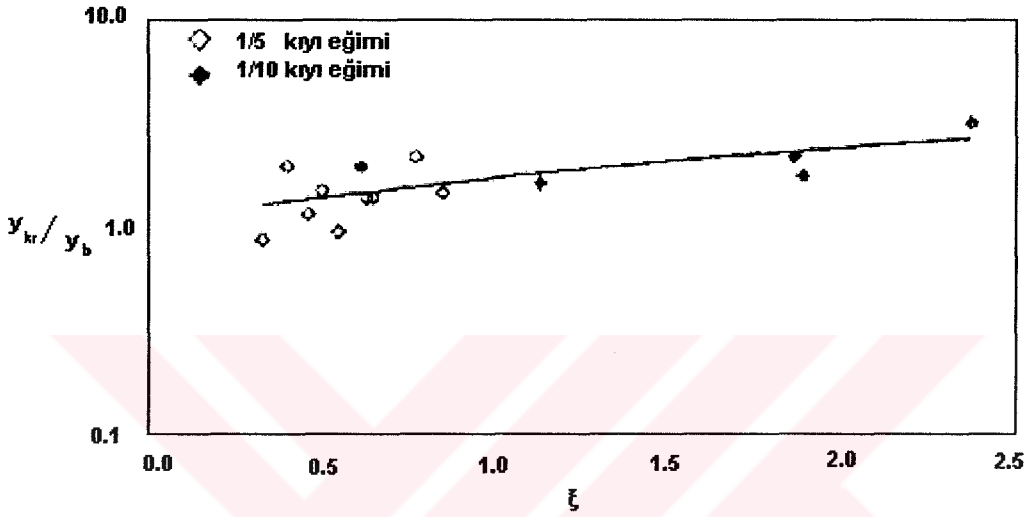


Şekil 3.28 Bütün taban eğimleri için boru Ursell sayısının (U_{RP}) rölatif oyulma derinliği ile değişimi (Çevik ve Yüksel, 1999)

Elde edilen bu eğrinin denklemi şu şekildedir:

$$S/D=0.042U_{RP}^{0.41} \quad (3.21)$$

Araştırmacılar sığlaşma bölgesindeki kıyı profillerinin oyulma sürecinde etkili olduklarını ve maksimum oyulma derinliğinin yerinin surf parametresi ile değiştiğini belirtmişlerdir. Kritik derinlik, y_{kr} , dalga kırılma derinliği, y_b , surf parametresi, ξ , olmak üzere aşağıdaki eğriyi elde etmişlerdir. Burada surf parametresi $\xi=j_0/(H_0/L_0)^{0.5}$, dir.



Şekil 3.29 Maksimum oyulma derinliğinin konumu (Çevik ve Yüksel, 1999)

Eğrinin denklemi,

$$y_{kr}/y_b=0.65\xi+1.1 \quad (3.22)$$

olarak elde edilir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Giriş

Akarsu tabanına yatay olarak yerleştirilen boru hatları ve tüneller etrafındaki oyulma derinliklerinin araştırıldığı bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik ve Kıyı-Liman Laboratuvarında, bir dizi deney yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneyler sabit genişlikli dikdörtgen bir kanalda, aynı taban malzemesi ve farklı akım şartları altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, dairesel ve kare kesitli olmak üzere iki tip engel kullanılmıştır.

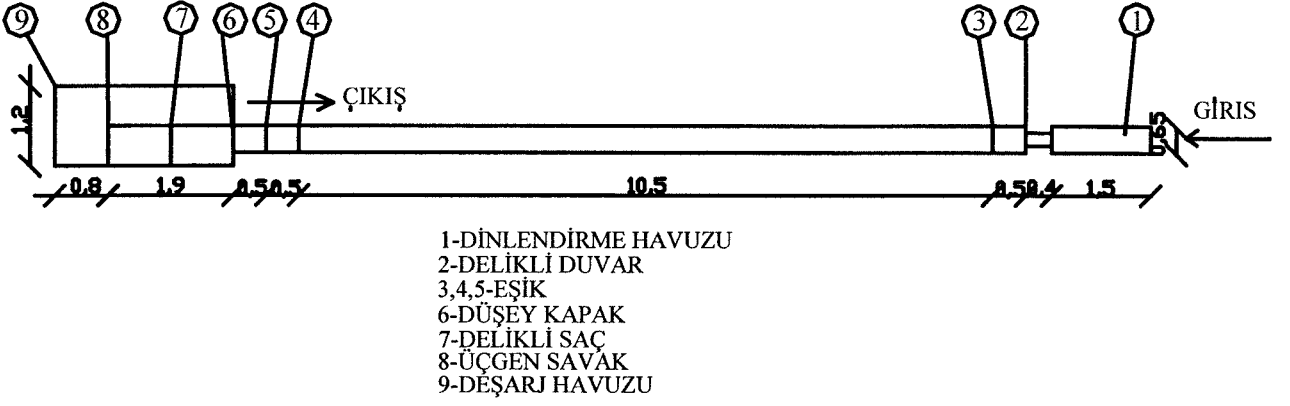
Çalışma programı aşağıdaki şekilde özetlenebilir ;

- 1) Tamamen yatak üzerindeki dairesel kesitli engeller etrafındaki oyulma derinliklerinin $\alpha=90^0$ 'lik atak açısında,
- 2) Tamamen yatak üzerindeki kare kesitli engeller etrafındaki oyulma derinliklerinin $\alpha=90^0$ 'lik atak açısında,
- 3) Her iki tip boru kesiti için $\alpha=30^0$ 'lik ve $\alpha=60^0$ 'lik atak açılarında, olaya etkili parametrelerin oyulma derinliğine etkilerinin belirlenmesi.

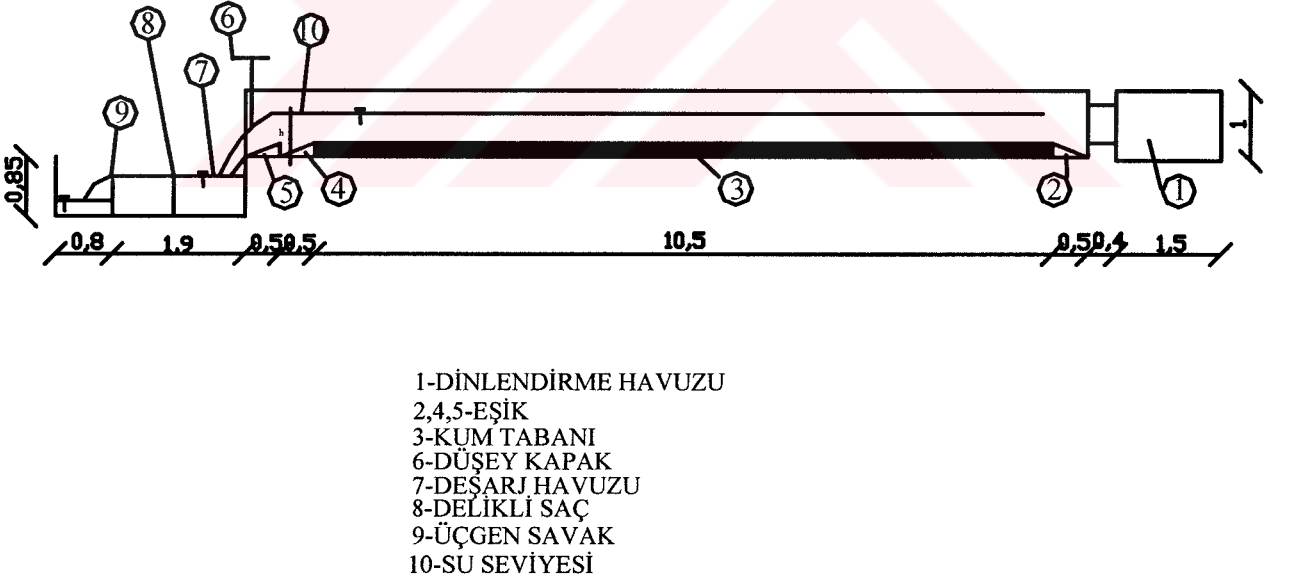
4.2 Deney Kanalı ve Malzemesinin Tanıtılması

Deney kanalı 0,40 m genişliğinde, 12 m uzunluğunda ve 0,60 m yüksekliğinde olup, plan ve boy kesiti Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Kanal üç bölümden meydana gelmiştir.

- 1) Memba dinlendirme havuzu: Bu havuza terfi ile gelen su, delikli tuğla duvar ile sakınleştirilerek kanala verilmiştir.
- 2) Deney kanalı: Kanal 12 m uzunluğunda ve $j_0 = 0,001$ eğimlidir. Kanal tabanına 0.16 m kalınlığında taban malzemesi serilmiştir. Kanalin 12 m'lik bölümünün biri başına birisi de sonuna olmak üzere iki tane eşik yerleştirilmiştir. Bu eşiklerin taban uzunluğu 0,57 m genişliği ise 0,40 m'dir. Kanalin bitiminde bir hareketli kapak yerleştirilmiş ve akım şartları bu kapakla değiştirilmiştir. Ayrıca kanalın sonuna kumların deşarj havuzuna kaçışını engellemek için üçüncü bir eşik daha konmuştur. Seviye ölçümleri için kanal üzerine 0.1 mm hassasiyetli ve hareketli bir limnimetre yerleştirilmiştir.
- 3) Şekil 4.1'de görüldüğü gibi deşarj havuzunu sol tarafında suyun hızını düşürmek için delikli sac bulunmaktadır. Delikli sacın, 90 cm uzağına ise bir üçgen savak yerleştirilmiş ve debi bu savakla tayin edilmiştir. Savağın kret yüksekliği 45 cm'dir. Savağın üzerinde su derinliğini ölçmek için ayrı ve sabit bir limnimetre daha bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Kanalı planı

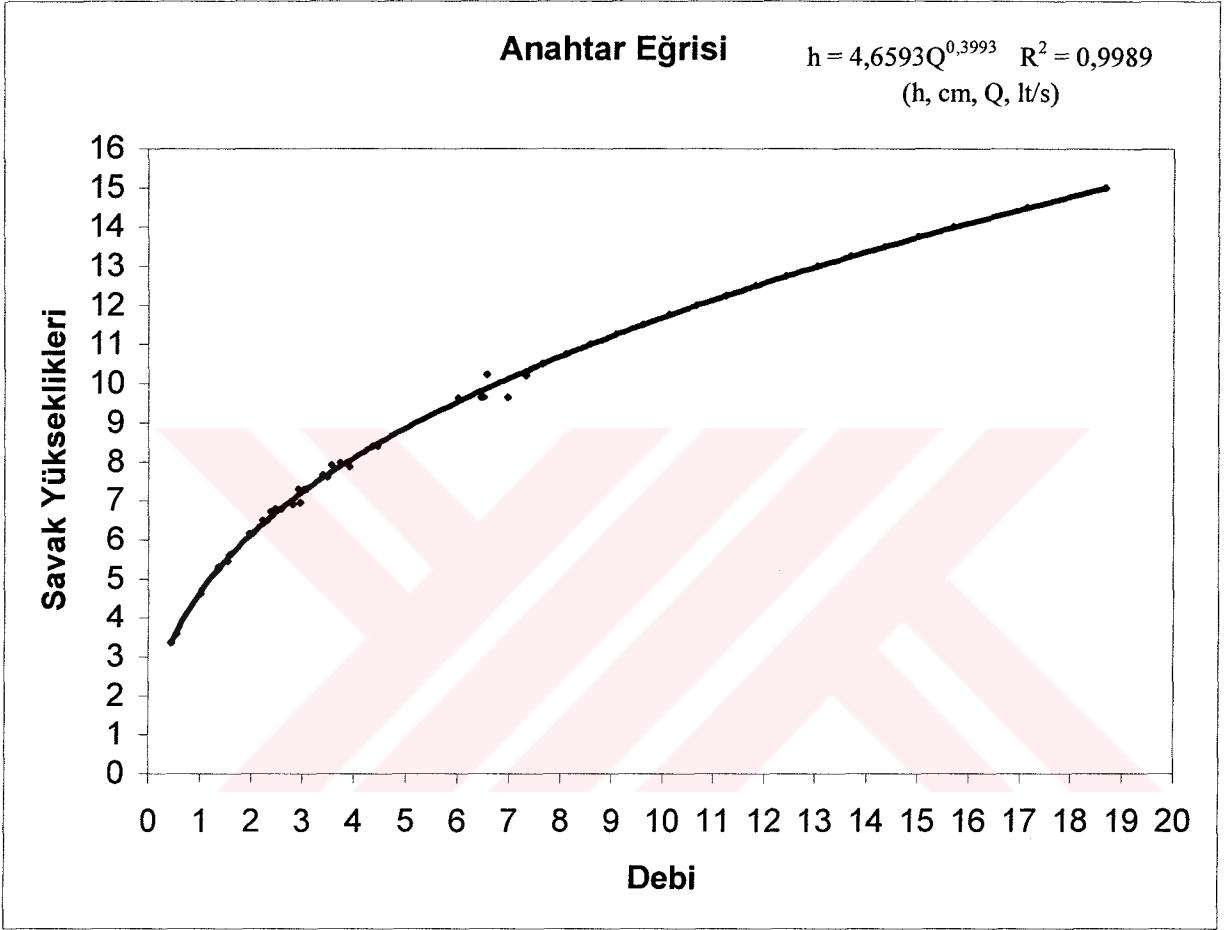


Şekil 4.2 Kanalı boy kesiti

4.3 Deney Öncesi Çalışmalar

4.3.1 Üçgen Savak Anahtar Eğrisi

Kanaldaki akım miktarı deşarj kanalı sonundaki üçgen savakla tayin edilmiştir. Ağırlık ölçümü ile elde edilen üçgen savak anahtar eğrisi ve buna ait debi denklemi Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 Savak anahtar eğrisi

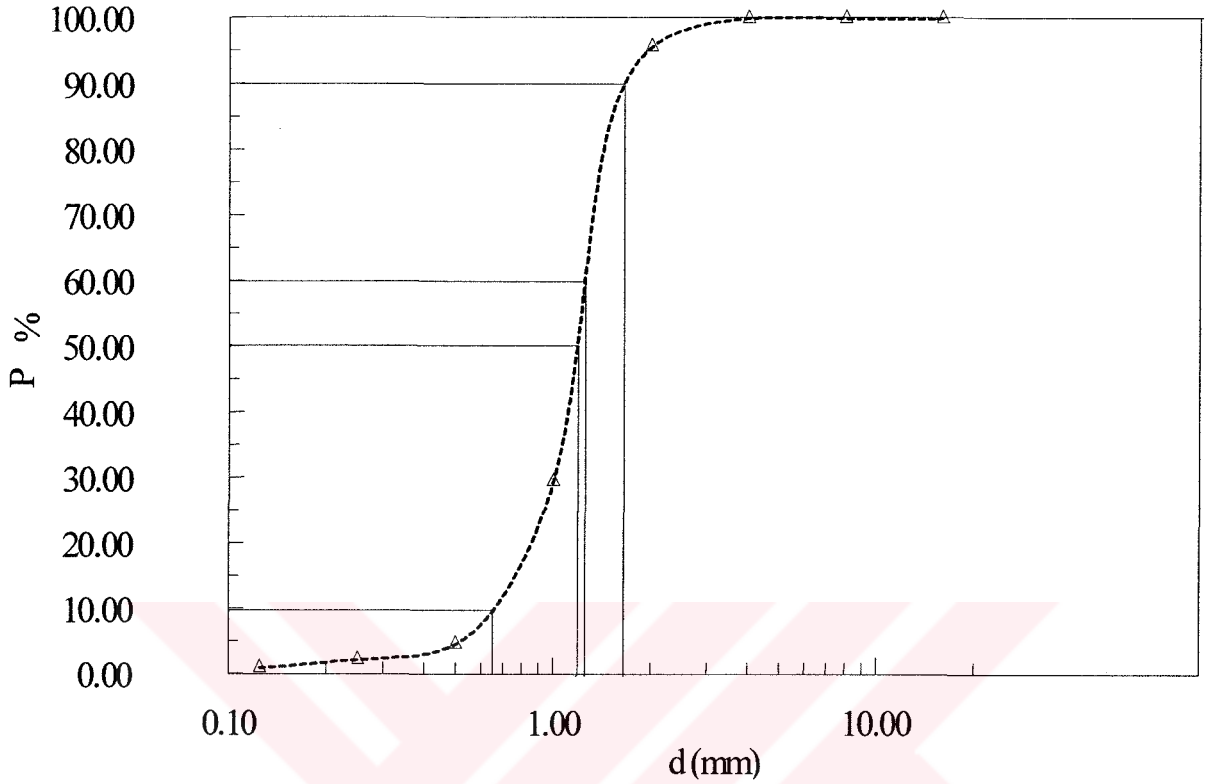
4.4 Taban Malzemesinin Özellikleri

Taban malzemesi olarak kuvars kumu kullanılmış, malzemenin özgül ağırlığı ve granülometrisi Yapı Malzemesi Laboratuvarı’nda yapılan deneylerle tayin edilmiştir. Testler sonucunda, kumun özgül ağırlığının $\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$ olduğu bulunmuştur. Elek analizi sonucu elde edilen, taban malzemesi granülometri eğrisi de Şekil 4.4’de verilmiştir. Şekil 4.4’den taban malzemesi ile ilgili bazı karakteristik çaplar bulunmuştur. Bu çaplar :

$$d_m : d_{50} = 1,15 \text{ mm}$$

$$d_{60} = 1,28 \text{ mm}$$

$d_{90} = 1,86 \text{ mm}$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4 : Taban malzemesi granülometri eğrisi

4.5 Taban Malzemesi Kritik Hızlarının Tayini

Kritik hızlar V_{kr} , 4.1 denklemindeki gibi logaritmik formda hesaplanabilir (Melville, 1997),

$$\frac{V_{kr}}{V_{*kr}} = 5,75 \log \left(5,53 \frac{y_n}{d_{50}} \right) \quad (4.1)$$

Burada; V_{*kr} , kritik kayma hızı (m/s), y_n , su derinliği (m) ve d_{50} , malzemenin yüzde ellisini geçiren elek çapıdır (medyan çapı, mm). Kayma hızları Shields diyagramı kullanılarak bulunabilir. 20 °C'de kuvars kumu için Shields diyagramı kullanılarak aşağıdaki ifade yazılabilir (Melville, 1997):

$$V_{*kr} = 0,0305 d_{50}^{0,5} - 0,0065 d_{50}^{-1}, \quad 1 \text{ mm} < d_{50} < 100 \text{ mm} \quad (4.2)$$

$d_{50} = 1,15 \text{ mm}$ için 4.1 ve 4.2 bağıntıları birlikte kullanılarak, akımın çeşitli derinlikleri için taban malzemesini hareket ettirebilecek kritik hızlar tayin edilebilir.

$$V_{kr} = 0,1556 \log(4809 y_n) \quad (4.3)$$

4.6 Boyut Analizi

Moncada ve Aguirre (1999)'nun akıma dik olarak yerleştirilen boru hatları etrafındaki rölatif oyulma derinliği (S/D) ve rölatif oyulma çukuru genişliğine (L/D) etki eden boyutsuz parametreler için verdiği 3.9 denklemine atak açısı (α) yerleştirilirse (Şekil 4.5);

$$S/D, L/D = f_1,2(y_n/d_{50}, y_n/D, j_o, y_n/B, Fr, Re, \tau^*, e^*, \alpha) \quad (4.4)$$

bulunur. Bu çalışmada, D akımı karşılayan engel yüksekliği olarak göz önüne alınmış, daire kesitli boruda boru çapı, kutu kesitli boruda kesit yüksekliği D olarak belirlenmiştir. $e^* = e/D$ 'dir. Çalışmada taban malzemesi çapı, kanal eğimi, ve kanal genişlikleri sabit tutulduğundan y_n/d_{50} , j_o , y_n/B ve τ^* , parametreleri dikkate alınmamıştır. Ayrıca çalışmada $e=0$ olduğundan e/D parametresi de inceleme dışında tutulmuştur. Buna göre 4.4 denklemi yeniden yazılırsa;

$$S/D, L/D = f(y_n/D, Fr, Re, \alpha) \quad (4.5)$$

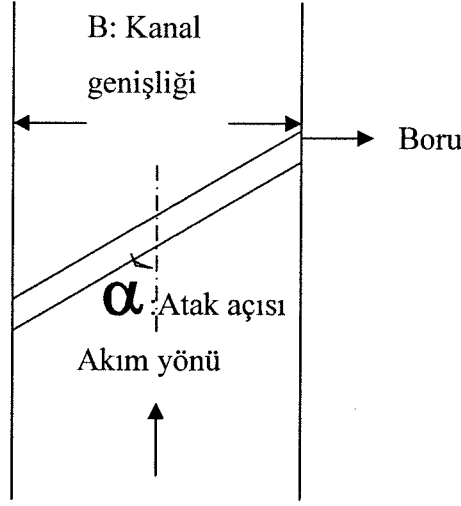
bulunur. Ayrıca denge oyulma derinliği bulunmak istenirse 4.5 denkleminde Fr ve Re yerine V_0/V_{kr} parametresi de dikkate alınabilir. Bu durumda olaya etkiyen boyutsuz parametreler,

$$S/D, L/D = f(y_n/D, V_0/V_{kr}, \alpha) \quad (4.6)$$

olarak elde edilir.

4.7 Ölçek Etkileri

Doğal ortamda, bu çalışmada erişilen rölatif oyulma derinliklerinden (y_n/D) daha büyük derinliklere rastlanabilmektedir. Saha şartlarında y_n/D 'nin 10 ya da daha büyük değerlere ulaşması mümkündür. Oysa y_n/D 'nin 3,5'ten büyük değerlerinde tünel oyulması gerçekleşmesi beklenmemektir. Buna göre saha şartlarında bu tarz bir oyulmaya rastlanması da beklenmez. Ancak gerçekte durum farklıdır. Prototip şartlarda boru hattı etrafında meydana gelen büyük hız ve basınç dalgalanmaları borulanma olayı için gerekli şartların oluşmasını sağlar. Borulanma ile birlikte tünel oyulması da başlamaktadır. Saha şartlarındaki bu büyük türbülans etkileri aynen deney ortamına taşınmamaktadır.



Şekil 4.5 Atak açısı

4.8 Deneylerin Yapılışı

Deneyler, 40 cm genişliğinde, 60 cm yükseklikte ve 12 m uzunluktaki bir kanalda, $j_0=0.001$ eğiminde gerçekleştirilmiştir. Q (debi), mansaba yerleştirilen kalibre edilmiş bir üçgen savak vasıtasıyla ölçülmüştür. Akımı dik kesen 3 cm, 4 cm ve 5 cm çaplarında dairesel kesitli, 3x3 cm, 4x4 cm ve 5x5 cm boyutlarında kutu kesitli borular kullanılmıştır. Ayrıca, akımı 30 ve 60 derecelik atak açıları ile kesen, 3 cm çaplı dairesel kesitli ve 3x3 cm boyutlu kutu kesitli borular da kullanılmıştır. Test kanalı 16 cm kalınlığında kuvars kumu ile doldurulmuştur. Deneyler üniform akım şartlarında yapılmış, denge oyulma derinliğine ulaşıncaya kadar (temiz su oyulması için 1-1,5 saat, hareketli taban için 15-30 dakika) deneylere devam edilmiştir. Bütün deneyler, borular kum taban üzerine yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Akımların debileri, kanal sonundaki üçgen savakta limnimetre vasıtasıyla yapılan savak yüksekliği ölçümleri ile, akım hızları ise üçgen savaktan önceki düşey kapağın yükseltilip alçaltılmasıyla ayarlanmıştır. Bu şekilde, istenen debi ve hızda deneyler yapılabilmiştir. Deney sonucunda oluşan oyulma derinliklerinin saptanması için 0,1 mm hassaslığında bir limnimetre kullanılmıştır. Her deneyden sonra kum taban düzlenerek istenen eğim verilmiştir.

Deneyler sırasıyla, akımı dik kesen 3 cm çaplı dairesel (36 deney) ve 3x3 cm boyutlarında kutu kesitli (32 deney) borular, 4 cm çaplı dairesel (31 deney) ve 4x4 cm boyutlarında kutu kesitli (32 deney) borular, 5 cm çaplı dairesel (25 deney) ve 5x5 cm boyutlarında kutu kesitli (24 deney) borular için ve akımı sırasıyla 60° ve 30° 'lik atak açıları ile kesen 3 cm çaplı dairesel (60 derece için 26, 30 derece için 24 deney) ve 3x3 cm boyutlarında kutu kesitli (60

derece için 24, 30 derece için 24 deney) borular için Çizelge 4.1’de verilen sınır şartlarında yapılmıştır. Böylece toplam 278 deney gerçekleştirilmiştir. Her deneyden sonra aşağıdaki parametreler ölçülmüştür. Q: Debi, y_n : Akımın normal derinliği, S: Boru hattı eksenindeki denge oyulma derinliğinin yüksekliği, L: Denge oyulma çukurunun uzunluğu, S_m : Denge oyulma derinliğinin maksimum olduğu yerde ölçülen yüksekliktir. Ayrıca akımı açılı olarak kesen borularda bu değerler, kanal duvarlarından 2 cm içeride akım yönüne göre sağ sahil ve sol sahilde de ölçülmüştür. Bu şekilde ölçülen oyulma derinliklerinin, kanal duvarının etkilerinden uzak kalması sağlanmıştır.



Çizelge 4.1 Deney sınır şartları

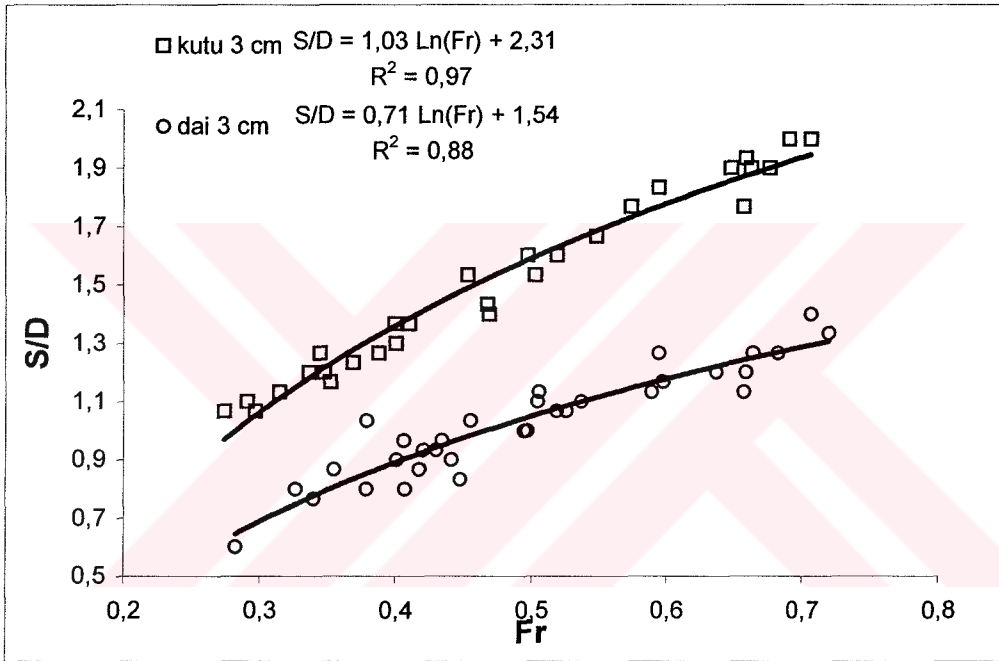
	α atak açısı	D(cm)	Q(lt/s)	y_n (cm)	V(m/s)	τ	Fr	Re
DAİRE	90	3	5,2-68,9	4,7-19	0,22-0,96	0,02-0,09	0,28-0,72	6495,51-28691,8
	90	4	14,1-68,9	8,0-19,5	0,27-0,96	0,04-0,09	0,24-0,72	10820-38255,7
	90	5	14,1-68,9	8,0-21,0	0,31-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	15289,1-45302,8
	60 eksen	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,29-0,91	0,04-0,1	0,27-0,66	8791,25-27181,7
	60 sol sahil	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,29-0,91	0,04-0,1	0,27-0,66	8791,25-27181,7
	60 sağ sahil	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,29-0,91	0,04-0,1	0,27-0,66	8791,25-27181,7
	30 eksen	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,32-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	9590,45-27181,7
	30 sol sahil	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,32-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	9590,45-27181,7
	30 sağ sahil	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,32-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	9590,45-27181,7
KUTU	90	3	12,3-68,9	8,0-20,0	0,29-0,93	0,04-0,1	0,27-0,71	8758,601-27916,3
	90	4	13,0-68,9	8,5-20,0	0,34-0,96	0,04-0,09	0,30-0,72	13422,23- 38255,68
	90	5	14,1-68,9	8,0-21,0	0,31-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	15698,65- 45302,77
	60 eksen	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,32-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	9590,45-27181,66
	60 sol sahil	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,32-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	9590,45-27181,66
	60 sağ sahil	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,32-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	9590,45-27181,66
	30 eksen	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,32-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	9590,45-27181,66
	30 sol sahil	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,32-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	9590,45-27181,66
	30 sağ sahil	3	14,1-68,9	8,0-21,0	0,32-0,91	0,04-0,1	0,29-0,66	9590,45-27181,66

5. DEĞERLENDİRME

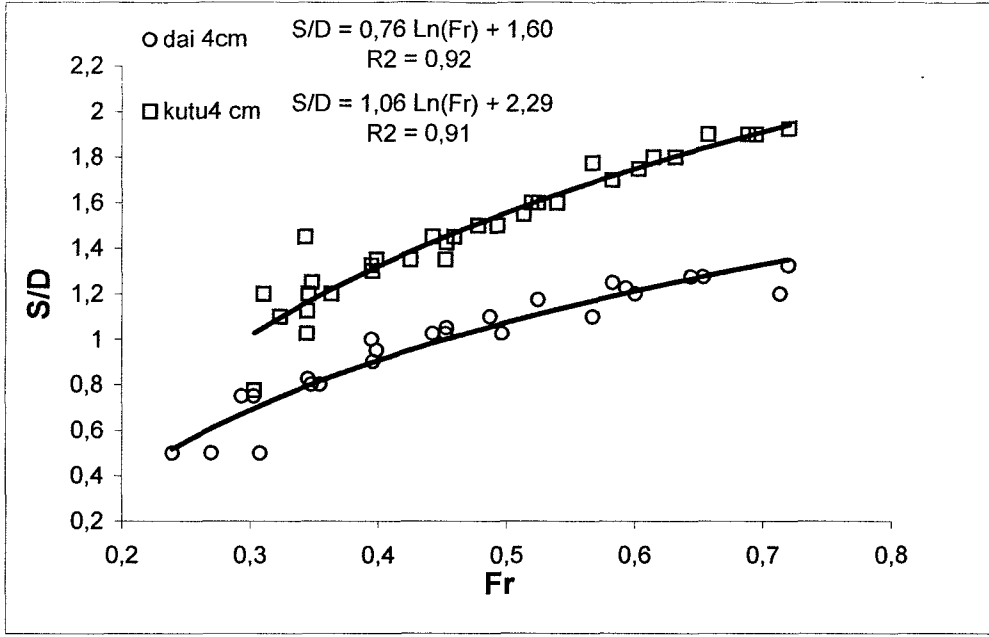
5.1 Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D); Akımın Froude Sayısı (Fr) İle Değişimi

5.1.1 Kum Taban Üzerine Ve Akım Yönüne Dik Olarak Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi

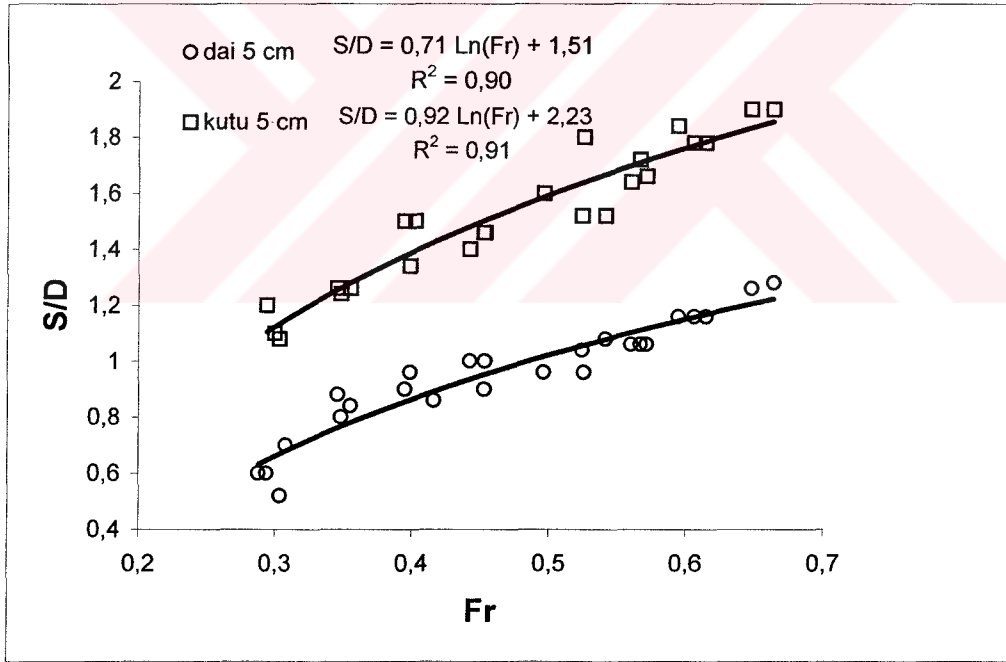
Çalışmanın ilk kısmında rölatif oyulma derinliği S/D'nin yaklaşan akımın Froude sayısı ile değişimi incelenmiştir. Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te sırasıyla 3, 4 ve 5 cm çapındaki dairesel kesitli borular için elde edilen sonuçlar ile, 3x3, 4x4 ve 5x5 cm boyutlu kutu kesitli borular için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.1 3 cm çaplı dairesel boru ile 3x3 cm boyutlu kutu kesit için S/D-Fr değişimi



Şekil 5.2 4 cm çaplı dairesel boru ile 4x4 cm boyutlu kutu kesit için S/D-Fr değişimi

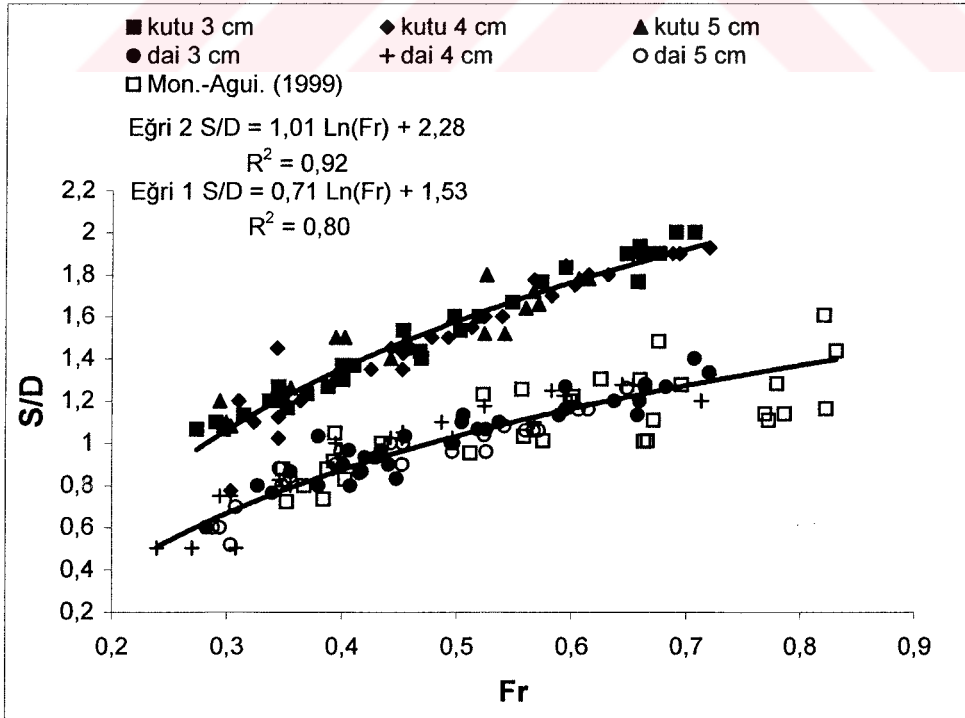


Şekil 5.3 5 cm çaplı dairesel boru ile 5x5 cm boyutlu kutu kesit için S/D-Fr değişimi

Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 incelendiğinde her iki kesit tipi için Froude sayısındaki artışla rölatif oyulma derinliğinin arttığı görülmektedir. Kutu kesitli boruların küt burunlu olmasından dolayı, bu tip borular için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin, dairesel borular için elde edilen sonuçlardan büyük olduğu görülmektedir.

Sınır tabakasından ayrılmaların büyük olmaması için akımın yavaşladığı bölgelerde büyük eğriliklerden ve keskin köşelerden kaçınmak gerektiği bilinmektedir. Kutu kesitli boruda memba ucu yuvarlatılmış olmadığından, boru sırtında sürtünme etkileri daha fazla olup ayrıca ayrılma meydana gelmektedir. Dolayısıyla küt burunlu olan kare kesitli borular etrafında meydana gelen oyulma derinliği daha büyüktür.

Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de elde edilen sonuçlar, Moncada ve Aguirre (1999)’nin dairesel kesitli borular için verdiği verilerle birlikte tekrar değerlendirilerek Şekil 5.4’de verilmiştir. Şekil 5.4’deki 1 no’lu eğri bu çalışmada kullanılan 3, 4 ve 5 cm çapındaki dairesel kesitli borular için elde edilen sonuçlarla Moncada ve Aguirre (1999)’nin çeşitli engel çapları, kanal taban eğimi ve taban malzemesi için elde ettikleri sonuçların birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulmuştur. 2 no’lu eğri ise bu çalışmada 3x3, 4x4 ve 5x5 cm boyutlu kutu kesitli borular için elde edilmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde dairesel kesitli borular için gerek bu çalışma ve gerekse Moncada ve Aguirre (1999)’nin verileri birlikte kullanıldığında elde edilen 1 no’lu eğri iyi bir korelasyon sağlamıştır. Ayrıca Froude sayısındaki artışla boyutsuz oyulma çukuru derinliğinin arttığı görülmektedir. Aynı şekilde kare kesitli boru için de rölatif oyulma derinliğinin akımın Froude sayısı ile arttığı ve dairesel kesitli boruda elde edilen rölatif oyulma derinliğinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu da kare kesitli borunun daha küt burunlu olmasına bağlanabilir.

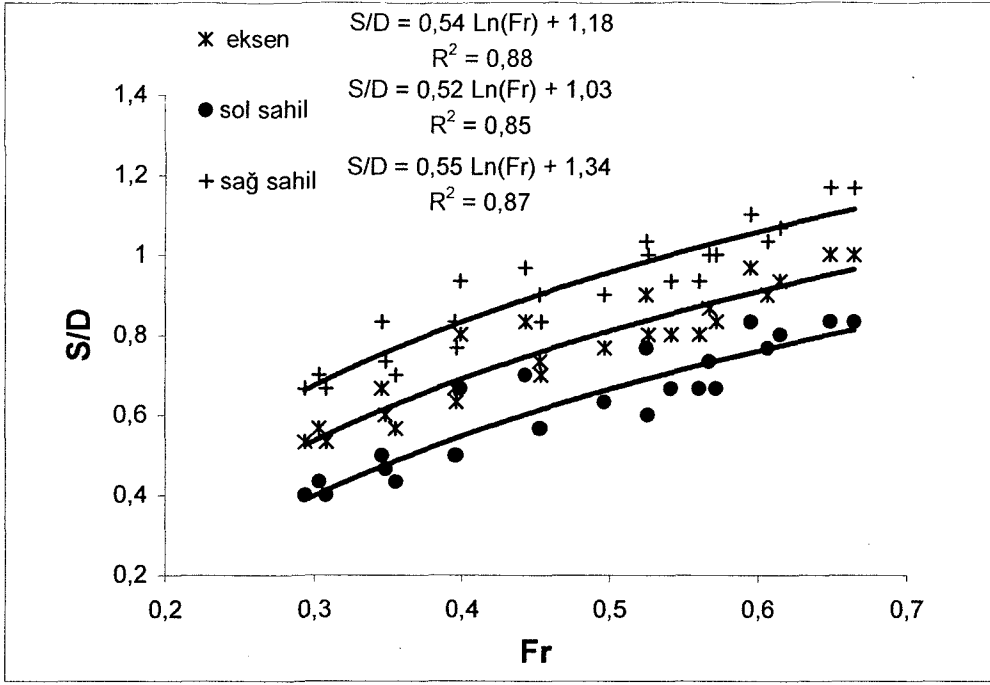


Şekil 5.4 Rölatif oyulma derinliğinin akımın Froude sayısı ile değişimi

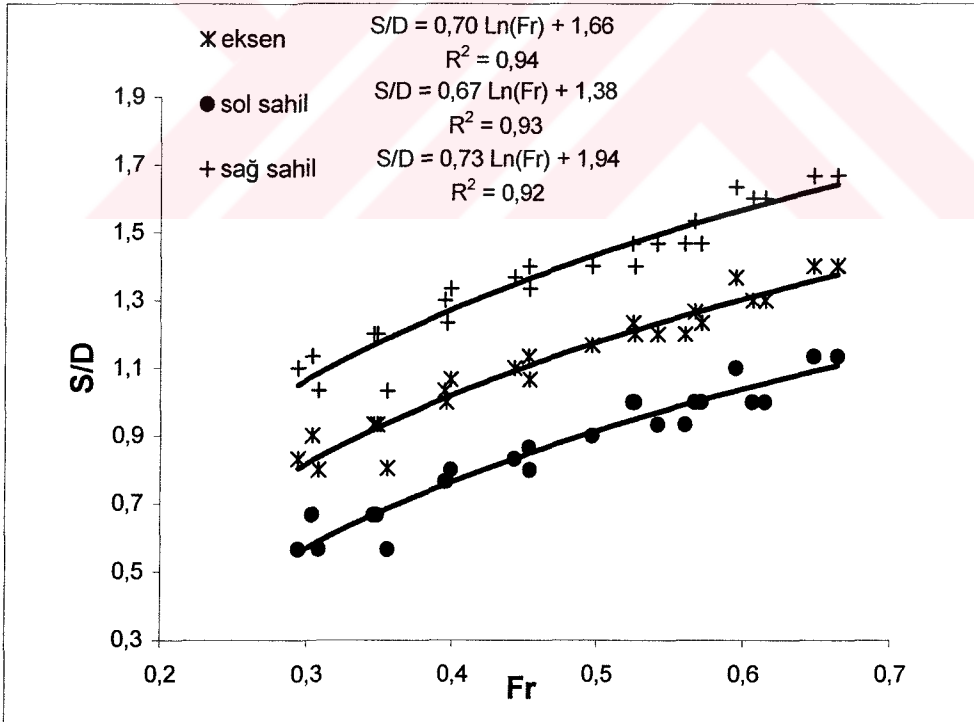
Şekil 5.4’de görülen 3, 4 ve 5 cm çaplı dairesel borular ile 3x3, 4x4 ve 5x5 cm boyutlu kutu kesitli borular için bir arada çizilen eğrilerin aralarında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Ayrıca, Bölüm 3’de bahsi geçen Moncada-Aguirre (1999) ve Maza (1987) isimli araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalarla ve Şekil 3.15’de verilen eğriyle de uyumlu sonuçlara varılmıştır. Moncada-Aguirre’nin (1999) deney sonuçlarına bakıldığında $Fr \rightarrow 0$ ’a yaklaşırken S/D ’nin 0,55’e gittiği görülmektedir. Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 incelendiğinde $Fr \rightarrow 0$ ’a giderken, daire kesitli borular için $S/D \approx 0,25-0,30$, kutu kesitli borular için $S/D \approx 0,45-0,50$ olduğu görülmektedir. Bu fark, adı geçen araştırmacıların sınırlı sayıda deney yapmaları ve farklı kanal eğimi, taban malzemesi çapı ve engel çapları için tek bir eğri elde etmelerinden kaynaklanmıştır.

5.1.2 Kum Taban Üzerine, Akıma 30°’lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi

Çalışmanın bu kısmında kum taban üzerine, akımı 30°’lik atak açısı ile kesecek şekilde 3 cm çapında dairesel ve 3x3 cm boyutunda kutu kesitli engeller yerleştirilmiştir. Yerleştirilen bu engellerin sağ ve sol sahillerinde ve kanal ekseninde limnimetre ile ölçümler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmiştir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da görüldüğü üzere, akımı 30°’lik atak açısı ile kesen bu engellerin sağ sahil, sol sahil ve kanal ekseninde elde edilen eğrilerin arasında paralellik olduğu, engelin akımla ilk temas ettiği nokta olan sol sahilinde en az oyulmanın gerçekleştiği, eksen ve sağ sahilinde ise oyulma derinliğinin arttığı görülmüştür. Engelin akımı 30°’lik atak açısı ile kesmesi ve dolayısıyla su önce sol sahile, sonra kanal eksenine geldiğinden, kinetik enerjisinde bir artma meydana gelmektedir. Kinetik enerjideki bu değişim sebebiyle sağ sahildeki su yükü arttığından maksimum oyulmalar bu noktada görülmüştür. Her iki şekilde de tüm eğrilerin iyi bir korelasyon sağladığı görülmektedir.



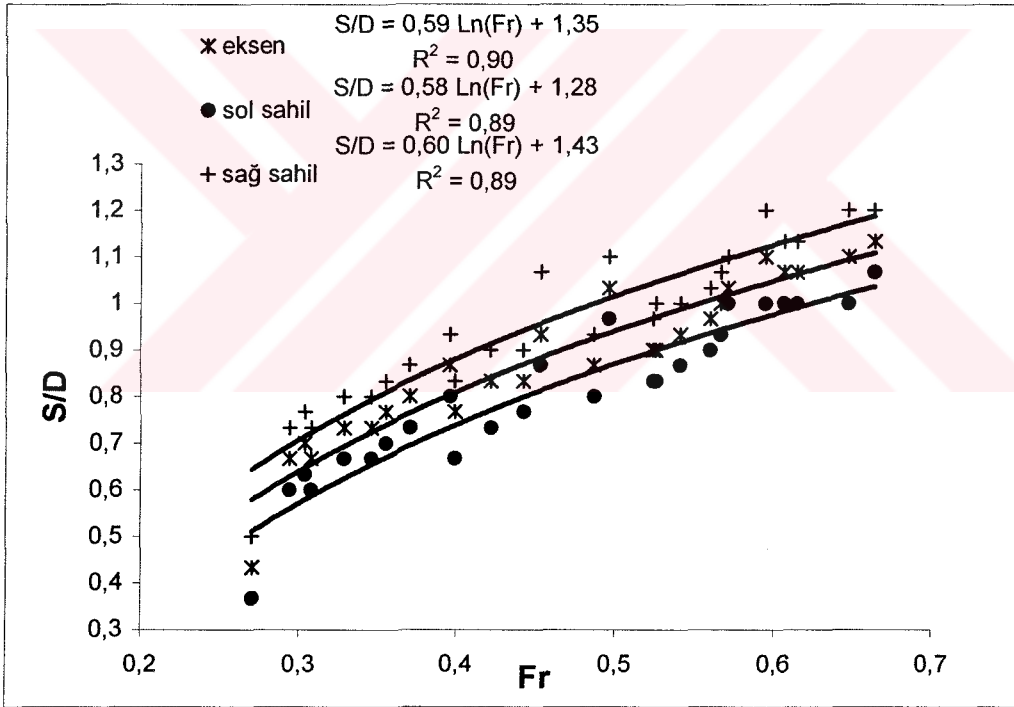
Şekil 5.5 Akımı 30° 'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve eksen için çizilen, S/D - Fr değişimi grafikleri



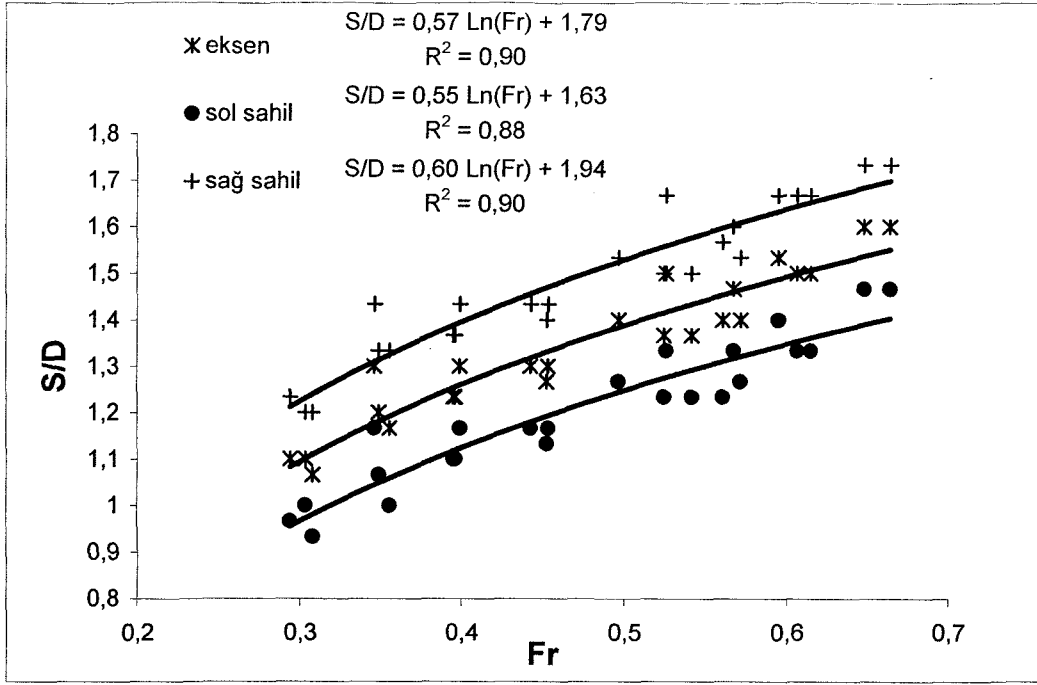
Şekil 5.6 Akımı 30° 'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ, sol ve eksen kısımları için çizilen, S/D - Fr değişimi grafikleri

5.1.3 Kum Taban Üzerine, Akıma 60°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi

Çalışmanın bu kısmında kum taban üzerine, akımı 60°'lik atak açısı ile kesecek şekilde 3 cm çapında dairesel ve 3x3 cm boyutunda kutu kesitli engeller yerleştirilmiştir. Yerleştirilen bu engellerin sağ ve sol sahillerinde ve kanal ekseninde limnimetre ile ölçümler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de görüldüğü üzere, akımı 60°'lik atak açısı ile kesen bu engellerin sağ sahil, sol sahil ve kanal ekseninde elde edilen eğrilerin arasında paralellik olduğu, engelin akımla ilk temas ettiği nokta olan sol sahilinde en az oyulmanın gerçekleştiği, eksen ve sağ sahilinde ise oyulmanın arttığı görülmüştür. Engelin akımı 60°'lik atak açısı ile kesmesi ve dolayısıyla suyun önce sol sahile, sonra eksene geleceğinden, kinetik enerjisinde bir artma meydana gelecektir. Kinetik enerjideki bu değişim sebebiyle sağ sahildeki su yükü artmış, maksimum oyulmalar bu noktada görülmüştür.



Şekil 5.7 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve eksenini için çizilen, S/D-Fr değişimi grafikleri



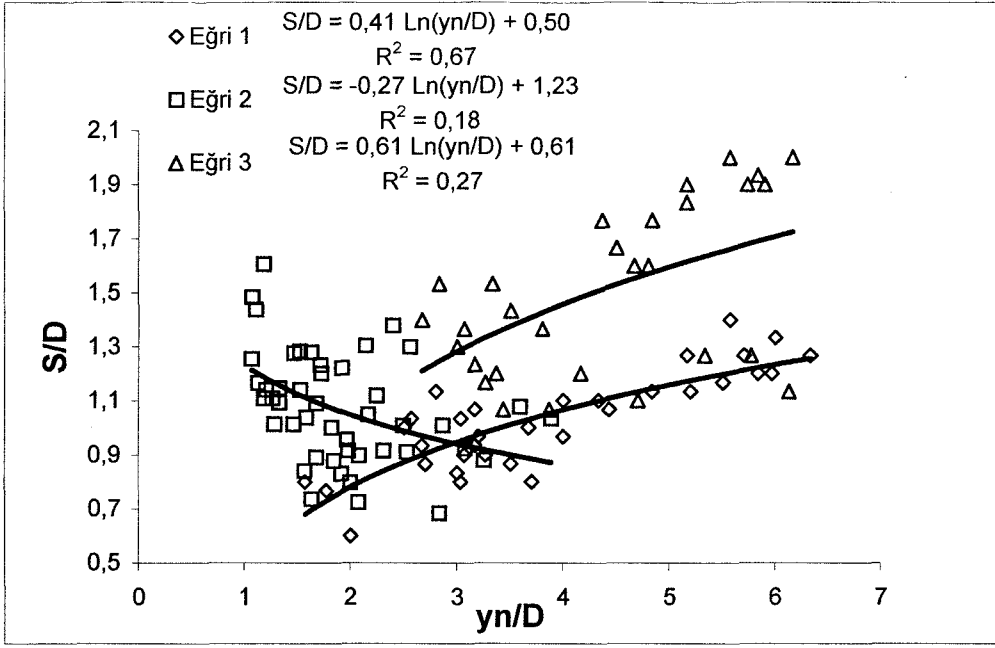
Şekil 5.8 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve eksen için çizilen, S/D-Fr değişimi grafikleri

5.2 Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D); Rölatif Akım Derinliği (y_n/D) İle İlişkisi

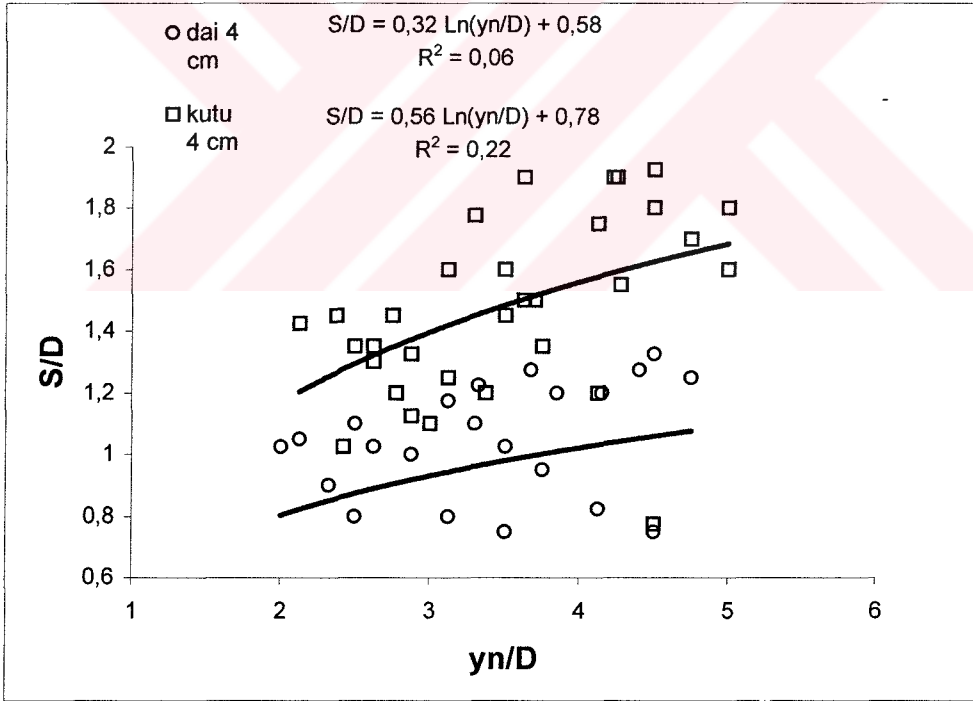
5.2.1 Kum Taban Üzerine, Akım Yönüne Dik Olarak Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Rölatif Akım Derinliği İle Değişimi

Şekil 5.9'da rölatif oyulma derinliğinin (S/D) rölatif akım derinliği (y_n/D) ile değişimi verilmiştir. Şekil 5.9'da 1 nolu eğri bu çalışmada kullanılan 3 cm çaplı dairesel boru, 2 nolu eğri Moncada ve Aquirre'nin çeşitli çaptaki dairesel borular ve 3 nolu eğri ise bu çalışmada kullanılan kare kesitli boru için elde edilen sonuçları temsil etmektedir. Moncada-Aguirre (1999)'nin verilerinden elde edilen 2 nolu eğri çeşitli çaptaki borular ve taban malzemesi için sınırlı sayıdaki veri ile elde edildiğinden y_n/D 'nin etkisi görülememiştir. Bu çalışma y_n/D 'nin daha geniş bir aralığında gerçekleştirildiğinden rölatif oyulma derinliğine etkisi her iki kesit tipi için de daha açık bir şekilde görülmüş ve y_n/D 'deki artışla S/D'nin arttığı tespit edilmiştir. Ancak, deney sonuçlarına bakılarak, S/D ile y_n/D arasında net bir ilişki görülememiştir. Bu sonuç regresyon katsayılarının düşük olmasından da anlaşılmaktadır. Bu ilişkinin daha geniş y_n/D aralıklarında test edilmesi gerekmektedir.

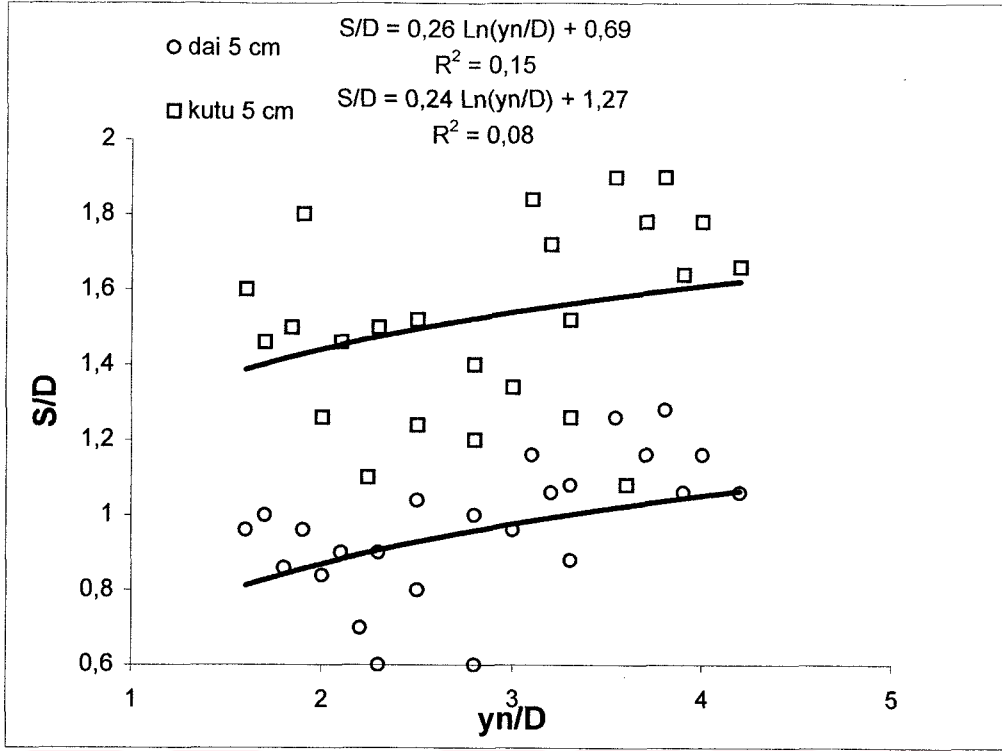
Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de sırasıyla 4 ve 5 cm çapındaki dairesel kesitli borular için elde edilen sonuçlar ile, 4x4 ve 5x5 cm boyutlu kutu kesitli borular için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



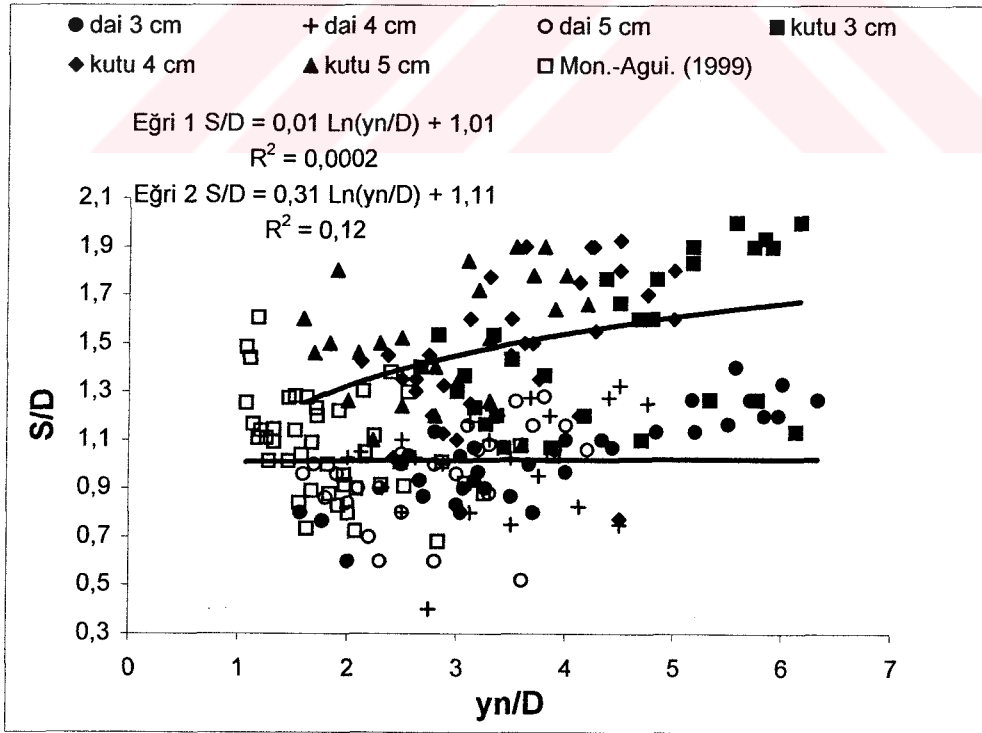
Şekil 5.9 Rölatif oyulma derinliğinin rölatif akım derinliği ile değişimi.



Şekil 5.10 4 cm çaplı dairesel boru ve 4x4 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölatif oyulma derinliklerinin rölatif akım derinlikleri ile değişimi



Şekil 5.11 5 cm çaplı dairesel boru ve 5x5 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölâtif oyulma derinliklerinin rölâtif akım derinlikleri ile değişimi

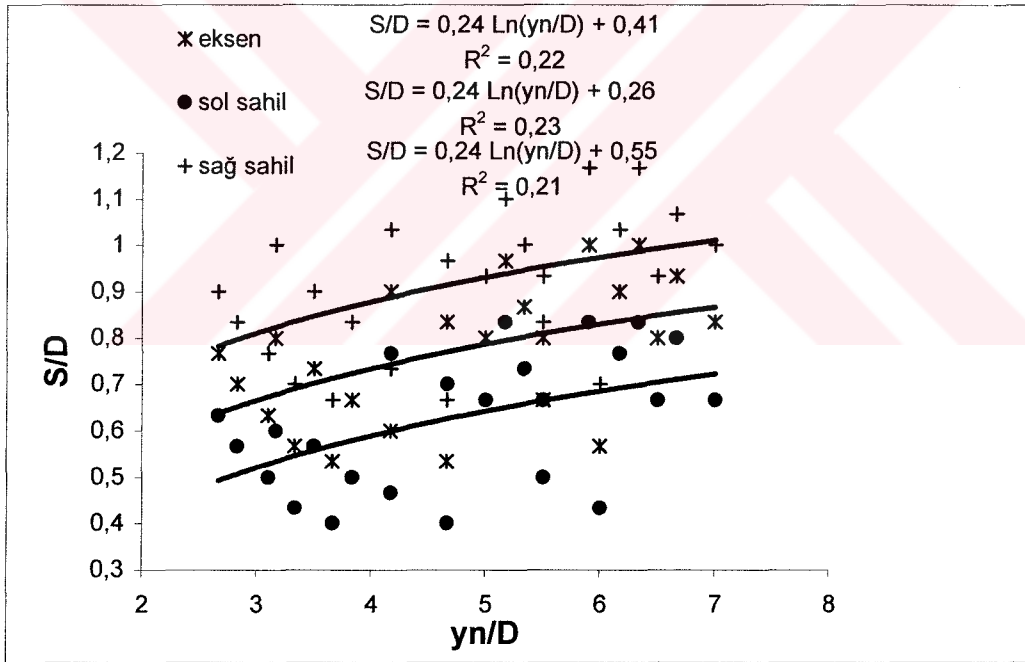


Şekil 5.12 Dairesel ve kutu kesitli borular için bulunan rölâtif oyulma derinliklerinin rölâtif akım derinlikleri ile değişimi

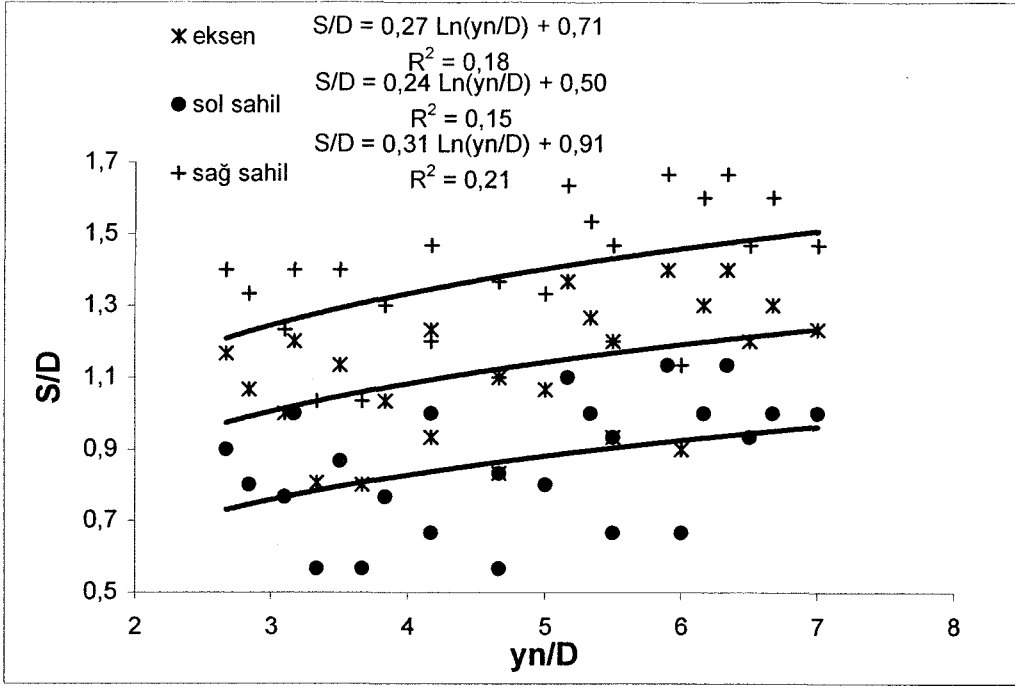
Şekil 5.12’de 1 no’lu eğri, akıma dik yerleştirilen tüm çaplardaki dairesel borular ile Moncada-Aguirre’nin (1999) vermiş oldukları veriler için çizilmiş eğridir. 2 no’lu eğri ise, akıma dik yerleştirilen tüm çaplardaki kutu kesitli borular için elde sonuçları gösteren eğridir. Bu şekilden görüldüğü gibi S/D - y_n/D ilişkisi net olarak belirlenememiştir.

5.2.2 Kum Taban Üzerine, Akıma 30°’lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Rölatif Akım Derinliği İle Değişimi

Deney sonuçlarına bakılarak Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 çizilmiştir. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de görüldüğü üzere, akımı 30°’lik atak açısı ile kesen bu engellerin sağ sahil, sol sahil ve kanal eksenleri için çizilen eğrilerin arasında paralellik olduğu, engelin akımla ilk temas ettiği nokta olan sol sahilinde rölatif akım derinliklerine karşılık gelen rölatif oyulma derinliklerinin, eksen ve sağ sahiline nispeten daha küçük kaldığı görülmüştür. Yine bu şekillere bakılarak kutu kesit için çizilen eğrinin, dairesel kesitli engel için çizilen eğriden yukarıda gerçekleştiği görülmüştür. Ancak her iki şekilde de iyi bir korelasyon sağlanamamıştır.



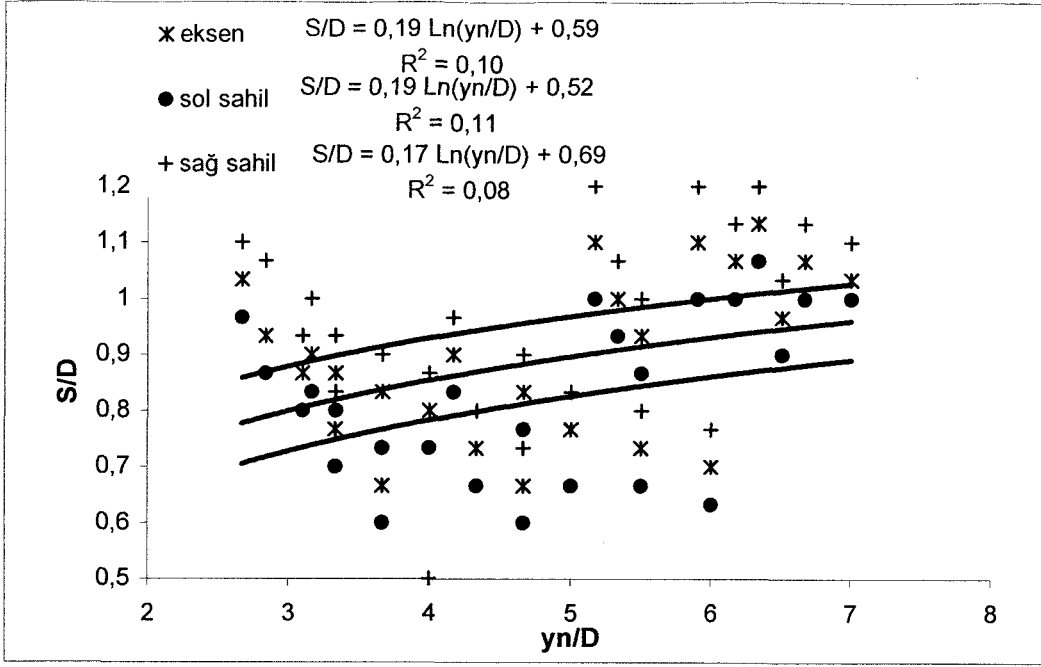
Şekil 5.13 Akımı 30°’lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-rölatif akım derinliği değişimi grafikleri



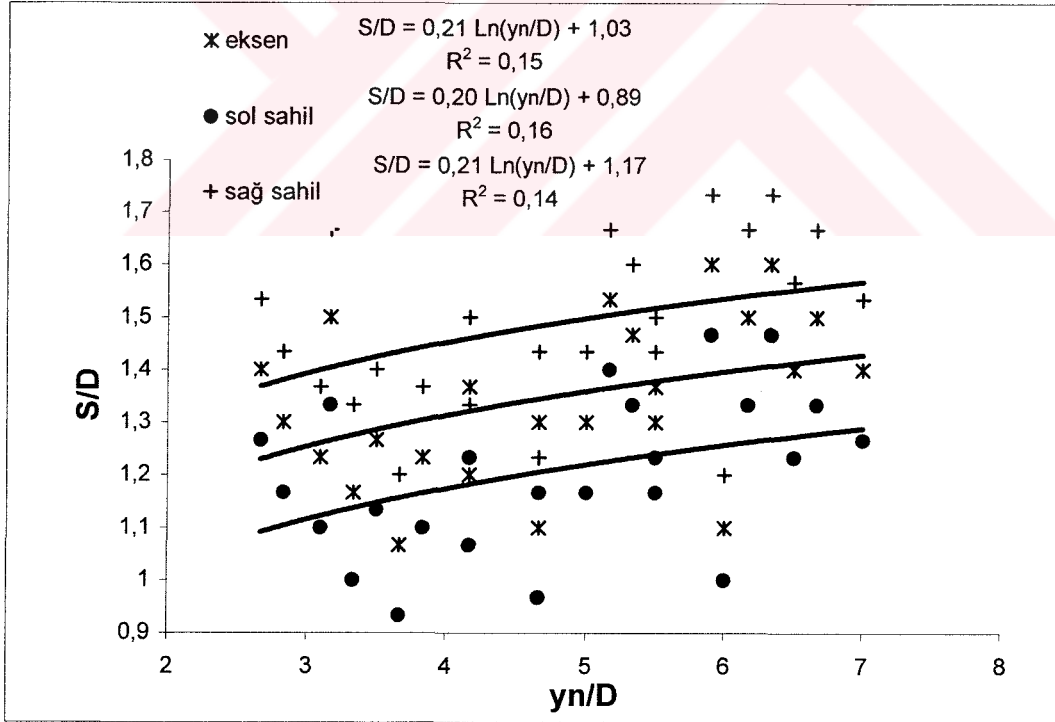
Şekil 5.14 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3x3cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve eksenini için çizilen, rölatif oyulma derinliği-rölatif akım derinliği değişimi grafikleri

5.2.3 Kum Taban Üzerine, Akıma 60°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Rölatif Akım Derinliği İle Değişimi

Deney sonuçlarına bakılarak Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 çizilmiştir. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da görüldüğü üzere, akıma 60°'lik atak açısı ile kesen bu engellerin sağ sahil, sol sahil ve kanal eksenini için çizilen eğrilerin arasında paralellik olduğu, engelin akımla ilk temas ettiği nokta olan sol sahilinde rölatif akım derinliklerine karşılık gelen rölatif oyulma derinliklerinin, kanal eksenini ve sağ sahiline nispeten daha küçük kaldığı görülmüştür. Yine bu şekillere bakılarak kutu kesit için çizilen eğrinin, dairesel kesitli engel için çizilen eğriden yukarıda gerçekleştiği görülmüştür. Aynı şekilde $S/D - y_n/D$ ilişkisinin iyi bir regresyon sağlamadığı görülmektedir.



Şekil 5.15 Akımı 60° 'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-rölatif akım derinliği değişimi grafikleri

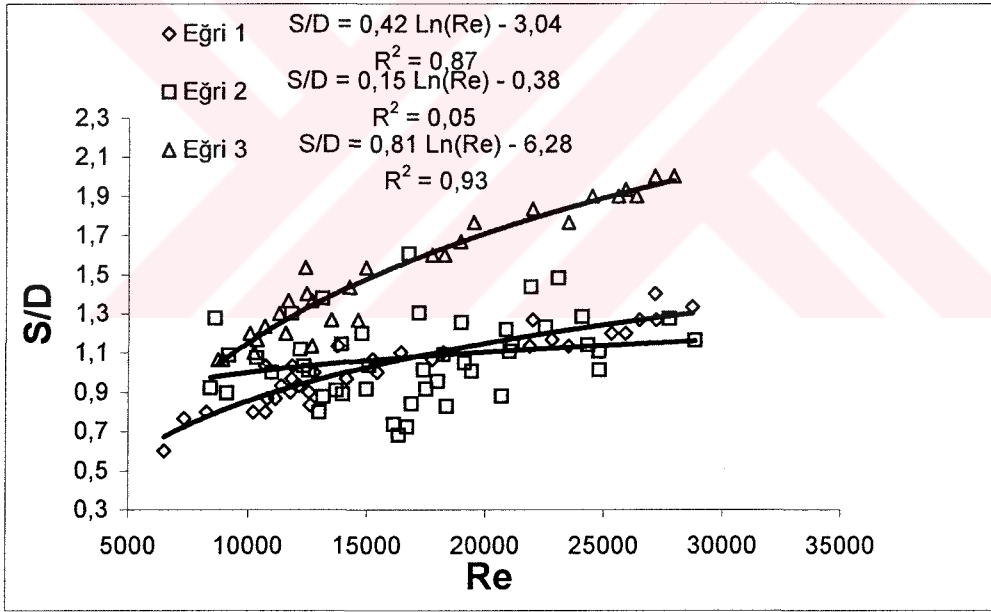


Şekil 5.16 Akımı 60° 'lik atak açısı ile kesen 3x3cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-rölatif akım derinliği değişimi grafikleri

5.3 Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D); Boru Reynolds Sayısı (Re) İle İlişkisi

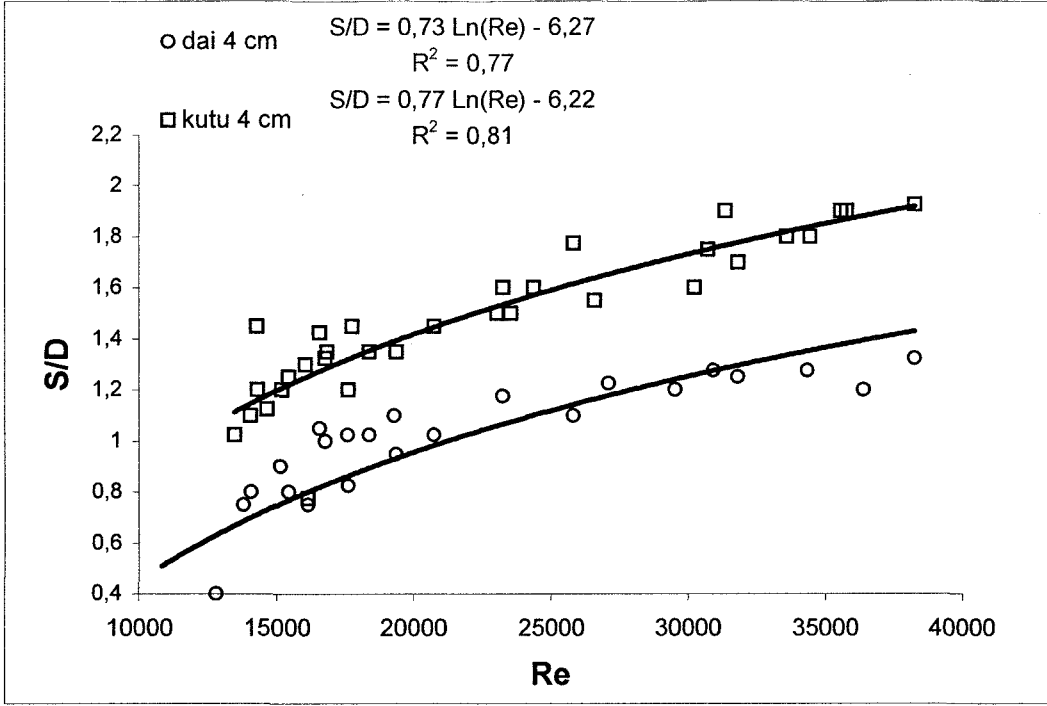
5.3.1 Kum Taban Üzerine, Akıma Dik Olarak Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Boru Reynolds Sayısı İle Değişimi

Şekil 5.17’de rölatif oyulma derinliğinin boru Reynolds sayısı ile değişimi verilmiştir. Şekil 5.17’deki 1 nolu eğri bu çalışmadaki 3 cm’lik dairesel kesitli boru, 2 nolu eğri Moncada ve Aguirre (1999)’nin çeşitli çaptaki dairesel borular ve 3 nolu eğri bu çalışmada kullanılan 3x3 cm’lik kare kesitli boru için elde edilen deney sonuçlarından elde edilmiştir. 2 nolu eğri çeşitli çaptaki borular ve taban malzemesi için sınırlı sayıdaki veri ile elde edildiğinden regresyonu oldukça küçük kalmıştır. Bu çalışmada elde edilen 1 ve 3 nolu eğrilerin oldukça iyi bir regresyona sahip oldukları görülmektedir. Dolayısıyla, Moncada ve Aguirre (1999)’nin belirttiğinin aksine rölatif oyulma derinliğinin boru Reynolds sayısının artışı ile de arttığı görülmektedir. Oysa Moncada ve Aguirre (1999), yaptıkları çalışmalarında S/D ve Re arasında net bir ilişki olmadığını belirtmişler ve boru Reynolds sayısının oyulma çukuru üzerindeki etkisini ihmal etmişlerdir.

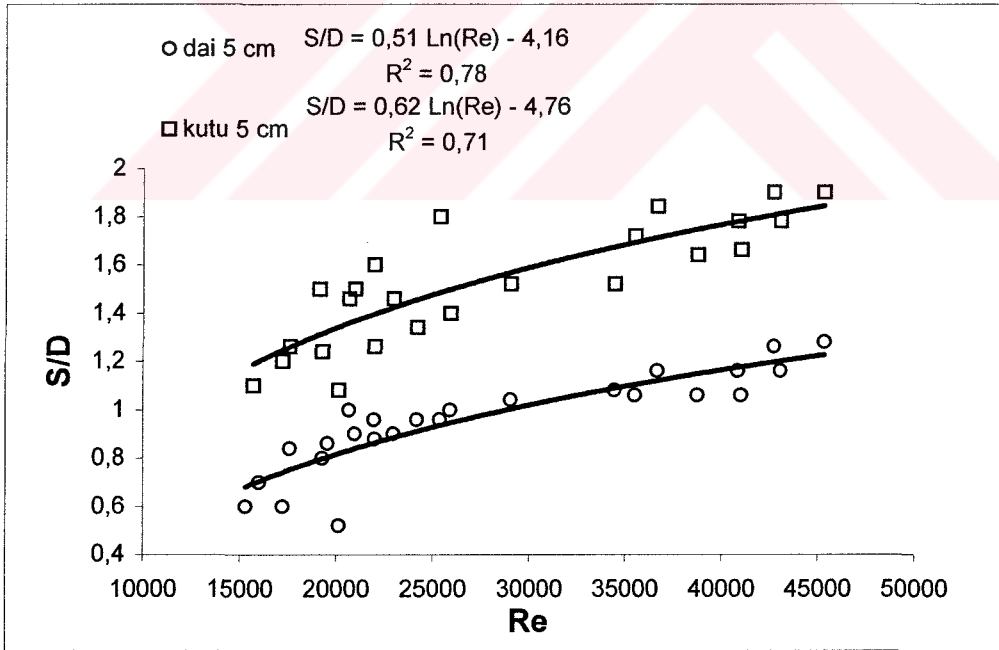


Şekil 5.17 Rölatif oyulma derinliğinin boru Reynolds sayısı ile değişimi

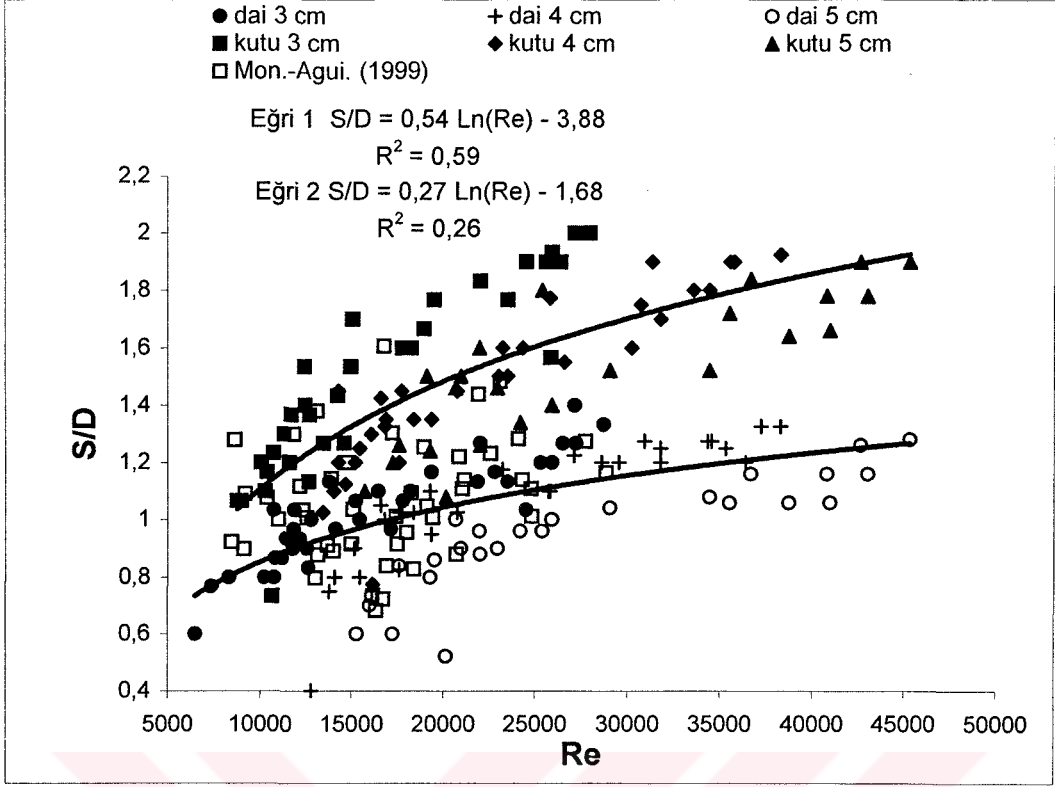
Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da sırasıyla 4 ve 5 cm çapındaki dairesel kesitli borular için elde edilen sonuçlar ile, 4x4 ve 5x5 cm boyutlu kutu kesitli borular için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.18 4 cm çaplı dairesel boru ve 4x4 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölatif oyulma derinliklerinin boru Reynolds sayıları ile değişimi



Şekil 5.19 5 cm çaplı dairesel boru ve 5x5 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleşen rölatif oyulma derinliklerinin boru Reynolds sayıları ile değişimi



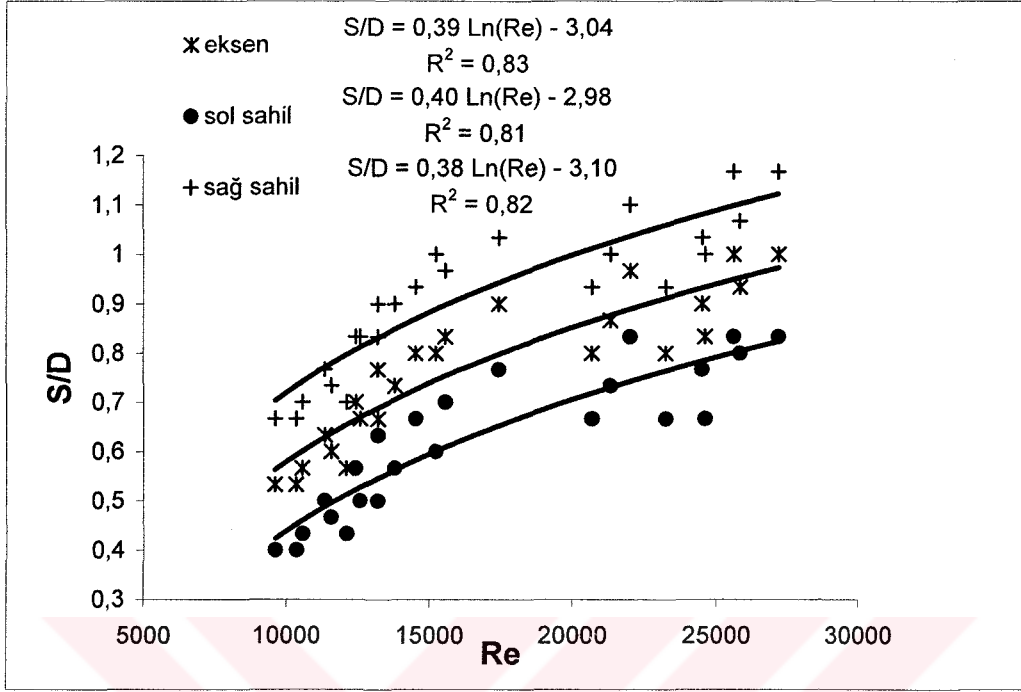
Şekil 5.20 Dairesel ve kutu kesitli borular için bulunan rölatif oyulma derinliklerinin boru Reynolds sayıları ile değişimi

Şekil 5.20’de dairesel ve kutu kesitli borular için yapılmış deneyler karşılaştırılmıştır. Çalışmamızda kullanılan dairesel borular ile Moncaga-Aguirre’nin (1999) dairesel borular için elde ettiği veriler birleştirilerek 2 no’lu eğri elde edilmiştir. 1 no’lu eğride ise kutu kesitli borular için elde edilmiş sonuçlar görülmektedir. Şekil 5.20’de görüldüğü gibi boru Reynolds sayısının artışıyla rölatif oyulma derinliğinin de arttığı görülmüştür. Ancak, veriler birleştirilerek elde edilmiş Şekil 5.20’de regresyonun düştüğü, yani dağılımın çoğaldığı görülmüştür. Böylece boru çap ve boyutlarının da S/D-Re ilişkisini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.

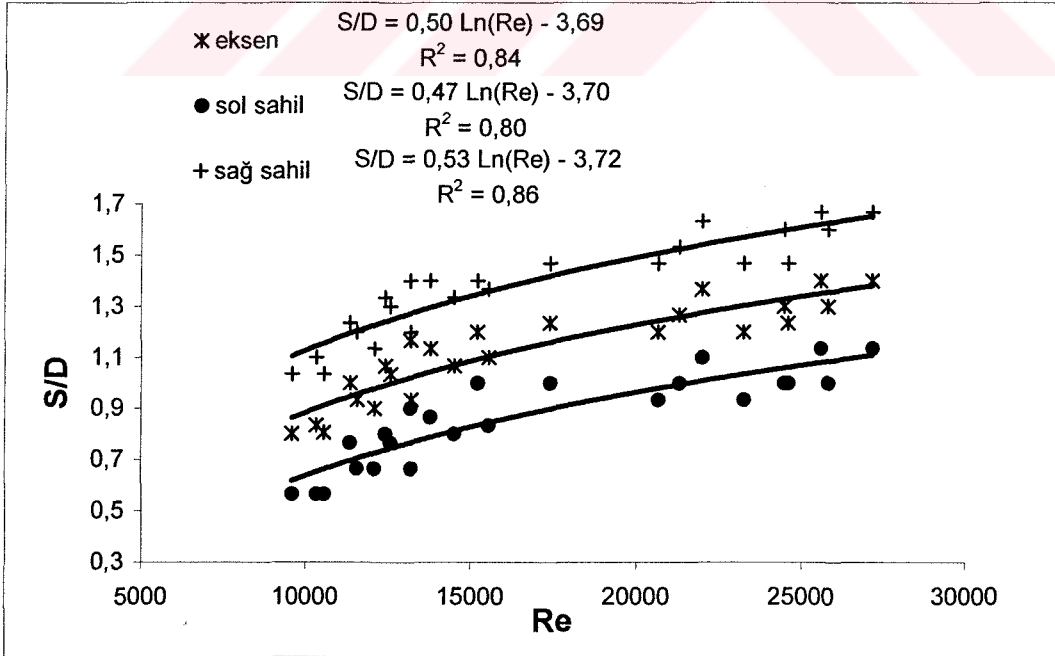
5.3.2 Kum Taban Üzerine, Akıma 30°’lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Boru Reynolds Sayısı İle Değişimi

Deney sonuçlarına bakılarak Şekil 5.21 ve Şekil 5.22 çizilmiştir. Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de görüldüğü üzere, akımı 30°’lik atak açısı ile kesen bu engellerin , sağ sahil, sol sahil ve kanal eksenini için çizilen eğrilerin arasında paralellik olduğu, engelin akımla ilk temas ettiği nokta olan sol sahilinde boru Reynolds sayılarına karşılık gelen rölatif oyulma derinliklerinin, eksen ve sağ sahiline nispeten daha küçük kaldığı görülmüştür. Yine bu şekillere bakılarak kutu

kesit için çizilen eğrinin, dairesel kesitli engel için çizilen eğriden yukarıda gerçekleştiği görülmüştür.



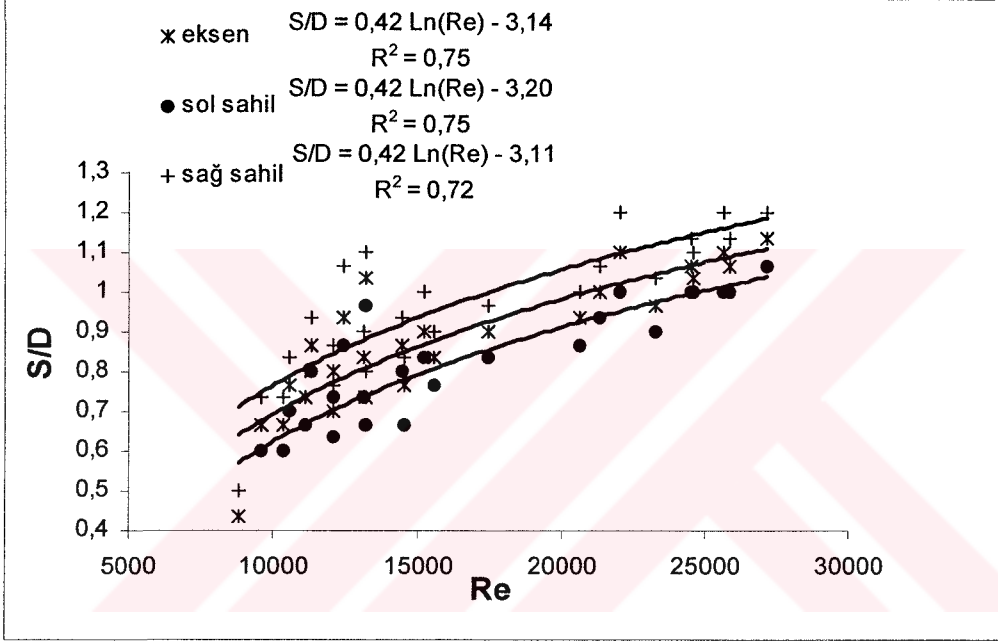
Şekil 5.21 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve eksen için çizilen, rölatif oyulma derinliği-Reynolds sayısı değişimi grafikleri



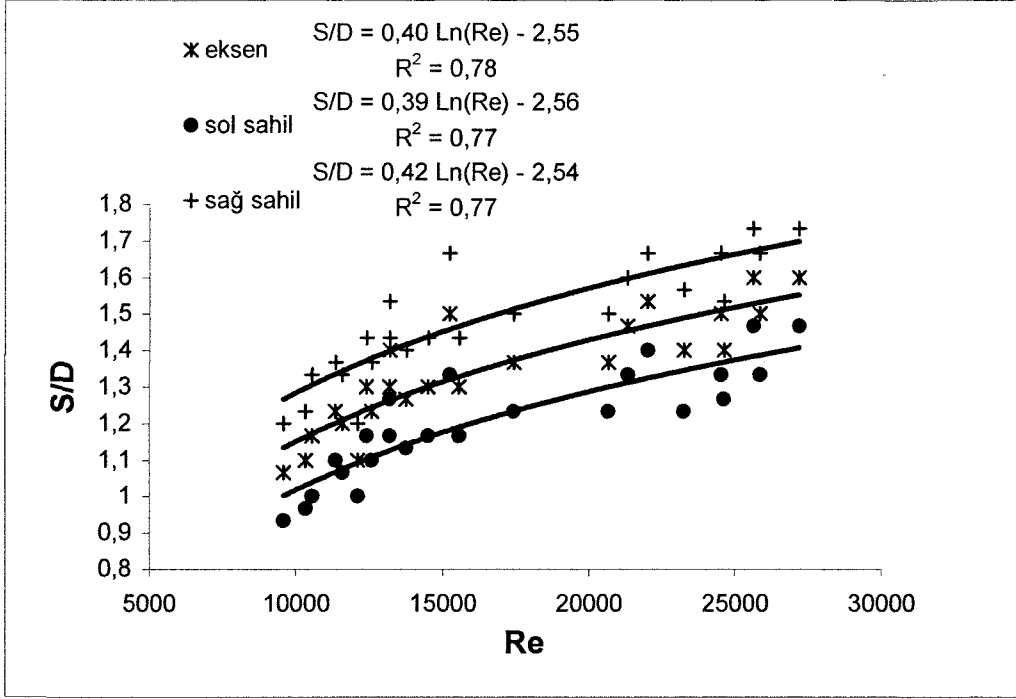
Şekil 5.22 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3x3cm boyutunda kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve eksen için çizilen, rölatif oyulma derinliği-Reynolds sayısı değişimi grafikleri

5.3.3 Kum Taban Üzerine, Akıma 60°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Derinliklerinin Boru Reynolds Sayısı İle Değişimi

Deney sonuçlarına bakılarak Şekil 5.23 ve Şekil 5.24 çizilmiştir. Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’de görüldüğü üzere, akımı 60°'lik atak açısı ile kesen bu engellerin sağ, sol ve kanal ekseni için çizilen eğrilerin arasında paralellik olduğu, engelin akımla ilk temas ettiği nokta olan sol sahilinde boru Reynolds sayılarına karşılık gelen rölatif oyulma derinliklerinin, kanal ekseni ve sağ sahiline nispeten daha küçük kaldığı görülmüştür. Yine bu şekillere bakılarak kutu kesit için çizilen eğrinin, dairesel kesitli engel için çizilen eğriden yukarıda gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 5.23 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği- Reynolds sayısı değişimi grafikleri

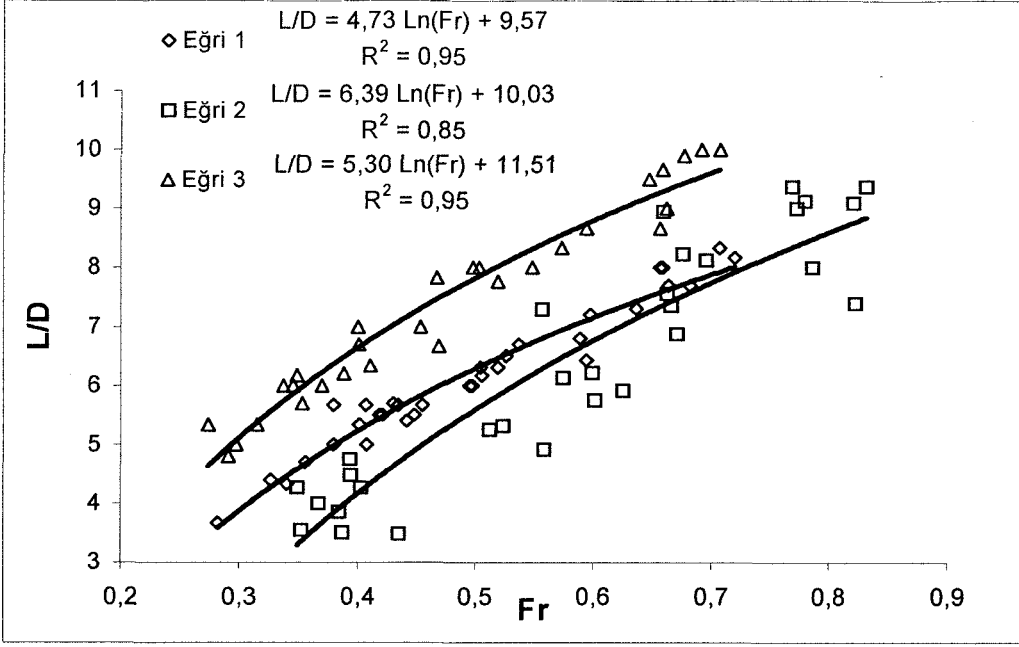


Şekil 5.24 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutundaki kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni için çizilen, rölatif oyulma derinliği-Reynolds sayısı değişimi grafikleri

5.4 Rölatif Oyulma Çukuru Genişliğinin (L/D); Akımın Froude Sayısı (Fr) İle İlişkisi

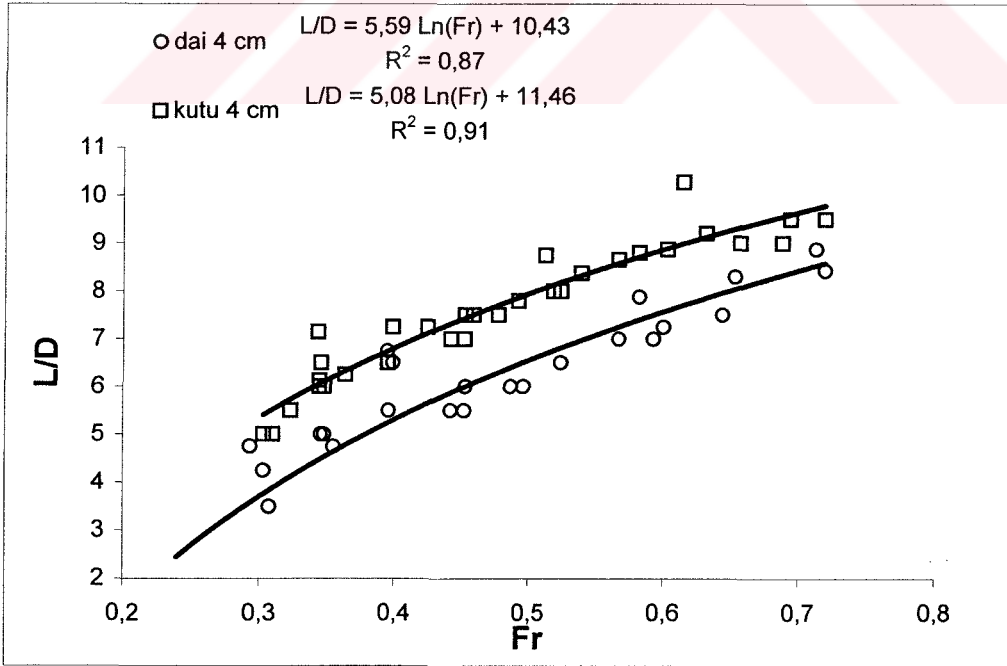
5.4.1 Kum Taban Üzerine Ve Akım Yönüne Dik Olarak Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Çukuru Genişliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi

Şekil 5.25'de Rölatif oyulma çukuru genişliğinin (L/D) Froude sayısı ile değişimi verilmiştir. Şekil 5.25'deki 1 nolu eğri bu çalışmadaki 3 cm'lik dairesel kesitli boru, 2 nolu eğri Moncada ve Aguirre (1999)'nin çeşitli çaptaki dairesel borular ve 3 nolu eğri bu çalışmada kullanılan 3x3 cm'lik kare kesitli boru için elde edilen deney sonuçlarından oluşturulmuştur. Her üç eğriden de görüldüğü gibi rölatif oyulma çukuru genişliğinin Froude sayısı ile arttığı ve kare kesit için elde edilen oyulma çukuru genişliğinin dairesel kesit için elde edilen değerlerden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Moncada ve Aguirre (1999) de Fr ile L/D arasında iyi bir ilişki olduğunu tespit etmiş ve L/D=1 için Fr→0'a yaklaştığını belirtmişlerdir. Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27 incelendiğinde Fr→0'a giderken, daire kesitli borular için L/D≈0,50-1, kutu kesitli borular için L/D≈2-2,50 olduğu görülmektedir. Aradaki bu küçük fark, adı geçen araştırmacıların sınırlı sayıda deney yapmaları ve farklı kanal eğimi, taban malzemesi çapı ve engel çapları için tek bir eğri elde etmelerinden kaynaklanmıştır.

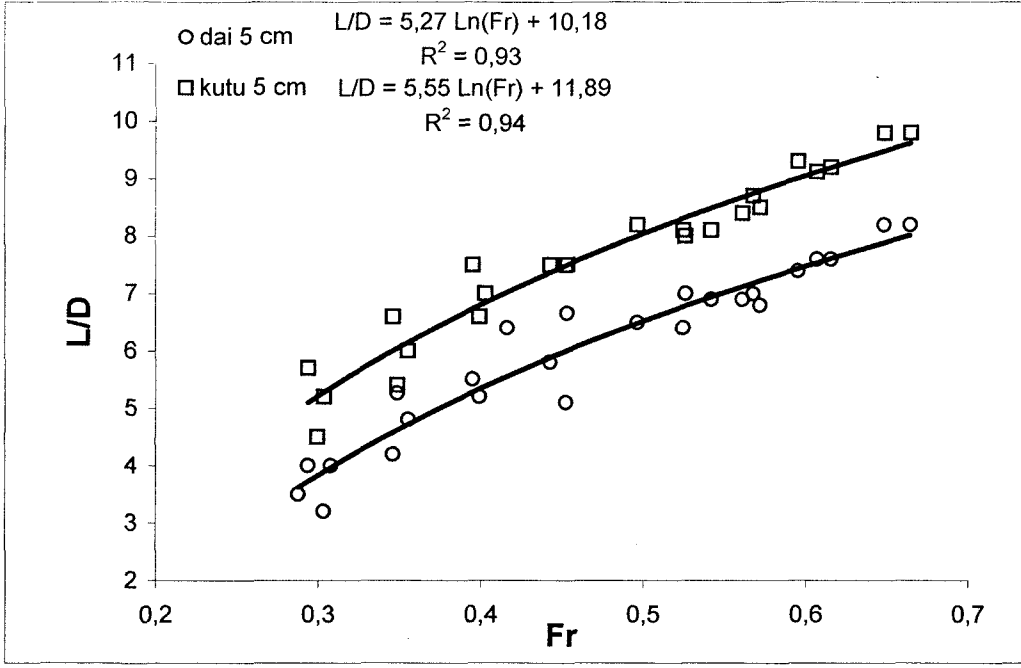


Şekil 5.25 L/D'nin Froude sayısı ile değişimi

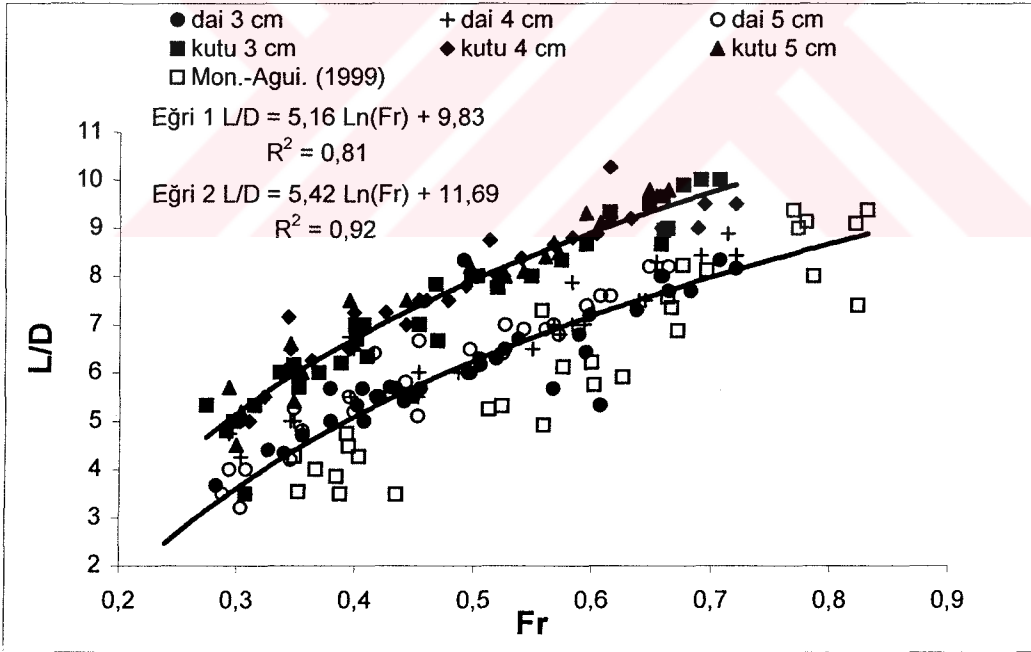
Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de görüldüğü gibi kutu kesitli borular için çizilen eğrilerin dairesel borular için çizilen eğrilerden yukarıda çıktığı ve bu eğrilerin hemen hemen paralel olduğu görülmüştür.



Şekil 5.26 4 cm çaplı dairesel boru ve 4x4 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleştirilen rölatif oyulma çukuru genişliklerinin akımın Froude sayıları ile değişimi



Şekil 5.27 5 cm çaplı dairesel boru ve 5x5 cm boyutlu kutu kesit için gerçekleştirilen rölâtif oyulma çukuru genişliklerinin akımın Froude sayıları ile değişimi



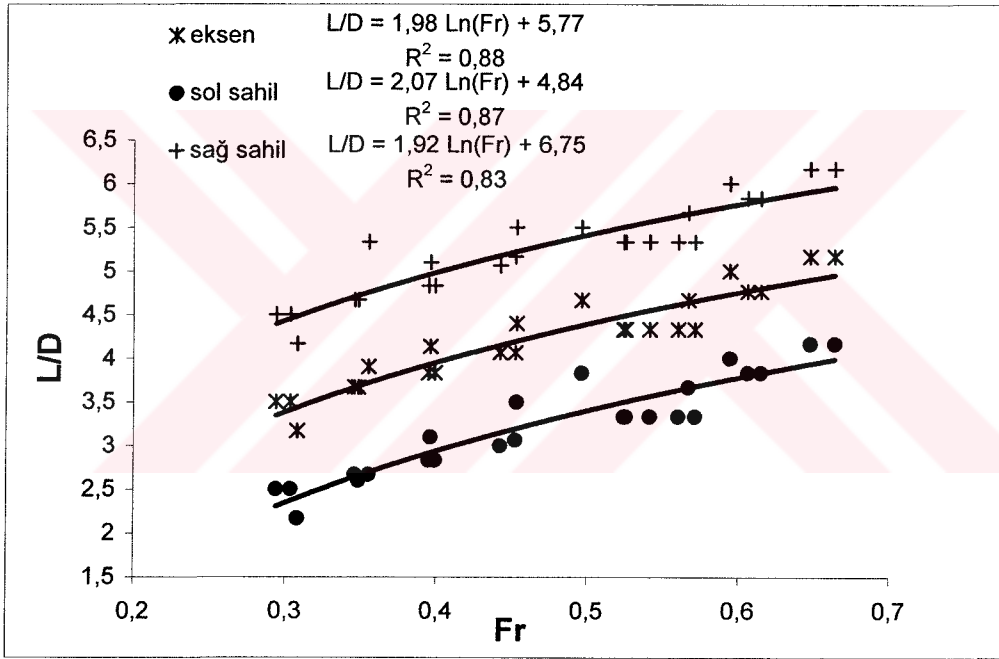
Şekil 5.28 Dairesel ve kutu kesitli borular için bulunan rölâtif oyulma çukuru genişliklerinin akımın Froude sayıları ile değişimi

Şekil 5.28'de Eğri 1, dairesel borular için, Eğri 2, kutu kesitli borular için çizilmiş eğrilerdir. Şekil 5.28'de görüldüğü gibi dairesel ve kutu kesitli borular için çizilen eğrilerin paralel

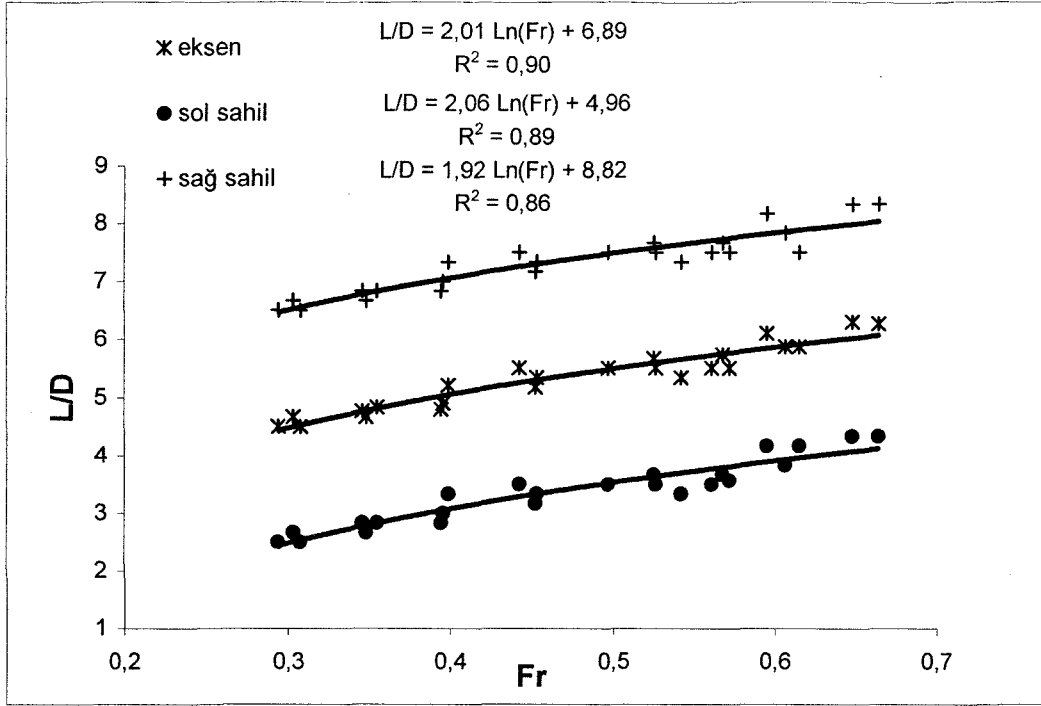
olduğu ve kutu kesit için daha büyük oyulma genişliğine erişildiği belirlenmiştir.

5.4.2 Kum Taban Üzerine, Akıma 30°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Çukuru Genişliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi

Deney sonuçlarına bakılarak Şekil 5.29 ve Şekil 5.30 çizilmiştir. Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da görüldüğü üzere, akımı 30°'lik atak açısı ile kesen bu engellerin sağ sahil, sol sahil ve kanal eksenini için çizilen eğrilerin arasında paralellik olduğu, engelin akımla ilk temas ettiği nokta olan sol sahilinde akımın Froude sayısına karşılık gelen rölatif oyulma çukuru genişliklerinin, kanal eksenini ve sağ sahiline nispeten daha küçük kaldığı görülmüştür. Yine bu şekillere bakılarak kutu kesit için çizilen eğrinin, dairesel kesitli engel için çizilen eğriden yukarıda gerçekleştiği görülmüştür.



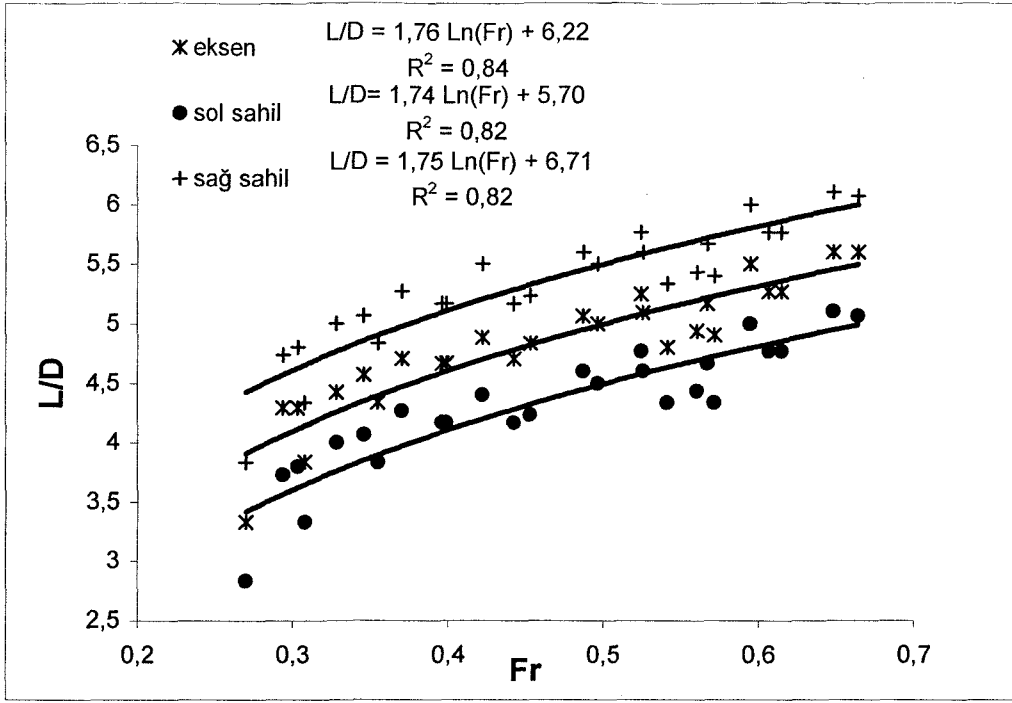
Şekil 5.29 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve eksenini için çizilen, rölatif oyulma çukuru genişliği-Froude sayısı değişimi grafikleri



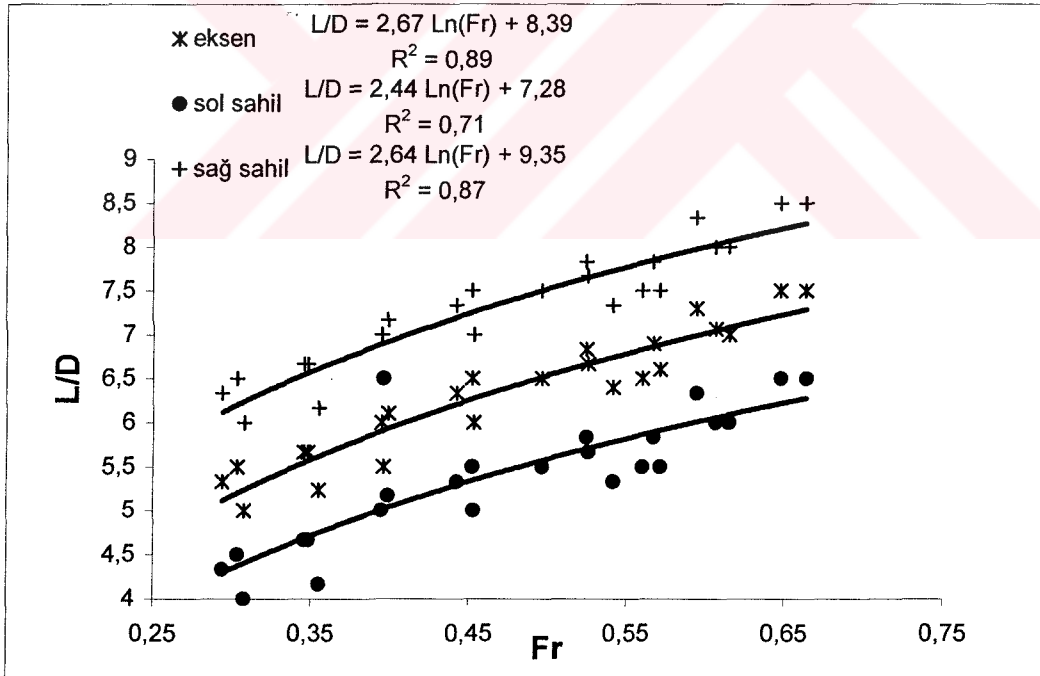
Şekil 5.30 Akımı 30°'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutundaki kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve ekseni çizilen, rölatif oyulma çukuru genişliği-Froude sayısı değişimi grafikleri

5.4.3 Kum Taban Üzerine, Akıma 60°'lik Atak Açısı İle Yerleştirilen Engeller Etrafındaki Rölatif Oyulma Çukuru Genişliklerinin Akımın Froude Sayısı İle Değişimi

Deney sonuçlarına bakılarak Şekil 5.31 ve Şekil 5.32 çizilmiştir. Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de görüldüğü üzere, akımı 60°'lik atak açısı ile kesen bu engellerin sağ sahil, sol sahil ve kanal ekseni için çizilen eğrilerin arasında paralellik olduğu, engelin akımla ilk temas ettiği nokta olan sol sahilinde akımın Froude sayısına karşılık gelen rölatif oyulma çukuru genişliklerinin, kanal ekseni ve sağ sahiline nispeten daha küçük kaldığı görülmüştür. Yine bu şekillere bakılarak kutu kesit için çizilen eğrinin, dairesel kesitli engel için çizilen eğriden yukarıda gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 5.31 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3 cm çapındaki dairesel engelin, sağ sahil, sol sahil ve eksenini çizilen, rölatif oyulma çukuru genişliği-Froude sayısı değişimi grafikleri

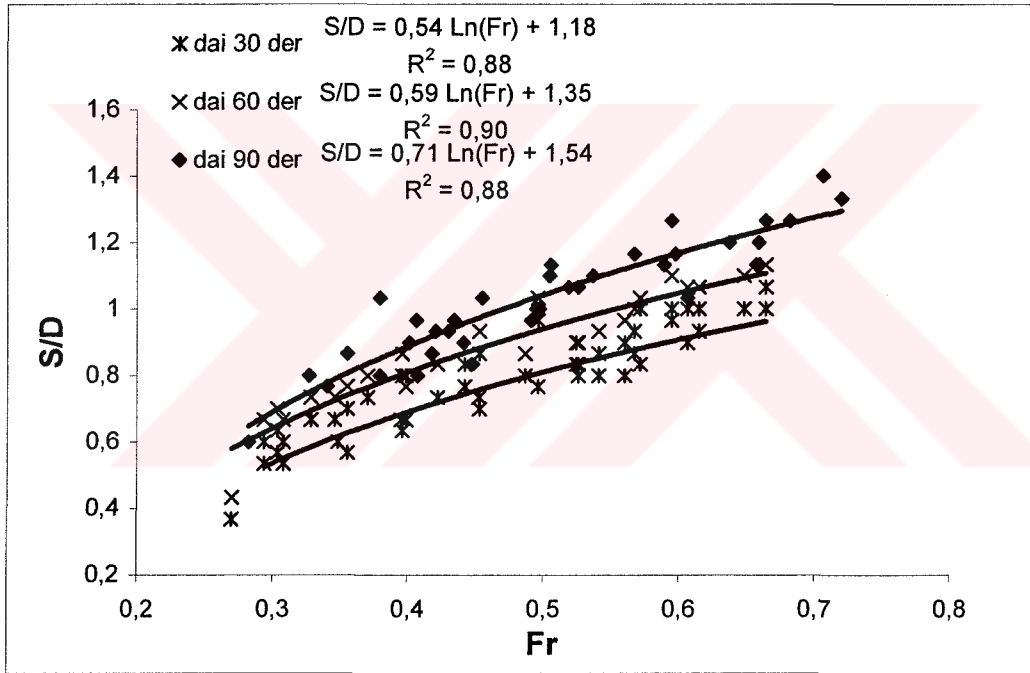


Şekil 5. 32 Akımı 60°'lik atak açısı ile kesen 3x3 cm boyutundaki kutu kesitli engelin, sağ sahil, sol sahil ve eksenini çizilen, rölatif oyulma çukuru genişliği-Froude sayısı değişimi grafikleri

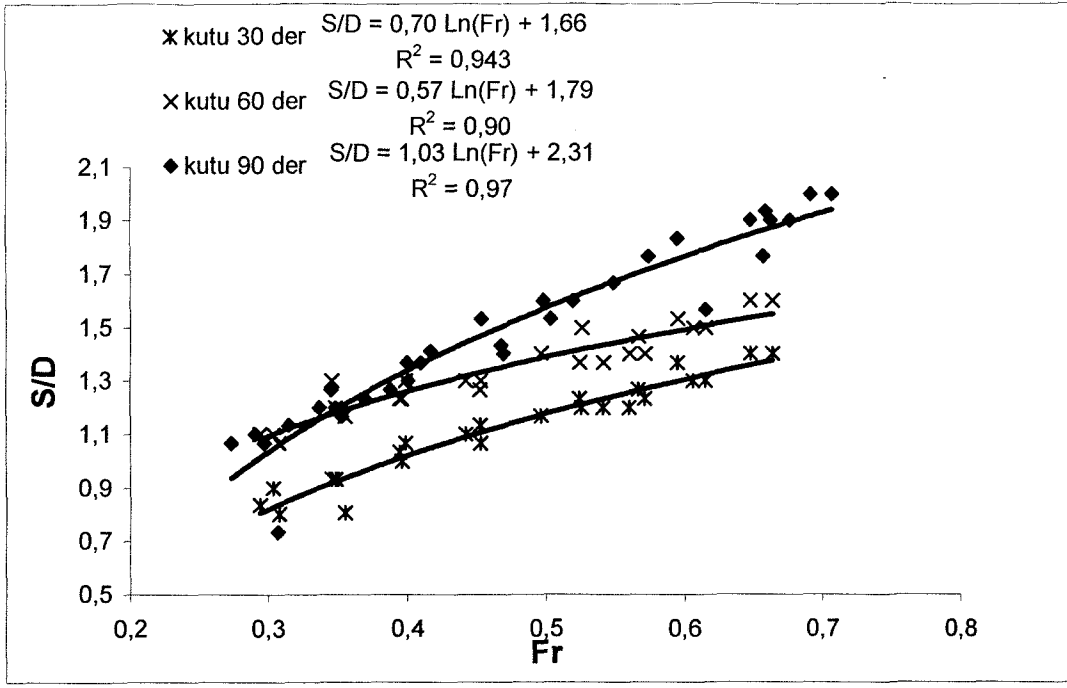
5.5 Oyulma Çukurunun Atak Açısı İle Değişimi

Aşağıdaki şekillerde akım yönüne $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açılarıyla yerleştirilmiş daire ve kutu kesitli borular için aynı akım şartlarında rölatif oyulma derinlikleri ve genişliklerinin atak açıları ile değişimi verilmiştir. Her iki rölatif büyüklüğün de atak açısıyla birlikte arttığı görülmektedir. Veri olarak 3 cm çapında dairesel borular ve 3x3 cm boyutlu kutu kesitli borular için kanal ekseninde yapılan ölçümler kullanılmıştır.

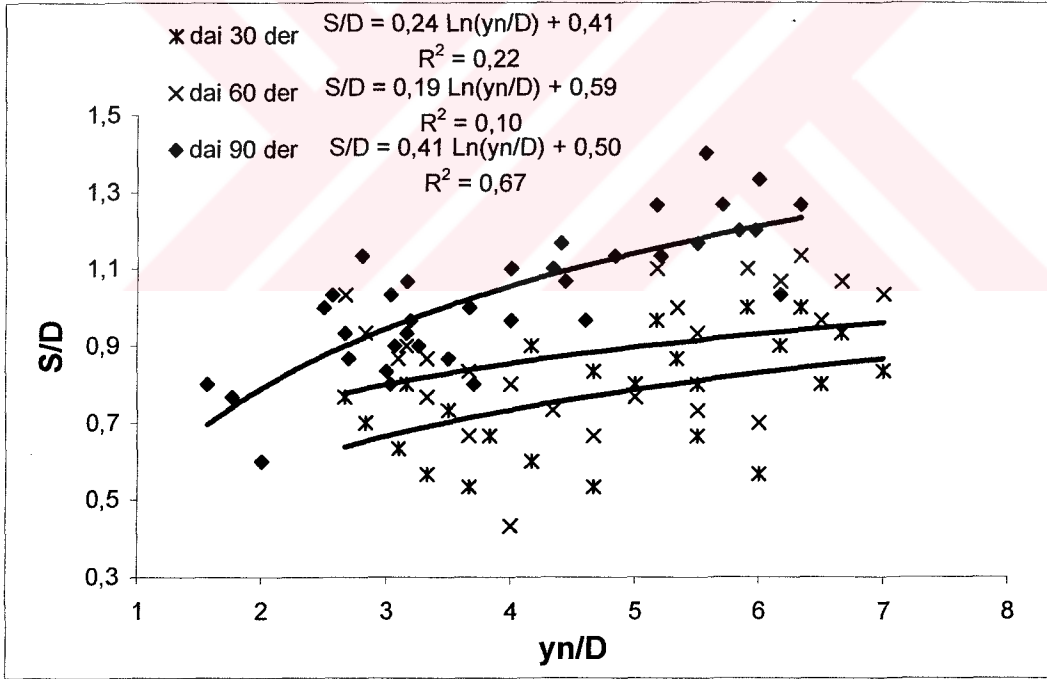
Daha önce de bahsedildiği gibi Mao (1988), borunun kesit alanının atak açısına bağımlı olduğunu ve yapı akım çizgilerine uyum sağlamayan bir kesite sahipse vorteks saçılımlarının büyüyerek erozyon miktarını artırdığını belirtmiştir. Atak açısıyla yaklaşan akım, engeli gördüğü izdüşüm kesitiyle değişmekte ve oyulma çukuru atak açısının küçülmesine bağlı olarak küçülmektedir.



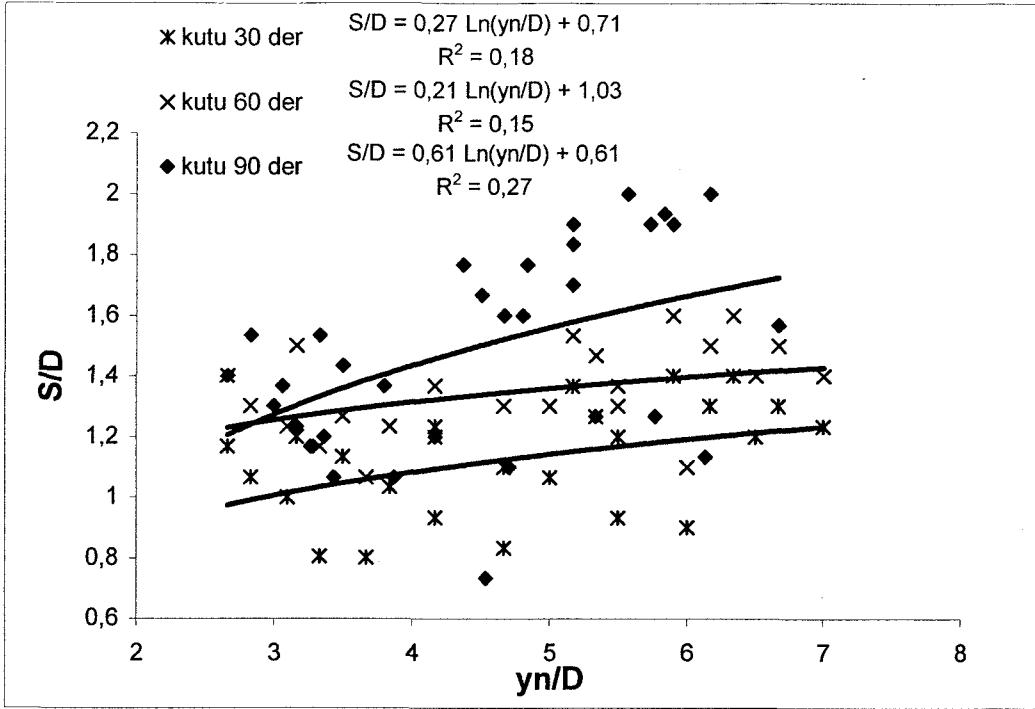
Şekil 5.33 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için dairesel kesitli borular etrafındaki S/D-Fr ilişkisi



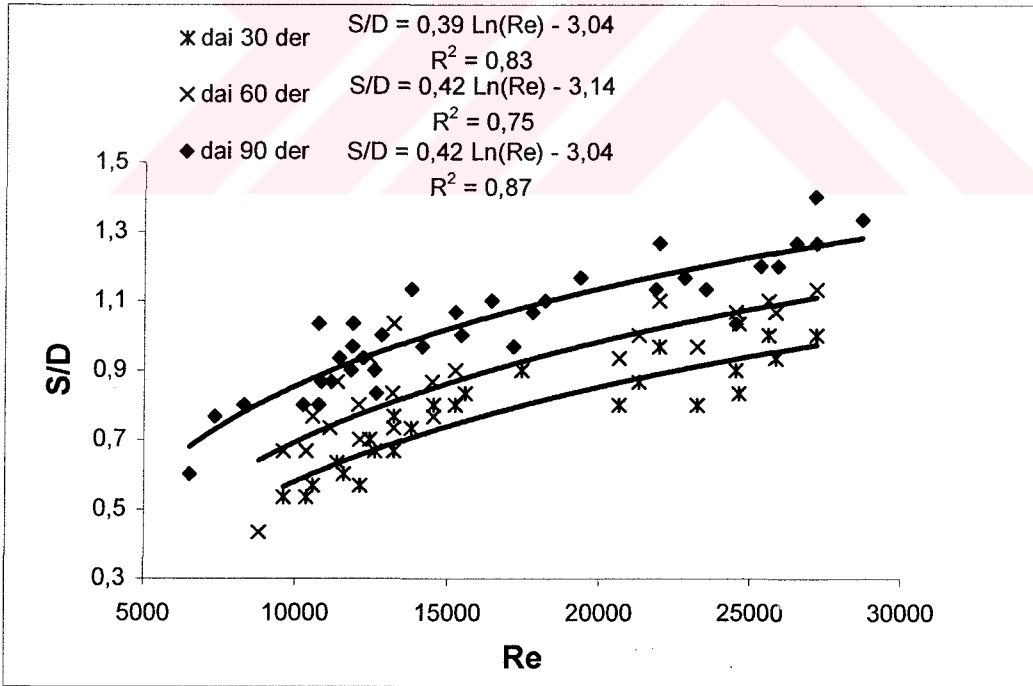
Şekil 5.34 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için kutu kesitli borular etrafındaki S/D-Fr ilişkisi



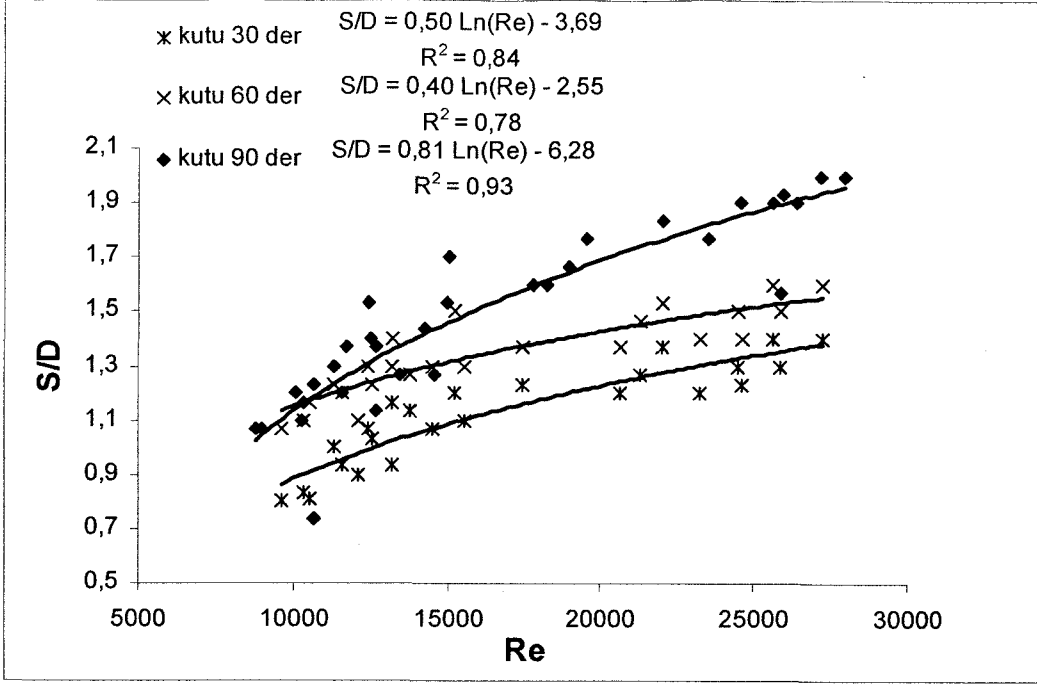
Şekil 5.35 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için dairesel kesitli borular etrafındaki S/D- yn/D ilişkisi



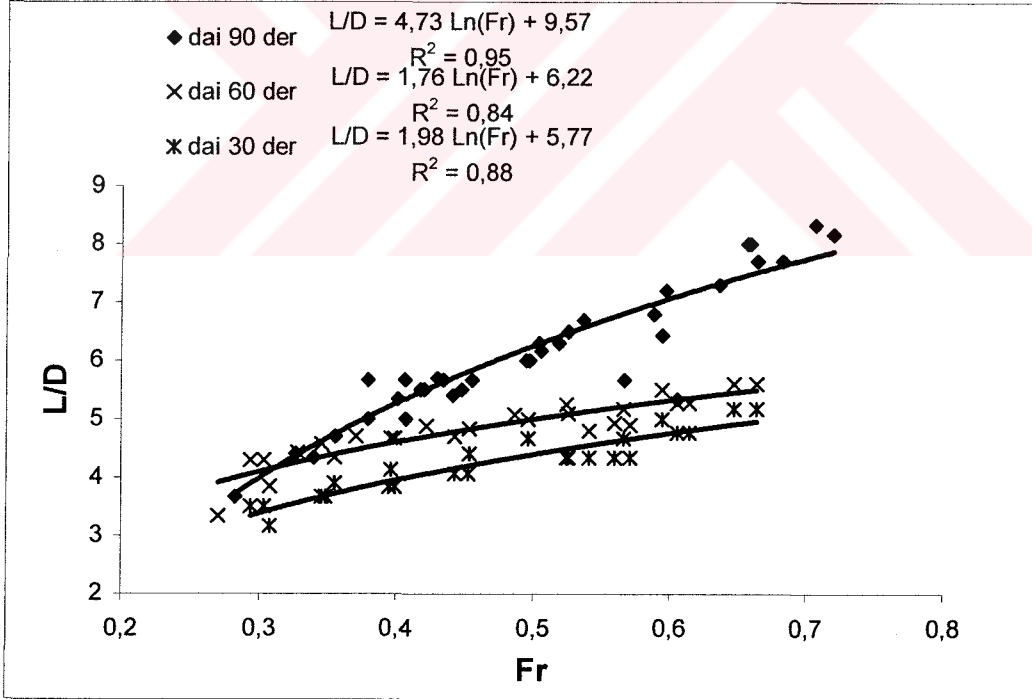
Şekil 5.36 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için kutu kesitli borular etrafındaki S/D - yn/D ilişkisi



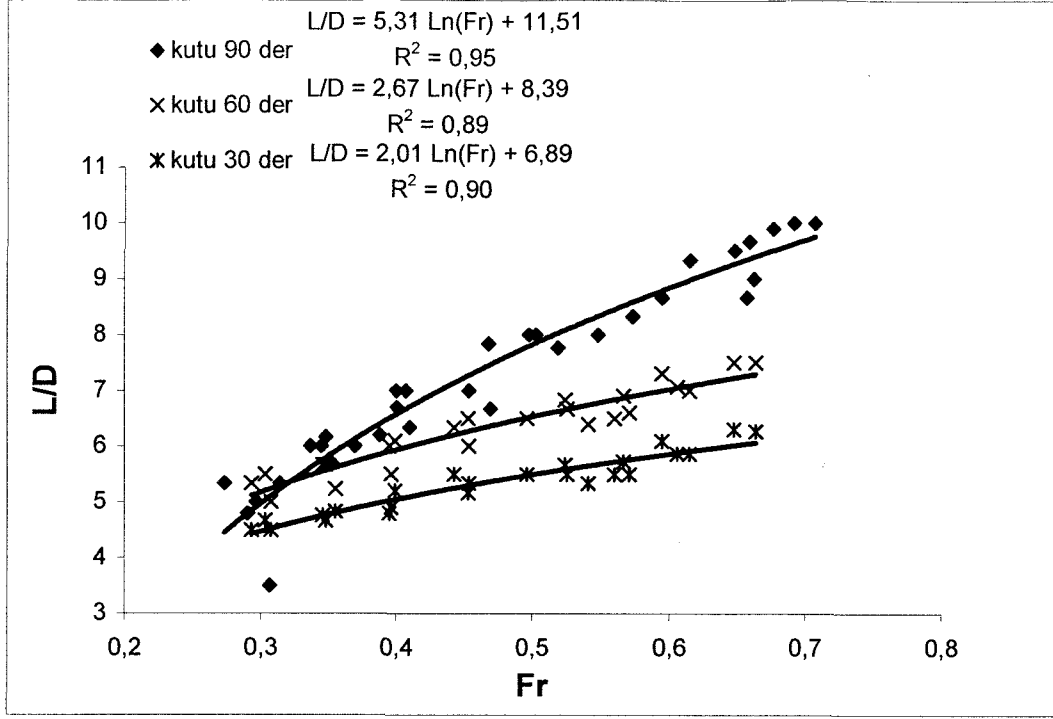
Şekil 5.37 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için dairesel kesitli borular etrafındaki S/D - Re ilişkisi



Şekil 5.38 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için kutu kesitli borular etrafındaki S/D-Re ilişkisi

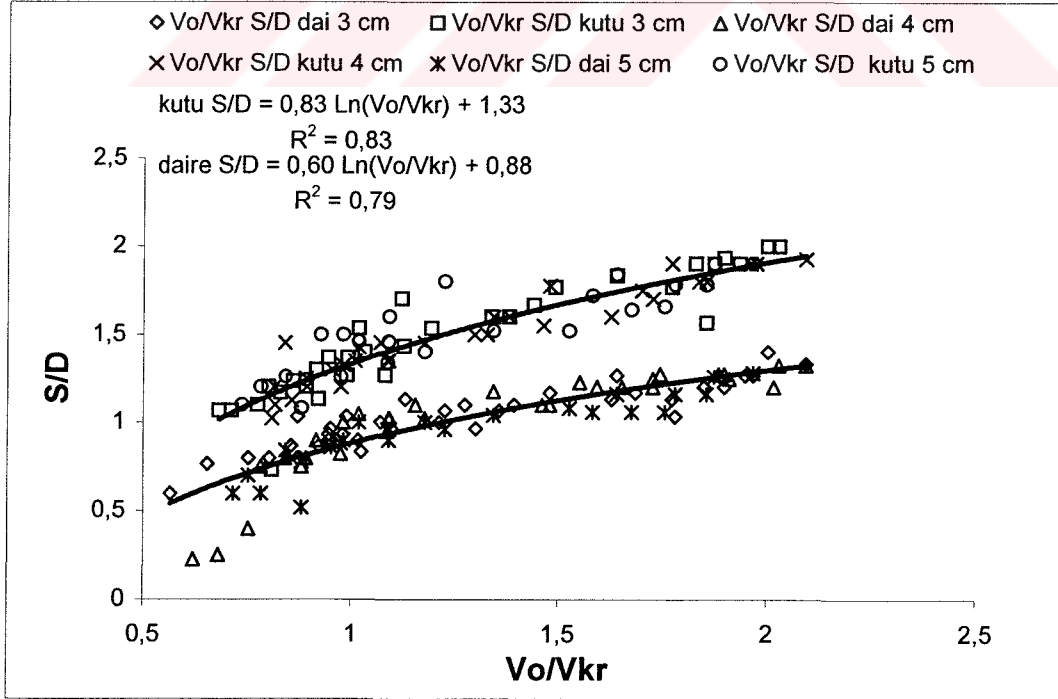


Şekil 5.39 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için dairesel kesitli borular etrafındaki L/D-Fr ilişkisi

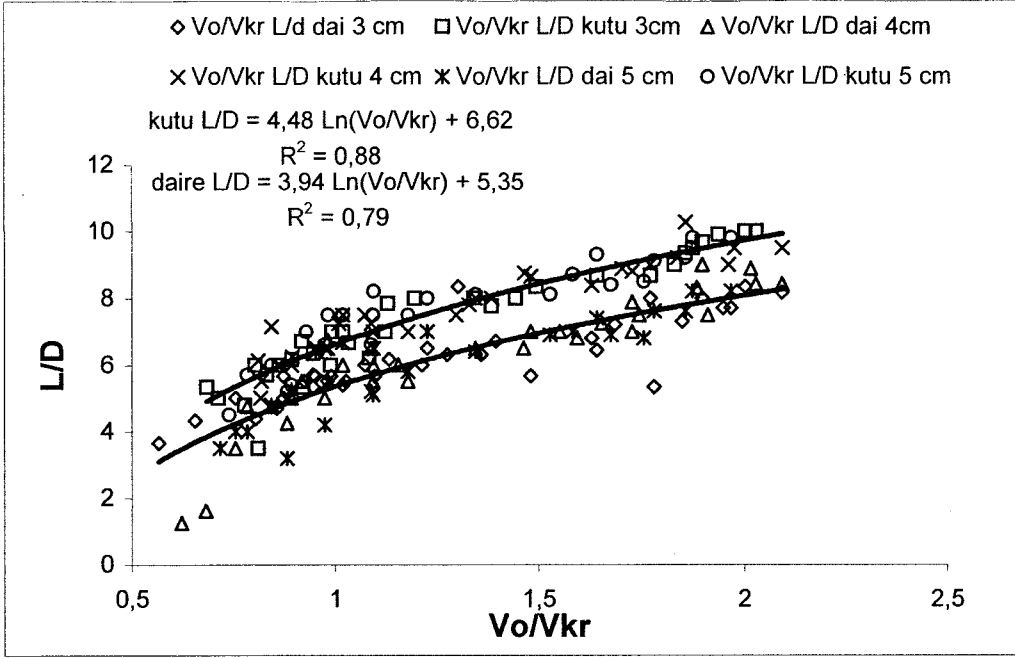


Şekil 5.40 $\alpha=30^\circ$, 60° ve 90° 'lik atak açıları için kutu kesitli borular etrafındaki L/D-Fr ilişkisi

5.6 Rölatif Hızın (V_0/V_{kr}) Rölatif Oyulma Derinliği (S/D) Ve Rölatif Oyulma Çukuru Genişliği (L/D) İle Değişimi



Şekil 5.41 Akım yönüne dik olarak yerleştirilen engeller etrafındaki rölatif oyulma derinliklerinin rölatif hız ile değişimi



Şekil 5.42 Akım yönüne dik olarak yerleştirilen engeller etrafındaki rölatif oyulma çukuru genişliklerinin rölatif hız ile değişimi

Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’de sırasıyla rölatif oyulma derinliği S/D ve rölatif oyulma çukuru genişliği (L/D)’nin rölatif hız ile değişimi dairesel ve kutu kesitli borular için bir arada verilmiştir. Farklı akım derinlikleri için kritik hızlar 4.3 denkleminde elde edilmiştir. Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’den görüldüğü gibi oyulma $V_0/V_{kr} \approx 0,5$ civarında başlamaktadır ve V_0/V_{kr} ’deki artışla S/D ve L/D ’nin arttığı görülmektedir. Literatüre bakıldığında, akıma bir engel yerleştirildiğinde (köprü ayağı gibi), oyulmanın $V_0/V_{kr} \approx 0,4-0,5$ civarında başladığı, $V_0/V_{kr} \approx 1,0$ civarında maksimum oyulma derinliği meydana geldiği (temiz su oyulması) ve daha sonra membadan gelen taban malzemesi hareketine bağlı olarak oyulmanın azaldığı bilinmektedir. Buna göre akıma dik olarak yerleştirilen boru hatları etrafında temiz su oyulması, köprü ayaklarındakine benzer şekilde $V_0/V_{kr} \approx 0,5$ değerinde başlayıp $V_0/V_{kr} \approx 1,0$ ’e kadar artarken, hareketli taban oyulmasında V_0/V_{kr} ’deki artışa paralel olarak S/D ve L/D ’nin artmaya devam ettiği görülmektedir. Buradan, hareketli taban halinde, engelin önündeki ve arkasındaki vorteks sistemlerin etkisinin kaybolduğu, buna karşılık akım hızının (dolayısıyla boru altından geçen jetin) doğrudan taban malzemesinin hareketine etki ettiği anlaşılmaktadır.

6. SONUÇLAR

Hareketli tabanlı bir akarsu yatağına yatay olarak yerleştirilen boru hatları etrafındaki denge oyulma derinliklerinin araştırıldığı bu çalışmada şu sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) Akarsu yatağına yatay olarak yerleştirilen boru ve tüneller akım alanında önemli değişiklikler meydana getirmektedir. Bu engeller etrafında oluşan vorteks sistemler ve sekonder akım taban malzemesini hareket ettirmektedirler.
- 2) Maksimum denge oyulma derinlikleri, engel yatak üzerindeyken, dairesel ve kutu kesitli engellerin her ikisi için de mansapta meydana gelmektedir.
- 3) Boyutsuz oyulma derinliği (S/D) ve boyutsuz oyulma çukuru genişliği (L/D); akımın Froude sayısı (Fr), engelin Reynolds sayısı (Re) ve boyutsuz akım derinliğinin (y_n/D) artışı ile artmaktadır.
- 4) Kare kesitli boruda elde edilen oyulma derinlikleri dairesel kesitli borularda elde edilen oyulma derinliklerinden daha büyüktür.
- 5) Engeller akımı kesecek şekilde belirli bir atak açısı ile taban üzerine yerleştirildiğinde, akımın engelle ilk temas ettiği nokta olan sol sahilde, kanal ekseni ve sağ sahile nispetle daha az oyulma gerçekleşmiş, bunun aksine sağ sahilde en büyük oyulma derinliği ve genişliğine erişilmiştir.
- 6) Atak açısı arttıkça oyulma çukurunun boyutlarının da büyüdüğü tespit edilmiştir. Atak açısı arttırıldıkça engel akım çizgilerine uyum sağlamayan bir kesite sahip olmakta ve bu da daha kuvvetli vorteks saçılımlarına neden olarak erozyon miktarını büyötmektedir.
- 7) Oyulma yaklaşan akımın rölatif hızı $V_0/V_{kr} \approx 0,5$ civarında temiz su oyulması olarak başlamakta ve V_0/V_{kr} hızındaki artışla rölatif oyulma derinliği (S/D) ve rölatif oyulma çukuru genişliği (L/D) de artmaktadır. Bu artış hareketli taban oyulması halinde de devam etmektedir. Dolayısıyla hareketli taban oyulması halinde engelin altından geçen jet hızı oyulmaya etki etmektedir.

KAYNAKLAR

- Achenbach, E., ve 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.
- Bayazıt, M., (1971), "Hareketli Tabanlı Akımların Hidroliği", İ.T.Ü Kütüphanesi, Sayı 835.
- Bijker, E. W. ve Leeuwestein, W., (1984), "Interaction Between Pipelines and The Seabed Under The Influence of Waves and Current", Seabed Mechanics, Proc. Symp. IUTAM/IUGG, Newcastle Upon Tyne, England, Dec., 235-242.
- Bonnefille, R., (1963), "Essais de Synthèse des Lois de Debut d'Entrainement des Sediments Sous l'Action d'un Courant En Regime Uniforme", Bull. du CREC, No. 5, Chatou.
- Bowles, J. E., (1984), "Physical and Geotechnical Properties of Soils", McGraw-Hill Book Company, New York, N. Y.
- Chao, J. L., ve Hennessy, P. V., (1972), "Local Scour Under Ocean Outfall Pipelines", J. Water Pollution Control Federation, 44(7), 1443-1447.
- Chiew, Y. M., (1990), "Mechanics of Local Scour Around Submarine Pipelines", J. Hydr. Engrg., ASCE, 116(4), 515-529.
- Chiew, Y. M., (1991), "Prediction of Maximum Scour Depth at Submarine Pipelines", J. Hydr. Engrg., ASCE, 117(4), 452-466.
- Chiew, Y. M., ve Melville, B. W., (1987), "Local Scour Around Bridge Piers", J. Hydr. Res., 25(1), 15-26.
- Commolet, R., (1963), "Mecanique Experimental des Fluides", Editeur Eyrolles, Paris, Vol. 1-2.
- Çevik, E., ve Yüksel, Y., (1999), "Scour Under Submarine Pipelines in Waves in Shoaling Conditions", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 9-19.
- Durgun, K., (1964), "Laminer Üç Boyutlu Sınır Tabakası Denklemlerinin İnvariant Özellikleri ve Bir Bağlama Ayağı Etrafındaki Laminer Üç Boyutlu Sınır Tabakasının Etüdü", Doktora Tezi, İTÜ
- Goncharov, V. N., (1964), "Dynamics of Channel Flow", Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem.
- Hancu, S., (1971), "Sur le Calcul des Affoilements Loaux Dans la Zone des Piles du Pont", 14th. I.A.H.R. Congres, 3:299-305, Paris.
- Hansen, E. A., Fredsoe, J. ve Mao, Y., (1986), "Two Dimensional Scour Below Pipelines.", Proc. 5th Int. Symp. On Offshore Mech. and Arctic Engrg., Tokyo, Japan, 670-678
- Hjorth, P., (1975), "Studies on the Nature of Local Scour", Lund.
- Hug, M., (1975), "Mecanique des Fluides Appliquees", Editeur Eyrolles, Paris
- Hulsbergen, C. H., (1984), "Stimulated Self-burial of Submarine Pipelines", 16th Offshore Tech. Conf., Houston, Tex., 171-175.
- İbrahim, A. ve Nalluri, C., (1985), "Scour Around Pipelines Under Marine Environment.",

Proc. Of 4th Int. Symp. on Offshore Mech. and Arctic Engrg., (OMAE), Dallas, Tex., 569-575.

İbrahim, A. ve Nalluri, C., (1986), "Scour Prediction Around Marine Pipelines.", Proc. 5th Int. Symp. on Offshore Mech. and Arctic Engrg., Tokyo, Japan., 679-684.

Kjeldsen, S. P., Gjorsvik, O., Bringaker, K. G. ve Jacobsen, J., (1973), "Local Scour Near Offshore Pipelines.", Proc. Of 2nd Int. Conf. On Port and Ocean Engrg. Under Arctic Conditions, Univ. of Iceland, Iceland, 308-331.

Laursen, E. M., (1963), "An Analysis of Relief Bridge Scour", Proc. ASCE, HY3, p.3516.

Leeuwestein, W., Bijker, E. W., Peerbolte, E. B., ve Wind, H. G., (1985), "The Natural Self-burial of Submarine Pipelines.", Proc. 5th Int. Conf. On Behaviour of Offshore Struct., 717-728.

Lucassen, R. J., (1984), "Scour Underneath Submarine Pipelines", MATs Report PL-4 2A, Netherlands.

Mao, Y., (1988), "Seabed Scour Under Pipelines.", Proc. 7th Int. Conf. on Offshore and Arctic Engrg., Houston, Tex., 33-38.

Maza, J. A., (1987), "Introduction to river engineering.", Advanced Course on Water Resources Management, Università Italiana per Stranieri, Perugia, Italy, 7.29, 7.50, 8.16.

Melville, B. W., (1997), "Pier and Abutment Scour: Integrated Approach", J. Hydr. Research, Vol. 123, No. 2, 127-136.

Meyer-Peter, E., Müller, R., (1948), "Formulas for Bed-load Transport", Int. Ass. Hydr. Res. 2nd Meeting, Stockholm.

Moncada, M. ve Aguirre, J., (1999), "Scour Below Pipeline in River Crossings", J. Hydr. Engrg., Vol. 125, No. 9, September, 1999.

Nicollet, G., (1971), "Déformation des Lits Alluvionnaires Affouillements Autour des Piles de Ponts Cylindriques", L.N.H. Chateau, HC-043-689, Paris.

Roshko, A., (1961), "Experiment on The Flow Past a Circular Cylinder at a Very High Reynolds Number", ASCE.

Shen, H. W., Schneider, V. R. ve Kazaki, S. S., (1966), "Mechanics of Local Scour", Fort Collins, Colorado.

Shields, A., (1936), "Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenz Forschung Auf Die Geschiebewegung", Berlin.

Sümer, B. M., Jensen, R. H., Mao, Y. ve Fredsoe, J., (1988), "Effect of lee-wake on scour below pipelines in current", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 114, No.5, pp. 599-614.

Sümer, B. M. ve Fredsoe, J., (1990), "Scour Below Pipelines in Waves", J. Waterway, Port, Coastal And Ocean Engrg., ASCE, 116(3), 307-323.

Sümer, B. M. ve Fredsoe, J., (1991), "Onset of Scour Below a Pipeline Exposed to Waves", Intl. J. Offshore and Polar Eng., Vol 1., No. 3, pp. 189-194.

Sümer, B. M. ve Fredsoe, J., (1992), "A Review of Wave/Current Induced Scour Around

Pipelines”, Proc., 23rd Int. Conf. of Coast. Engrg. (ICCE 92), ASME, New York, Chap. 217, 2839-2852.

Sümer, B. M. ve Fredsoe, J., (1996), “Scour Around Pipelines in Combined Waves and Current.”, Proc., 15rd Int. Conf. on Mech. and Arctic Engrg., ASME, New York, 5, 595-602.

Üç, S., (1979), “Akarsu Kıvrımlarındaki Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Yerel Oyulmalar”, Doçentlik Tezi, İ.D.M.M.A.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 24.09.1980

Doğum yeri İstanbul

Lise 1994-1997 Fatih Şehremini Lisesi

Lisans 1997-2001 Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fak.
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2001-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Hidrolik Programı

