

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**AKARSU TABANINDAN GEÇEN BORU HATLARI
ETRAFINDAKİ OYULMA DERİNLİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**

Özer TEKEŞ

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Burhan ÜNAL**

Yozgat 2014

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**AKARSU TABANINDAN GEÇEN BORU HATLARI
ETRAFINDAKİ OYULMA DERİNLİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**

Özer TEKEŞ

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Burhan ÜNAL**

**Bu çalışma, Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
Tarafından 2014 FBE/T76 kodu ile desteklenmiştir.**

Yozgat 2014

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı 70110711016 numaralı öğrencisi Özer TEKEŞ'in hazırladığı “Akarsu Tabanından Geçen Boru Hatları Etrafındaki Oyulma Derinliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 03/07/2014 günü, saat 10:00’da yapılmış, tezin onayına OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Mustafa VEKLİ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Burhan ÜNAL (Danışman)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Durdu Mehmet ÖZCAN

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../20..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

...../...../20.....

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. SINIR TABAKASI TEORİSİ	2
2.1. Sınır Tabakasının Oluşması	2
2.2. Sınır Tabakasının Ayrılması	4
2.3. Akım Alanına Yerleştirilmiş Bir Engel Etrafında Oluşan Çevrinti Hareketleri	6
2.3.1. Sürüklenen Vorteks Sistem	7
2.3.2. Atnalı Vorteks Sistem	7
2.3.3. Art-İz (İzli) Vorteks Sistem.....	8
3. AKARSULARDA KATI MADDE HAREKETİ	9
3.1. Katı Maddenin Özellikleri	9
3.2. Akım İçindeki Bir Katı Madde Parçacığına Etki Eden Kuvvetler	11
3.3. Tane Çökme Hızı	13
3.4. Sediment Hareketinin Başlaması	16
3.5. Yatak Formları, Yatak Pürüzlülüğü ve Efektif Kayma Gerilmesi	20
3.5.1. Yatak Formları	21
3.5.2. Yatak Pürüzlülüğü-Yatak Formu İlişkisi	23

3.5.3. Etkili Kayma Gerilmesi.....	23
3.6. Sürüntü Maddesi Taşınım Miktarını Veren Formüller	25
3.6.1. Kalinski-Frijlink Formülü	25
3.6.2. Meyer-Peter Formülü	25
3.6.3. Einstein-Brown Formülü.....	26
3.7. Askıda Madde Miktarının Hesabı.....	26
3.8. Toplam Sediment Taşınım Miktarı.....	30
4. LİTERATÜR TARAMASI	31
4.1. Kararlı Akım (Akıntı) Etkisinde Oyulma Derinliği.....	31
4.2. Dalga ve Akıntı Etkisinde Oyulma Derinliği.....	53
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	68
5.1. Deney Düzenegi.....	68
5.2. Deneylede Akım Debisinin ve Oyulma Derinliklerinin Ölçüm Yöntemleri	70
5.2.1. Portatif Tip Ultrasonik Debimetre ile Ölçüm Yöntemi.....	70
5.2.2. Boru Hatları Altındaki Tabanda Oyulma Derinliklerinin Ölçüm Yöntemi.....	72
5.3. Deneyde Kullanılan Taban Malzemesinin Özellikleri ve Granülometri Eğrisi	73
5.4. Boyut Analizi.....	74
5.5. Deneylelerin Yapılışı	78
6. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	81
6.1. Giriş	81
6.2. Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D) Akımın Froude Sayısının Karesi (Fr^2) İle Değişimi	81
6.3. Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D) Akımın Reynolds Sayısı (Re) İle Değişimi	82
6.4. Rölatif Oyulma Çukuru Genişliğinin (L/D) Akımın Froude Sayısının Karesi (Fr^2) İle Değişimi	82
6.5. Rölatif Oyulma Çukuru Genişliğinin (L/D) Akımın Reynolds Sayısı (Re) İle Değişimi	83

7. YAPAY SİNİR AĞLARI.....	85
7.1. Giriş	85
7.2. Yapay Sinir Ağları (YSA) Yönteminin Tanımı ve Tarihçesi	85
7.3. Yapay Nöron.....	86
7.4. Aktivasyon (Transfer) Fonksiyonu	88
7.5. Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması	90
7.5.1. Mimari Yapılarına Göre Yapay Sinir Ağları.....	90
7.5.2. Öğrenme Yöntemlerine Göre Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması.....	91
7.6. Çok Katmanlı Perceptron Ağlar (MLP) ve Öğrenme Algoritmaları	93
7.6.1. Çok Katmanlı Perceptron Ağlar (MLP)	93
7.6.2. Geri Yayılım Öğrenme Kuralı.....	95
7.7. Yapay Sinir Ağları ile Maksimum Oyulma Derinliğinin Belirlenmesi	97
8. SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR	107
EKLER.....	112
ÖZGEÇMİŞ.....	142

AKARSU TABANINDAN GEÇEN BORU HATLARI ETRAFINDAKİ OYULMA DERİNLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Özer TEKEŞ

**Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

2014; Sayfa: 142

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Burhan ÜNAL

ÖZET

Akarsu tabanlarından geçmek zorunda olan su, petrol, doğal gaz gibi akışkanları taşıyan boru hatları etrafında meydana gelen oyulmalar boru hatlarında ciddi zararlara neden olmaktadır. Bu çalışmada, zaman, hız ve kesit özelliklerine bağlı olarak boru hatları altında oyulma derinlikleri incelenmiştir. Deneyler iki farklı çapta taban malzemesi kullanılarak dikdörtgen bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışmalarla oyulma derinliğini etkileyen çeşitli parametreler tanımlanmıştır. Elde edilen deneysel veriler yardımıyla, dairesel ve kare kesitli boru hatları altında meydana gelen oyulma derinlikleri, akım hızı, akım derinliği ve oyulma süreleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Taban malzemesi boyutunun, Reynolds sayısının ve Froude sayısının maksimum oyulma derinliğine etkisi incelenmiştir. Kararlı akım şartlarında yapılan deneylerde elde edilen veriler kullanılarak yapay sinir ağı yöntemi ile modeller oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Oyulma, oyulma derinliği, açık kanal akımları, boru hatları.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SCOURING DEPTH AROUND PIPELINES PASSING A RIVER

Özer TEKEŞ

**Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Master of Science Thesis**

2014; Page: 142

Thesis Supervisor: Asst. Prof. Dr. Burhan UNAL

ABSTRACT

Scouring occurred around the pipelines carrying fluids as water, oil and natural gas in the bottom stream to pass cause serious damage. In this study, scour depths depending on the characteristics of cross-section, time and speed were examined. Experiments were carried out using two different diameter base materials in a rectangular channel. Furthermore, several parameters influencing the depth of scour have been defined with experimental studies. Scouring depth that occur under circular and square cross-section pipelines was compared with the obtained experimental data taking into account flow velocity, flow depth, and scouring time. The effect of the sediment size, the Froude number and Reynolds number on scouring depth was investigated. The results obtained were evaluated with artificial neural networks method statistically.

Keywords: Scour, scour depth, open channel flow, pipelines.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin süresince, bilgi ve desteğinden faydalandığım danışman hocam, Yrd. Doç. Dr. Burhan ÜNAL'a tez çalışmamın tamamlanmasında göstermiş olduğu katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum oda arkadaşım Öğr. Gör. Mehmet BAYAZİT'e, gerek deney düzeneğinin hazırlanması, gerekse tez çalışmamın tamamlanması aşamasına kadar yapmış olduğu katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Arş. Gör. Dr. Murat AY'a yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın tamamlanmasında manevi desteği ile bana güç veren sevgili eşime teşekkür ederim.

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Akarsularda Tipik Malzeme Büyüklükleri.....	10
Tablo 3.2. Doğal sediment parçacıklarının ($S_s = 2.65$) 20°C'ta çökelme hızları.....	16
Tablo 4.1. Daha önceki araştırmacıların yaptığı deneylerin sınır durumları.....	33
Tablo 4.2. Borular için basınç gradyanlarının karşılaştırılması	43
Tablo 5.1. Oyulma derinliğine etki eden parametreler için boyut analizi	76
Tablo 5.2. Oyulma derinliğine etki eden boyutsuz parametreler	76
Tablo 5.3. Deney sınır şartları ($d_{50}=0.60$ mm)	80
Tablo 5.4. Deney sınır şartları ($d_{50}=0.38$ mm)	80
Tablo 7.1. Dairesel kesit için eğitme ve test veri setlerine ait giriş-çıkış parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri	97
Tablo 7.2. Kare kesit için eğitme ve test veri setlerine ait giriş-çıkış parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri.....	98
Tablo 7.3. Dairesel kesit için hesaplanan korelasyon katsayıları	100
Tablo 7.4. Kare kesit için hesaplanan korelasyon katsayıları	100
Tablo 7.5. Maksimum oyulma derinliklerinin (S_{mak}) modellenmesinde dairesel ve kare kesitler için oluşan çok katmanlı yapay sınır ağları (ÇKYSA) modellerinin eğitme ve test aşamalarındaki hataları ve korelasyon (r) değerleri.....	101
Tablo 7.6. Maksimum oyulma derinliklerinin (S_{mak}) modellenmesinde dairesel ve kare kesitler için oluşan çoklu lineer regresyon (ÇLR) modellerinin eğitme ve test aşamalarındaki hataları ve korelasyon (r) değerleri.....	102

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Sınır Tabakasının Oluşturduğu Bölge	3
Şekil 2.2. Düz Bir Levha Boyunca Sınır Tabakasının Gelişmesi	3
Şekil 2.3. Sınır Tabakasının Ayrılması	4
Şekil 2.4. Ayrılmayı Önlemek İçin Geçiş Bölgesinin Yapılması	5
Şekil 2.5. Bir silindir etrafında sınır tabakasından ayrılma	6
Şekil 2.6. Sürüklenen Vorteks Sistem	7
Şekil 2.7. Atnalı Vorteks Sistem.....	8
Şekil 2.8. Bir Engel Etrafında Oluşan Vorteksler ve Art-İz Vorteks Sistemi.....	8
Şekil 3.1. Bir katı madde numunesinin granülometri eğrisi	10
Şekil 3.2. (a) Sürtünme direnci, (b) Akım ayrılması ve şekil direnci.....	11
Şekil 3.3. Bir katı madde parçacığına etki eden kuvvetler	12
Şekil 3.4. Çökeltme sırasında cisme etki eden kuvvetler ve A_c kesit alanı.....	15
Şekil 3.5. Yatak üzerindeki bir parçacığa etki eden kuvvetler	17
Şekil 3.6. Shields Diyagramı	20
Şekil 3.7. Değiştirilmiş Shields diyagramı	20
Şekil 3.8. Yatak Şekilleri	21
Şekil 3.9. Akım şekilleri	22
Şekil 3.10. Yatak formları.....	23
Şekil 3.11. Dalgalı yatak üzerinde akıma karşı direnç.....	24
Şekil 3.12. Permenant türbülanslı bir akımda askıda katı maddeler.....	27
Şekil 3.13. Pürüzlü akımda viskoz alt tabaka	28
Şekil 3.14. Askıdaki sediment konsantrasyonu ve akım hızının düşey dağılımı.....	29
Şekil 4.1. Chao ve Hennessy (1972) tarafından kullanılan değişkenler	32

Şekil 4.2. e/D ve Fr sayısının bir fonksiyonu olarak boru hatları altındaki yerel oyulma derinliklerinin değişimi.....	37
Şekil 4.3. Oyulma başlangıcının şematik olarak izahı.....	38
Şekil 4.4. Oyulma profilleri $t = 400$ dk., $\theta = 0.018$, $D = 100$ mm, $V_0 = 25$ cm/s.....	39
Şekil 4.5. Oyulma profilleri $t = 200$ dk., $\theta = 0.018$, $D = 50$ mm, $V_0 = 25$ cm/s	40
Şekil 4.6. Deneyleerde kullanılan gömme derinlikleri	41
Şekil 4.7. Tünel oyulması gerçekleşmediğinde meydana gelen oyulma biçimi	41
Şekil 4.8. Boru hattı etrafındaki basınç dağılımları	43
Şekil 4.9. Chiew tarafından verilmiş y_n/D 'nin q ve e/D parametrelerine bağlı olarak değiştiğini ifade eden grafik	45
Şekil 4.10. y_n/D 'nin q 'ye bağlı değişimi.....	45
Şekil 4.11. Tipik denge oyulma profili	46
Şekil 4.12. Oyulma çukurunda ölçülen değerler.....	48
Şekil 4.13. (a) Rölatif oyulma derinliğinin (S/D), Re ve τ^* ile değişimi; (b) rölatif oyulma derinliğinin (S/D), Re ve Fr ile değişimi	49
Şekil 4.14. Hareketli taban şartlarında Froude sayısının Fr rölatif oyulma derinliğine (S/D) etkisi	50
Şekil 4.15. y_n/D 'nin S/D 'ye etkisi.....	50
Şekil 4.16. Froude sayısının (Fr) rölatif oyulma genişliği (L/D) ile değişimi	51
Şekil 4.17. $Fr/D_*^{0.59}$ parametresinin rölatif oyulma genişliğine (L/D) etkisi	52
Şekil 4.18. Boru pozisyonunun denge oyulma derinliğine etkisi	52
Şekil 4.19. Farklı boşluk oranları (e/D) ve %2 taban eğimi için oyulma çukurunun boyutsuz profilleri	53
Şekil 4.20. Art-iz etkisi; (a) akıntı, (b) dalga.....	54
Şekil 4.21. Dalgalı ortamda oyulma derinliğinin boru Reynolds sayısı ve Shields parametresi ile değişimi.....	55
Şekil 4.22. Zamansal ortalama kararlı akım hızının radyal bileşeni.....	57

Şekil 4.23. Zamansal ortalama kararlı akım hızının radyal bileşeni.....	57
Şekil 4.24. Maksimum oyulma derinliği ile KC 'nin grafiği	58
Şekil 4.25. Maksimum oyulma derinliği ile D/L 'nin grafiği	58
Şekil 4.26. Maksimum denge oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi	59
Şekil 4.27. Rölatif oyulma derinliğinin β parametresi ile değişimi	60
Şekil 4.28. Normalleştirilmiş oyulma derinliğinin (S/S_0) derinlik parametresi (y/H_0) ile değişimi	61
Şekil 4.29. Rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi.....	62
Şekil 4.30. Bütün taban eğimleri için boru Ursell sayısının (U_{RP}) rölatif oyulma derinliği ile değişimi.....	63
Şekil 4.31. Maksimum oyulma derinliğinin konumu	63
Şekil 4.32. Tabana yerleştirilmiş bir boru için basınç dağılımı	65
Şekil 4.33. Borunun altında sızma akımı	65
Şekil 4.34. Borulanma	66
Şekil 4.35. Dalga etkisinde boru altında basınç gradyanının zaman serisi.....	67
Şekil 5.1. Kanalın perspektif görünümü	68
Şekil 5.2. Kanalın Planı	69
Şekil 5.3. TUF2000H portatif tip ultrasonik debimetre.....	70
Şekil 5.4. Portatif tip ultrasonik debimetrenin çalışma prensibi.....	71
Şekil 5.5. Boru hattı altında meydana gelen oyulma derinliğinin ölçülmesi.....	72
Şekil 5.6. Boru hattı altında meydana gelen oyulma derinliğinin ölçülmesi.....	73
Şekil 5.7. Deneysel çalışmada ölçülen mesafelerin şematik gösterimi	73
Şekil 5.8. 0-3 mm taban malzemesinin granülometri eğrisi	74
Şekil 5.9. 0-5 mm taban malzemesinin granülometri eğrisi	74
Şekil 5.10. Dairesel kesitli boru altında oyulma	78
Şekil 5.11. Düşü havuzunda bulunan taban malzemesinin suyunun boşaltılması.....	79
Şekil 5.12. Taban malzemesinin düzeltilerek deneye hazır hale getirilmesi	79

Şekil 6.1. Rölatif oyulma derinliğinin (S/D) akımın Froude sayısının karesi (Fr^2) ile değişimi	82
Şekil 6.2. Rölatif oyulma derinliğinin (S/D) akımın Reynolds sayısı (Re) ile değişimi	83
Şekil 6.3. Rölatif oyulma çukuru genişliğinin (L/D) akımın Froude sayısının karesi (Fr^2) ile değişimi	83
Şekil 6.4. Rölatif oyulma çukuru genişliğinin (L/D) akımın Reynolds sayısı (Re) ile değişimi	84
Şekil 7.1. Yapay nöron yapısı	87
Şekil 7.2. YSA'larda en çok tercih edilen aktivasyon fonksiyonları.....	89
Şekil 7.3. Geri Yayılım MLP yapısı	94
Şekil 7.4. Dairesel kesit için ÇKYSA (6,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri	103
Şekil 7.5. Kare kesit için ÇKYSA (5,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri	103
Şekil 7.6. Dairesel kesit için ÇLR (6,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri	103
Şekil 7.7. Kare kesit için ÇLR (5,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri	104

KISALTMALAR LİSTESİ

A	Akım en kesit alanı
A_c	Cismin harekete dik doğrultusundaki 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_{50}/D	Rölatif tane çapı
D	Boru çapı
D^*	Boyutsuz malzeme çapı
Δ	Rölatif yoğunluk
e	Bozulmamış taban ile boru arasındaki açıklık
f	Sürtünme katsayısı
F_D	Direnç kuvveti
F_L	Kaldırma kuvveti
Fr	Akımın Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi

γ	Suyun özgül ağırlığı
γ_s	Taban malzemesi özgül ağırlığı
h	Kanaldaki su derinliği
H_0	Yerel dalga yüksekliği
H_m	Boru merkezinden itibaren ölçülen oyulma derinliği
i_f	Taban basınç gradyanı
δ	Sınır tabakası kalınlığı
J_0	Enerji çizgisi eğimi
K	Einstein-Brown katsayısı
KC	Keulegan-Carpenter sayısı
κ	Şekil parametresi
k_s	Pürüzlülük katsayısı
k_s/D	Rölatif pürüzlülük
ζ	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	Engelden yeter uzaklıktaki bir noktanın basıncı

Q	Debi
q_{bot}	Oyulma çukuru birim genişliğinden geçen akım debisi
q_0	Gelen akım debisi
q_b	Sürüntü maddesi taşınım miktarı
R	Hidrolik yarıçap
r	Korelasyon katsayısı
ρ	Suyun özgül kütlesi
ρ_s	Taban malzemesinin özgül kütlesi
Re	Kanal Reynolds sayısı
S	Oyulma çukuru derinliği
S_{mak}	Maksimum denge oyulma derinliği
S_s	Özgül gravite
S/D	Rölatif denge oyulma derinliği
T	Dalga periyodu
θ	Shields parametresi
θ'	Efektif Shields parametresi
θ_c	Kritik Shields parametresi
τ_{kr}	Kritik kayma gerilmesi
τ_b	Taban kayma gerilmesi
U_R	Ursell sayısı
U_{RP}	Boru Ursell sayısı

V	Herhangi bir noktadaki akım hızı
V_{avg}	Ortalama jet hızı
V_{kr}	Taban malzemesi hareketi için kritik hız
V_0	Rahatsız edilmemiş ortalama akım hızı
V_s	Parçacığın çökme hızı
W	Cismin ağırlığı
W_0	Cismin suyun içindeki ağırlığı
x	Akım yönünde engelden itibaren ölçülen mesafe
y_{kr}	Kritik derinlik
y_n	Normal akım derinliği
y_n/D	Rölatif akım derinliği
YSA	Yapay sinir ağıları
OKHK	Ortalama karesel hataların karekökü
OMH	Ortalama mutlak hata
ÇKYSA	Çok katmanlı yapay sinir ağıları
ÇLR	Çoklu lineer regresyon

1. GİRİŞ

Kıyı mühendisliğinin uygulama ve araştırma konularından biri olan denizaltı boru hatları, günümüzde çeşitli kullanım amaçlarına yönelik olarak inşa edilen deniz yapılarını oluşturmaktadır. Bu kullanım amaçları; temiz suyun taşınması, atık suların denize deşarjı, açık denizlerden çıkartılan petrol ve doğal gaz gibi akışkanların kıyıya taşınması, denizaltından ulaşımın sağlanması, enerji nakil hatlarının ve haberleşme amaçlı kabloların iletiminin sağlanması olarak sıralanabilir.

Akarsu yatağına boru hatlarının yerleştirilmesi ile boru hattı etrafındaki akımın yapısı değişmektedir. Bu değişimler; boru hattı etrafındaki sınır tabakasının oluşması ve ayrılması, farklı büyüklüklerde vorteks oluşumları, boru hattı etrafındaki akım çizgilerinde sapmaların oluşması olarak belirtilebilir. Boru hattı etrafındaki akım yapısının değişmesiyle birlikte akışın boru hattına temas noktasında hız, basınç ve taban kayma gerilmeleri artarak boru hattı altındaki taban malzemesinde oyulmaların meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Tamamlanmış olan çalışmalarda, yapıdan dolayı rahatsız edilmemiş akım bölgesine göre türbülans şiddetinin iki kat, kayma gerilmesinin dört kat, katı madde taşınımının sekiz kat arttığı belirlenmiştir [1].

Boru hattı altında oluşan oyulma neticesinde, boru hattının askıda kalması kesit zorlanmalarına neden olmaktadır. Kesit zorlanmalarına neden olan hidrodinamik kuvvetlerin artmasına bağlı olarak, boru hattında deformasyonlar oluşmaktadır. Bu nedenle deniz altı yapılarının tasarımı önemli mühendislik konularını oluşturarak güncelliğini korumaktadır.

Bu çalışmada, iki farklı taban malzemesi kullanılarak, farklı hız ve akım derinliklerinde, farklı kesit alanlarına sahip dairesel ve kare kesitli borular altında oluşan oyulma derinlikleri, dikdörtgen kesitli bir kanalda oluşturulan modelde deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca, maksimum oyulma derinliği, Yapay Sınır Ağları (YSA) yöntemiyle modellenmiştir.

2. SINIR TABAKASI TEORİSİ

Akımda katı sınır kayma gerilmelerinden etkilenen bölge, sınır tabakası akımı olarak tanımlanmaktadır. Sınır tabakası kavramı ilk kez L. Prandtl (1904) tarafından ortaya atılmış ve sınır tabakası akımının analizinde viskozitenin önem kazandığı vurgulanmıştır. Akıma uyarlanmış bir cisim etrafındaki akım alanında farklı özellikte iki ayrı bölge tanımlamak mümkündür [2]. Bunlar;

1. Katı sınır kayma gerilmesinden etkilenen, yani viskozitenin önem kazandığı sınır tabakası akımı,
2. Kayma gerilmelerinden etkilenmeyen veya çok az etkilenen, hız dağılımlarının üniforma daha yakın olduğu, hız ve basınç dağılımları bakımından çervintisiz akım kurallarının geçerli olduğu potansiyel akım bölgesi,

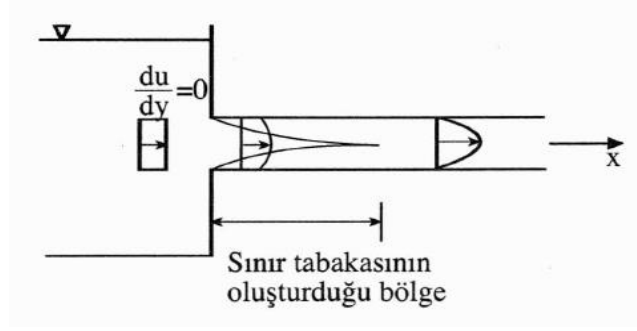
olarak sıralanabilir.

Sınır tabakası akımının incelenmesi, aşağıda belirtilen konuların araştırılmasında ihtiyaç duyulan bilgilerin elde edilmesine olanak tanımaktadır.

1. Akım ile akım içerisine batmış cisimler arasındaki etkileşimden kaynaklanan itki ve kaldırma kuvvetlerinin belirlenmesinde,
2. Yapı etrafındaki sınır tabakasının ayrılması problemlerinde,
3. Ayrılma bölgesinde çervinti (vorteks) oluşumlarının incelenmesinde,
4. Kuyruk bölgesinde (wake) akım alanının incelenmesinde [3, 4].

2.1. Sınır Tabakasının Oluşması

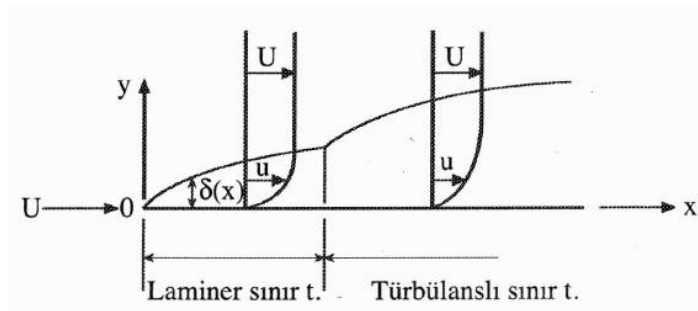
Şekil 2.1'de su ile dolu bir hazneden çıkan bir boru görülmektedir. Borunun hazneye giriş kısmında henüz bir sürtünme etkisi duyulmadığından akımda üniform bir hız dağılımı görülür ($du/dy = 0$). Akım boru boyunca ilerledikçe boru çeperindeki sürtünmenin etkisiyle bir kısım akışkan yavaşlar. Böylece sınır tabakası oluşur. Sınır tabakasının kalınlığı akım doğrultusu (x eksenini) boyunca artar. Bir süre sonra sınır tabakası bütün boru kesitini kaplar ve hız dağılımı kesitten kesite değişmez.



Şekil 2.1. Sınır Tabakasının Oluşturduğu Bölge [5]

Şekil 2.2'de hızı U olan üniform bir akım alanı içerisinde, hız doğrultusunda yerleştirilmiş olan düzlem bir levha üzerinde temas noktasından itibaren gelişmeye başlayan sınır tabakası akımı görülmektedir. Sınır tabakasının kalınlığı, δ , gelişiminin başlangıcında çok küçük olduğundan sınır tabakası akımı laminer karakterdedir. δ 'nin belirli ölçüde büyümesi ile birlikte sınır tabakası akımı türbülanslı duruma geçer. Bu olay, sınır tabakası kalınlığının değişim hızındaki ani bir artışla göze çarpar. Gerçekten de bu tesir türbülanslı akımda momentum alış-verişi daha etkili olduğu için, sınır tabakasının dışındaki akışkan parçacıklarının sınır tabakasına kolayca girebilmelerinden doğmaktadır.

Sınır tabakası kalınlığı, x eksenini boyunca artar. Ancak δ , daima x uzunluğu yanında çok küçük değerlerdedir.



Şekil 2.2. Düz Bir Levha Boyunca Sınır Tabakasının Gelişmesi [5]

δ , sınır tabakası kalınlığının kesin bir şekilde tanımlanması olanaksızdır. Ancak pratikte $u = 0.99U$ noktasına kadar olan uzaklık sınır tabakası kalınlığı olarak kabul edilebilir.

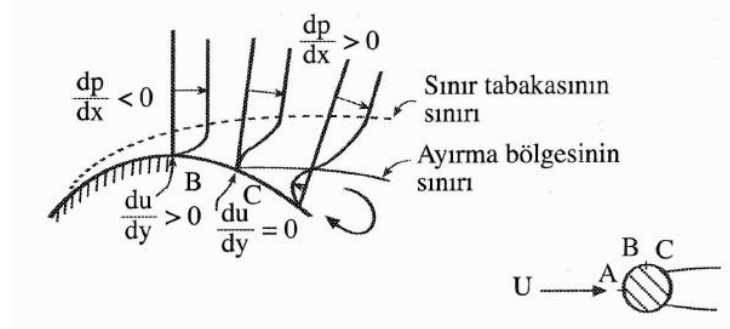
Bu şekilde tanımlanan δ sınır tabakası kalınlığı, başlangıçtan olan x uzaklığına bağlı olduğu gibi, U akım hızına ve ayrıca ρ akışkan yoğunluğuna ve ν viskozite katsayısına da bağlıdır. Deneyler orantılılık sabitinin 5 olduğunu göstermiştir. O halde;

$$\delta = 5\sqrt{\frac{\nu x}{U}} \quad (2.1)$$

denklemi sınır tabakası kalınlığının hesabı için kullanılabilir.

2.2. Sınır Tabakasının Ayrılması

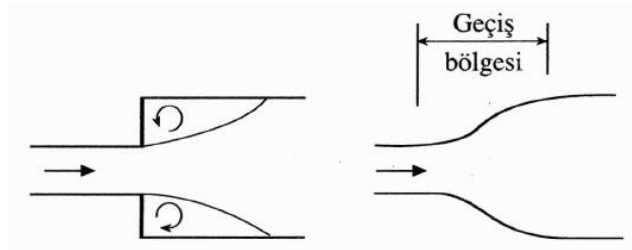
Şekil 2.3’de görüldüğü gibi eğrisel bir katı sınır boyunca oluşan sınır tabakasını düşünelim. A’dan B’ye kadar akış kesiti daraldığı için potansiyel akım bölgesindeki U hızı giderek artmakta ve Bernoulli denklemine göre P basıncı akım doğrultusunda azalmaktadır.



Şekil 2.3. Sınır Tabakasının Ayrılması [5]

Hâlbuki B noktasından sonra akış kesiti giderek genişlediğinden U hızı azalacak ve Bernoulli denklemine göre P basıncı akım doğrultusunda artacaktır. Bu bölgede sınır tabakasındaki bir akışkan parçasını düşünürsek sürtünme kuvvetlerinin etkisi altında bulunan bu parçacığın hareketi basınç kuvvetlerinin etkisiyle daha da zorlaşacaktır. Sonunda bir C noktasından itibaren sınır tabakasındaki akışkanın bir kısmı esas akım doğrultusunda ilerlemeyip geri dönecek ve bir ters akım oluşacaktır. Bu olay sınır tabakasının ayrılması (çözülme) olarak adlandırılır. Ayrılmanın başladığı C noktasında katı sınır üzerinde $du/dy = 0$ olduğu Şekil 2.3’de görülmektedir [5].

Sınır tabakasının ayrılması pratikte büyük önem taşıyan bir olaydır. Akım alanını çevreleyen sınırların eğriliğinin büyük olması halinde daima ayrılma görülür. Ayrılma bölgesinde hız gradyanı ve türbülans çalkantıları büyük olduğu için önemli yük kayıpları meydana gelir. Bu nedenle, su yapılarında genellikle ayrılma olmaması istenir. Bunu sağlamak için sınırlara uygun bir şekil vermek, akımın yavaşladığı bölgelerde büyük eğriliklerden ve özellikle keskin bölgelerden kaçınmak gerekir. Örneğin Şekil 2.4’de görüldüğü gibi dar bir kanalı daha geniş bir kanalla birleştirirken ani bir genişleme yapılacak olursa ayrılma meydana gelir ve yük kayıpları artar. Ayrılmayı önlemek için geçişi yeter derecede uzun bir bölge boyunca eğriliği küçük bir sınırla yapmak gerekir.



Şekil 2.4. Ayrılmayı Önlemek İçin Geçiş Bölgesinin Yapılması [5]

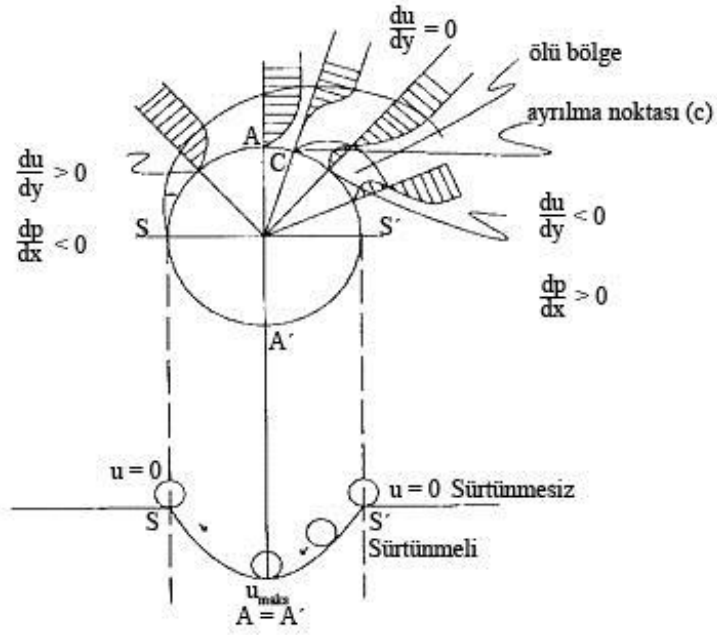
δ kalınlığının gittikçe artması ile sınır tabakasının türbülanslı rejime geçeceği yukarıda belirtilmişti. Türbülanslı sınır tabakası da laminar sınır tabakası gibi ayrılır. Fakat türbülanslı halde ayrılma daha geç olur. Bunun sebebi şöyle açıklanabilir. Türbülanslı sınır tabakası içerisinde momentum alış-verişi daha etkilidir; bu sayede cidar civarına sürekli olarak yukarı bölgelerden enerjisi büyük akışkan taneleri transfer edilir. Böylece cidar bölgesi enerji bakımından adeta yenilenir. Bu ise sınır tabakasının ayrılmadan bir müddet daha yoluna devam etmesini sağlar [5].

Şekil 2.5’de ise akım yönüne dik olarak yerleştirilmiş bir silindir etrafında sınır tabakası içinde akışkan partiküllerinin hızı S’den A’ya kadar artar ve akışkan partiküllerinin kinetik enerjileri A’da maksimum olur. Bu akışkan partikülleri S’ne doğru harekete geçtiklerinde enerjilerinin bir kısmı artan ters basınç gradyanı dolayısıyla sürtünmeden dolayı ısı enerjisine dönüşür ve S’ne varamazlar. Enerjisini tüketen akışkan elemanları hareketsiz kalarak ölü bir bölge meydana getirirler. Bu durumda cisim yakınındaki akışkan tabakası kendi üzerinde döner ve sınır

tabakasından ayrılma olayı meydana gelir. Cismin ön tarafında ince, arkasında ise ayrılmaya varabilecek daha kalın bir sınır tabakası gelişimi vardır. Ayrılma ile akım cidardan kopar ve iz akımı oluşur. İz akımı Reynolds sayısına bağlıdır [6].

$$Re = \frac{DU}{\nu} \quad (2.2)$$

Burada D silindir çapı, U akım hızı ve ν kinematik viskozitedir.



Şekil 2.5. Bir silindir etrafında sınır tabakasından ayrılma [6]

2.3. Akım Alanına Yerleştirilmiş Bir Engel Etrafında Oluşan Çevrinti Hareketleri

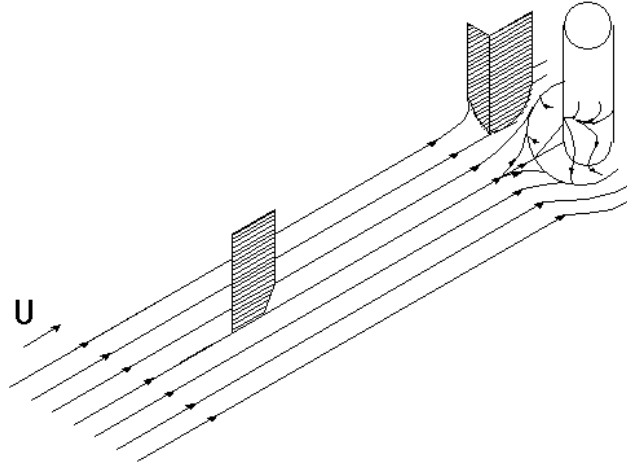
Bir engel etrafında yer alan akımın en belirgin özelliği, büyük ölçekli çevrinti yapısı yani vorteks sistemlerdir [7]. Bu vorteks sistemler esas itibariyle üç farklı biçimde bulunurlar. Bunlar;

1. Sürüklenen vorteks sistem,
2. Atnalı vorteks sistem,
3. Art-iz vorteks sistem,

olarak isimlendirilir. Atnalı vorteks sistem tabandaki malzemenin yerinden sökülmesine, art-iz vorteks sistemi de sökülen malzemenin taşınmasında rol oynamaktadır.

2.3.1. Sürüklenen Vorteks Sistem

Şekil 2.6’da akım doğrultusuna yerleştirilmiş silindirik bir köprü ayağı etrafında oluşan sürüklenen vorteks sistem gösterilmektedir. Bu tip vorteks sistemler aynı köşede birleşen yüzey arasında basınç farkları olan durumlarda meydana gelirler. Engelin durgunluk düzlemiyle kanal tabanının birleştiği yerde kabarmadan dolayı oluşan yüksek basınç gradyanları bu vortekslerin oluşmasına neden olur ve tamamen batık engellerde oluşur [7].

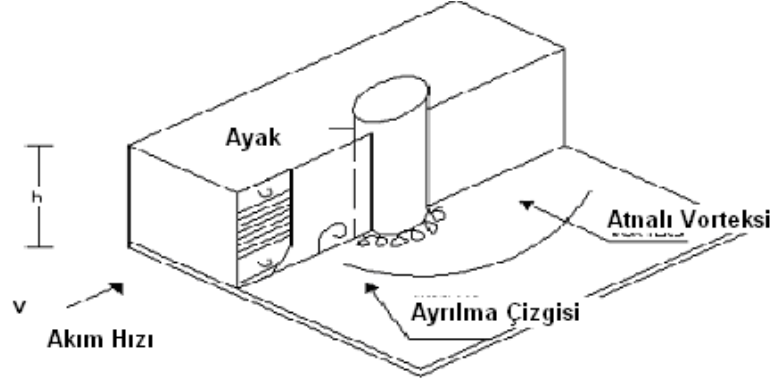


Şekil 2.6. Sürüklenen Vorteks Sistem [8]

2.3.2. Atnalı Vorteks Sistem

Şekil 2.7’de akım doğrultusuna yerleştirilmiş silindirik bir köprü ayağı etrafında oluşan atnalı vorteks sistem gösterilmektedir. Engelin önünde meydana gelen aşağı yönlü düşey durumdaki hız bileşeni tabana ulaşır ve sapar. Yön değiştiren bu hız bileşenlerinin bir bölümü sürüklenen vorteksleri oluştururken, diğerlerinin bir bölümü de tekrar yükselir ve hareketine devam eder. Bu olayların sonucunda engelin tabanı yakınında bir çevrinti hareketi oluşur. Bu çevrintiye atnalı vorteks sistem denir [9]. Bu vorteksin oluşması basınç değişiminin büyük olmasına bağlıdır. Bu da ayak şekilleriyle ilgilidir. Atnalı vorteks sistem dairesel engellerde ana akımla 70° açı

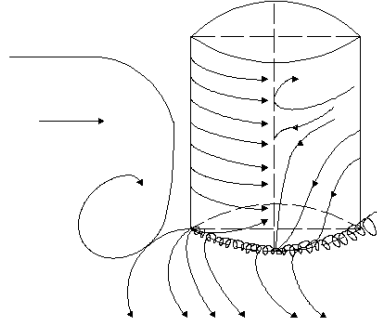
yapan nokta yakınında, dikdörtgen engellerde ise engelin köşelerinde dönümlü akım hızına sahiptir [8].



Şekil 2.7. Atnalı Vorteks Sistem [8]

2.3.3. Art-İz (İzli) Vorteks Sistem

Şekil 2.8’de akım doğrultusuna yerleştirilmiş silindirik bir köprü ayağı etrafında oluşan art-iz vorteks sistem gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Bir Engel Etrafında Oluşan Vorteksler ve Art-İz Vorteks Sistemi [7]

Engel yüzeyindeki kararsız sürtünme tabakasının yukarı doğru dönerek çıkmasından meydana gelir. Bu sistem içinde konsantre olan çevrilen engelin kendisi tarafından meydana getirilir. Sürtünme tabakaları, ayrılma hattının her iki tarafından ayrılır. Art-iz vorteks sisteminde çevrilerin şiddeti, engelin şekline ve akım hızına bağlı olarak değişir. Ayağın arka tarafında, tabandan yukarı doğru kalkan bir akım gözlenir [7]. Şekil 2.8’deki oklar su akımını göstermektedir.

3. AKARSULARDA KATI MADDE HAREKETİ

Akarsuyun kendi yatağında oluşan erozyon, akarsu havzasında yağmur ve eriyen kar sebebiyle oluşan erozyon, akarsu şevlerindeki sökülmeler ve yatağı konsolide olmamış kanallardaki erozyon gibi faktörler bir akarsuya katı madde (sediment) girişini sağlar. Suyun hızının azaldığı yerlerde, akarsuyun katı maddeyi taşıma gücü azalacağından bu bölgelerde katı madde birikmesi olacaktır. Akarsuyun denizle birleştiği nehir ağızlarında, göllerin ve baraj göllerinin girişinde akarsuyun hızının sıfıra yaklaşması sebebiyle akarsuyun taşıdığı katı maddeler de bu bölgelerde yığılacaktır.

Bir hidrolik mühendisinden, katı madde (sediment) taşınımı ile ilgili aşağıdaki problemlere çözüm aranması beklenir.

1. Katı madde yükünün fazla olması su kalitesini azaltarak suyun kullanılmasını zorlaştırır.
2. Akarsu yatağında ve baraj haznelinde biriken malzeme, akarsularda ulaşımı engeller ve barajların faydalı ömrünü kısaltır.
3. Katı madde (sediment) yükleri akarsu sisteminin dengesini bozar ve önemli erozyon problemlerinin oluşmasına sebep olur.
4. Sulama ve isale (iletim) kanallarının aşınmaya dayanımlı olması ve malzeme biriktirmeyecek özellikte projelendirilmesi gerekir.
5. Suyun kullanılabilir özellikler taşıması ile sürdürülebilir çeşitli canlı hayatı etkilenir.

Mühendislikte, bu ve benzeri problemlere çözüm getirebilmek için katı maddenin akım içerisindeki hareketinin mekaniğinin bilinmesi gerekir [5].

3.1. Katı Maddenin Özellikleri

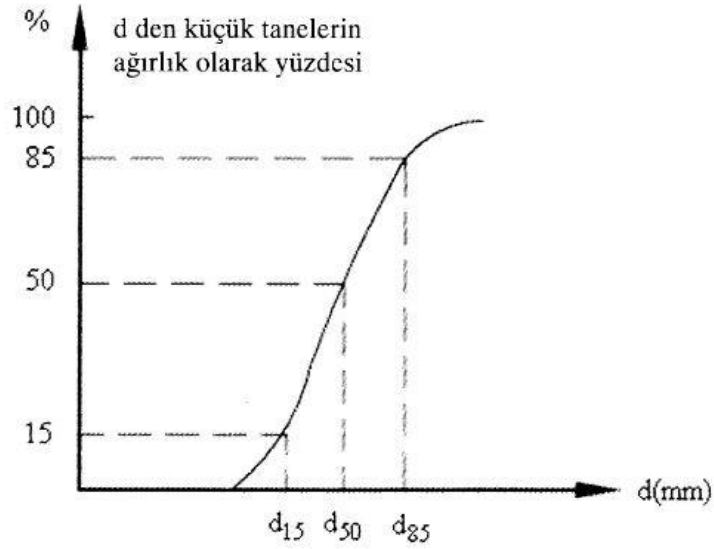
Akarsularda ve kanallarda taşınan katı maddelerin büyüklüklerine göre sınıflandırılması Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Akarsularda Tipik Malzeme Büyüklükleri

Malzeme Cinsi	Tane Çapı (mm)
Kil	$d < 0.002 - 0.004$
Silt	$0.002 - 0.004 < d < 0.06$
Kum	$0.06 < d < 2.0$
Çakıl	$2.0 < d < 64$
İri taş	$64 < d < 256$
Kaya	$256 < d$

Katı madde taşınımı için en önemli sınıflar kum ile çakılın 2-20 mm aralığıdır [5].

Akarsularda ve kanallarda genellikle kohezyonlu malzemeler (kil, silt gibi) ve kohezyonsuz malzemeler (kum ve çakıl gibi) olmak kaydıyla iki çeşit malzeme taşınır. Taşınan katı maddeler çeşitli büyüklükteki tanelerden oluşur ve şekilleri küresel olmayıp düzensizdir. Bir katı madde numunesinin granülometri eğrisi Şekil 3.1’de verilmiştir. Çeşitli büyüklükteki katı maddeleri temsil etmek üzere bir tek tane büyüklüğü tespit edilir (tanelerin ağırlık olarak % 50’sini geçiren elek çapı d_{50} gibi).



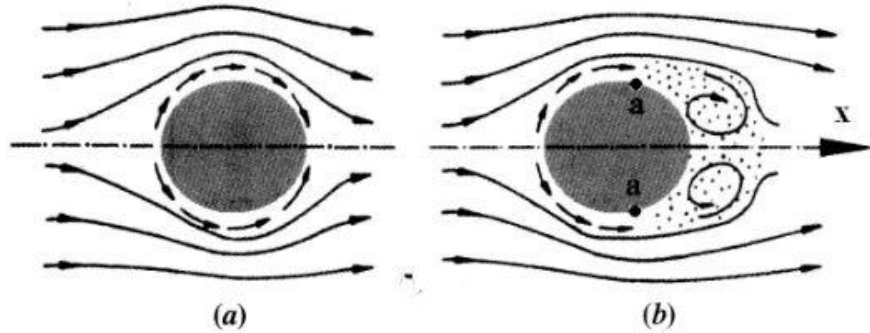
Şekil 3.1. Bir katı madde numunesinin granülometri eğrisi [10]

Katı maddenin birim hacminin kütlesine maddenin yoğunluğu ρ_s (kg/m^3) ve birim hacminin ağırlığına tanenin özgül ağırlığı denir γ_s (N/cm^3). Suyun yoğunluğu $+4^\circ\text{C}$ 'ta ρ olmak üzere, $S_s = \rho_s / \rho$ oranına maddenin özgül gravitesi denir.

3.2. Akım İçindeki Bir Katı Madde Parçasına Etki Eden Kuvvetler

Bir akım içerisinde duran bir parçacığa etki eden kuvvet, akım hızına bağlıdır. Eğer akım hızı küçükse, Şekil 3.2a'daki gibi akım cismin bütün yüzeyini sıvar. Cismin yüzeyi boyunca oluşan viskoz sürtünme gerilmelerinin x yönündeki bileşeni cismi etkileyen kuvvettir. Buna eşit ve zıt yönlü olarak akıma tesir eden kuvvete sürtünme direnci denir.

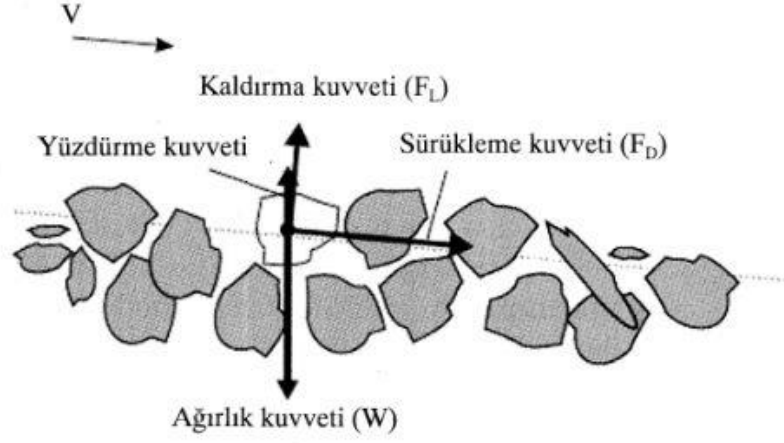
Eğer akım hızı çok büyükse, akım Şekil 3.2b'deki gibi "a" noktalarına kadar sıvadıktan sonra akımda ayrılma oluşur ve viskoz sürtünme gerilmelerinin bileşkesi olan bir F_1 kuvveti cismi etkiler. Akım ayrılması nedeniyle mansap yüzeyindeki basınç memba yüzeyindeki basınçtan küçük olur. Bu basınç farkından dolayı cisme bir de F_2 kuvveti etki eder. Bu kuvvete şekil direnci denir. Bu durumda cisme etki eden toplam kuvvet $F_D = F_1 + F_2$ olacaktır.



Şekil 3.2. (a) Sürtünme direnci, (b) Akım ayrılması ve şekil direnci [10]

Bir açık kanal akımında her bir katı madde parçasığı üzerine etki eden kuvvetler Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, yerçekimi kuvveti, yüzdürme kuvveti, kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvvetidir. Yerçekimi ve yüzdürme kuvveti düşey doğrultuda etki eder. Ayrıca katı maddeyi saran parçacıkların reaksiyon kuvvetleri oluşur (iç granüler kuvvetler). İç granüler kuvvetlerin değeri ve yönü tanelerin yer değiştirmesine ve dizilimine bağlıdır. Sürüklenme kuvveti F_D , akım doğrultusunda etki eder.

$$F_D = C_c A_c \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.1)$$



Şekil 3.3. Bir katı madde parçacığına etki eden kuvvetler [10]

Kaldırma kuvveti F_L , akım doğrultusuna dik doğrultuda etki eder.

$$F_L = C_L A_c \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.2)$$

Ağırlık kuvveti cismin suyun dışındaki ağırlığı (W) veya suyun içindeki ağırlığı (W_0) kullanılırsa, yüzdürme kuvveti hesaba katılmaz.

$$W_0 = (\rho_s - \rho) g V_0 \quad (3.3)$$

Burada,

v = Akım hızı

V_0 = Parçacığın hacmi

ρ = Suyun yoğunluğu

ρ_s = Parçacığın yoğunluğu

A_c = Cismin harekete dik doğrultudaki kesit alanıdır.

C_D ve C_L direnç ve kaldırma katsayıları olup, değerleri cismin şekline, yüzeysel pürüzlülüğüne ve Reynolds sayısına ($Re = vd/\nu$) bağlıdır. Genellikle deneysel çalışmayla bulunur.

3.3. Tane Çökelme Hızı

Durgun bir akışkan içinde v_s hızı ile hareket eden bir cisme harekete ters yönde bir kuvvet etki eder. Bu kuvvete cisme gelen direnç kuvveti denir (F_D);

$$F_D = C_D A_c \rho \frac{v_s^2}{2} \quad (3.4)$$

denklemleri ile verilebilir. Burada A_c cismin harekete dik doğrultudaki kesit alanı, C_D direnç katsayısıdır.

Şekil 3.4'de çökeltme sırasında cisme etki eden kuvvetler ve A_c kesit alanı gösterilmiştir.

Durgun bir su içine bırakılan ve yoğunluğu suyun yoğunluğundan büyük olan bir cisim, ağırlığının etkisiyle aşağı doğru hızlanarak hareket eder. Bu hareket sırasında, cisme etki eden kuvvetler cismin ağırlığı ve suyun cisme etki ettirdiği direnç kuvvetleridir.

$$\text{Cismin su içerisindeki ağırlığı } (W_0) \rightarrow W_0 = (\rho_s - \rho)gV_0$$

$$\text{Suyun cisme etki ettirdiği direnç kuvveti } (F_D) \rightarrow F_D = C_D A_c \rho \frac{v_s^2}{2}$$

Başlangıçta ($t = 0$ ve $v_s = 0$) sıfır olan direnç kuvveti, aşağıya doğru düşen cisim hızı arttıkça büyüyecektir. Bunun sonunda F_D değeri W_0 değerine yaklaşarak bir noktada $F_D = W_0$ veya $W_0 - F_D = 0$ olacaktır.

$$W_0 - F_D = \text{kütle} \times \text{ivme} = 0$$

olduğundan, ivme sıfır olur. Bu durumda, cisim o andaki hızı sabit kalmak üzere düşmesine devam eder. Cismin bu hızına nihai hız veya çökelme hızı denir ve v_s ile gösterilir. Tablo 3.2’de doğal sediment parçacıklarının çökelme hızları belirtilmiştir. Bu durumda, düşen parçacığın hareket denklemi,

$$(\rho_s - \rho)gV_0 = C_D A_c \rho \frac{v_s^2}{2} \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan v_s değeri çekilirse,

$$v_s = \sqrt{\frac{2gV_0(\rho_s - \rho)}{3C_D \rho A_c}} \quad (3.6)$$

Bulunur. Küresel cisimler için $V_0 = \pi d^3 / 6$ ve $A_c = \pi d^2 / 4$ olduğu için,

$$v_s = \sqrt{\frac{4gd(\rho_s - \rho)}{3C_D \rho}} \quad (3.7)$$

veya,

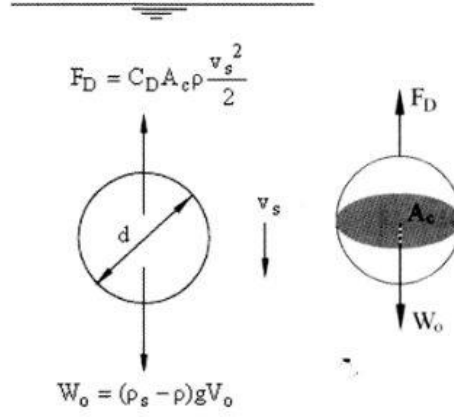
$$v_s = \sqrt{\frac{4gd}{3C_D} (S_s - 1)} \quad (3.8)$$

bulunur. Direnç katsayısının değeri (C_D) sabit olmayıp Reynolds sayısına ve daha az olarak da cismin şekline bağlıdır.

Küresel cisimler için:

$$\text{Re} \leq 0.5 \rightarrow C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (3.9)$$

$$0.5 < \text{Re} \leq 10^4 \rightarrow C_D = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{3}{\sqrt{\text{Re}}} + 0.34 \quad (3.10)$$



Şekil 3.4. Çökeltme sırasında cisme etki eden kuvvetler ve A_c kesit alanı [10]

Çökeltmede, $Re = \frac{v_s d}{\nu}$ olarak verilebilir. Burada,

d = Cismin veya parçacığın çapı

ν = Kinematik viskozitedir.

(3.8) numaralı denklem akım tipine (Re) değerine ve C_D değerlerine göre aşağıdaki şekilde verilebilir:

Türbülanslı akım halinde, $5 \times 10^2 < Re \leq 10^4$ için $C_D \approx 0.4$ olacağından:

$$v_s = \sqrt{3.3gd(S_s - 1)} \quad (3.11)$$

Laminer akım halinde, $C_D = \frac{24}{Re}$ olduğundan,

$$v_s = \frac{gd^2(S_s - 1)}{18\nu} \quad (3.12)$$

bulunur. Bu Stokes kanunudur.

Tablo 3.2. Doğal sediment parçacıklarının ($S_s = 2.65$) 20°C 'ta çökme hızları (nihai hız) [10, 11]

d (m)	Re	C_D	v_s (m/sn)
0.0001	7.6×10^{-1}	36.2	0.008
0.0002	4.6×10^0	8.0	0.023
0.0005	3.3×10^1	2.4	0.067
0.001	1.2×10^2	1.6	0.117
0.002	3.7×10^2	1.3	0.186
0.005	1.6×10^3	1.1	0.314
0.01	4.5×10^3	1.0	0.454
0.02	1.3×10^4	1.0	0.650
0.05	5.1×10^4	1.0	1.034
0.1	1.5×10^5	1.0	1.466
0.2	4.1×10^5	1.0	2.075

Doğal parçacıklar için Fredsoe (1992) tarafından direnç katsayısı için aşağıdaki ampirik ifade verilmiştir [10, 12].

$$C_D = 1.4 + \frac{36}{\text{Re}} \quad (3.13)$$

Bu ifade (3.12) denkleminde yerine konursa;

$$v_s = \frac{\left(\sqrt{\left(\frac{36v}{d_n} \right)^2 + (7.5(S_s - 1)gd_n)} - \frac{36v}{d_n} \right)}{2.8} \quad (3.14)$$

denklemini elde edilir.

3.4. Sediment Hareketinin Başlaması

Bir yatak üzerindeki bir parçacığa etki eden kuvvetler Şekil 3.5'te verilmiştir.

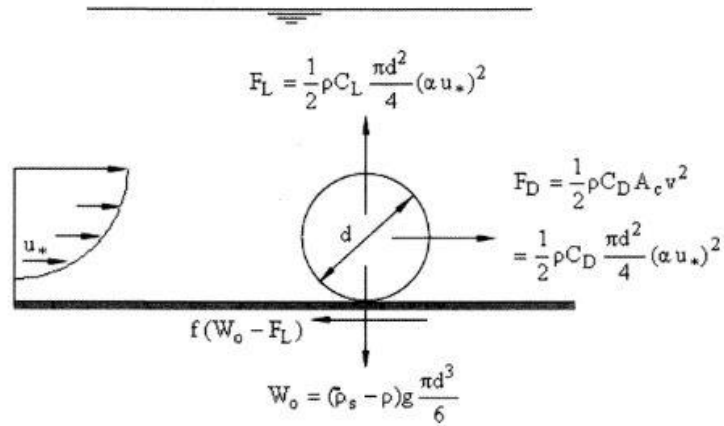
$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_c v^2 \quad (3.15)$$

Sürükleme kuvvetidir. $u_* = (\tau_0 / \rho)^{1/2}$ olmak üzere, $v = \alpha u_*$ olarak yazılırsa, sürükleme kuvveti aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi d^2}{4} (\alpha u_*)^2 \quad (3.16)$$

u_* = Yatak yakınındaki akım hızıdır.

$\alpha = u_*$ değerini değiştirerek, αu_* değerinin parçacığı geçen akımı karakterize edebilmesi için kullanılan bir katsayıdır.



Şekil 3.5. Yatak üzerindeki bir parçacığa etki eden kuvvetler [10]

$u_{*,c}$ kritik kayma hızıdır ve parçacığın harekete başlayacağı duruma karşılık gelir. Bu durumda sürüklenme kuvveti, sürtünme kuvvetine eşittir. f sürtünme katsayısı olmak üzere, hareketin başlama durumu için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi d^2}{4} (\alpha u_{*,c})^2 = f \left((\rho_s - \rho) g \frac{\pi d^3}{6} - \frac{1}{2} \rho C_L \frac{\pi d^2}{4} (\alpha u_*)^2 \right) \quad (3.17)$$

Bu denklem düzenlenerek aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{u_{*,c}}{(S_s - 1)gd} = \frac{f}{\alpha^2 C_D + f \alpha^2 C_L} \frac{4}{3\alpha^2} \quad (3.18)$$

Shields parametresi aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\theta = \frac{u_*^2}{(S_s - 1)gd} \quad (3.19)$$

Aşağıdaki durumlarda sediment hareketi başlar:

$$u_* > u_{*,c} \Rightarrow u_{*,c} = \text{Kritik kayma hızıdır.}$$

$$\tau_b > \tau_{b,c} \Rightarrow \rho u_{*,c}^2 = \text{Kritik taban kayma gerilmesidir.} \quad (3.20)$$

$$\theta > \theta_c \Rightarrow \theta_c = \frac{u_{*,c}^2}{(S_s - 1)gd} = \text{Kritik Shields parametresidir.} \quad (3.21)$$

Kum için kritik Shields parametresi $0.01 \leq \theta_c \leq 0.02$ aralığında değerler alır.

Deneysel çalışmalar sonucu bulunan ve parçacığın Reynolds sayısı ile θ_c arasındaki ilişkiyi gösteren diyagram (Shields Diyagramı) Şekil 3.6'da verilmiştir. Parçacığın Reynolds sayısı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\text{Re} = \frac{u_* d_n}{\nu} \quad (3.22)$$

Şekil 3.6'da üç akım durumu için belirgin 3 farklı bölge bulunmaktadır.

1. Hidrolik olarak pürüzsüz akım, $\text{Re} = \frac{u_* d_n}{\nu} \leq 2$

d_n viskoz alt tabaka kalınlığından daha küçüktür. Parçacıklar viskoz alt tabaka ile kaplanır ve θ_c değeri partikül çapından bağımsızdır. Deneysel çalışmalardan, $\theta_c = 0.1/\text{Re}$ olarak verilebilir.

2. Hidrolik olarak pürüzlü akım $\text{Re} \geq 500$

Viskoz alt tabaka bulunmaz ve θ_c akışkan viskozitesinden bağımsızdır. $\theta_c = 0.06$ olarak sabit değerdedir.

3. Hidrolik olarak geçiş akımı $2 \leq \text{Re} \leq 500$

Parçacığın büyüklüğü viskoz alt tabakanın kalınlığının belirli bir aralığının içindedir. $\text{Re} = 10$ için θ_c 'nin minimum değeri 0.032'dir.

Parçacığın çapı ile viskoz alt tabaka kalınlığı arasındaki ilişki, boru akımları için verilen analizlere benzetilerek de verilebilir. Çünkü deneysel çalışmalar açık kanal içerisindeki türbülanslı akım için de aynı şeylerin geçerli olduğunu göstermiştir. Bu durumda taban, hidrolik cilalı taban ve hidrolik pürüzlü taban olarak isimlendirilebilir. Taban pürüzlülüğünün parçacıklar tarafından oluşturulduğu düşünülerek ve cidar pürüzlülük yüksekliğinin (k_s) parçacığın çapına (d_n) yaklaşık olarak eşit olduğu kabul edilerek $k_s = d_n$ hareketli taban için şu üç cidar sınıfından birine girebilir:

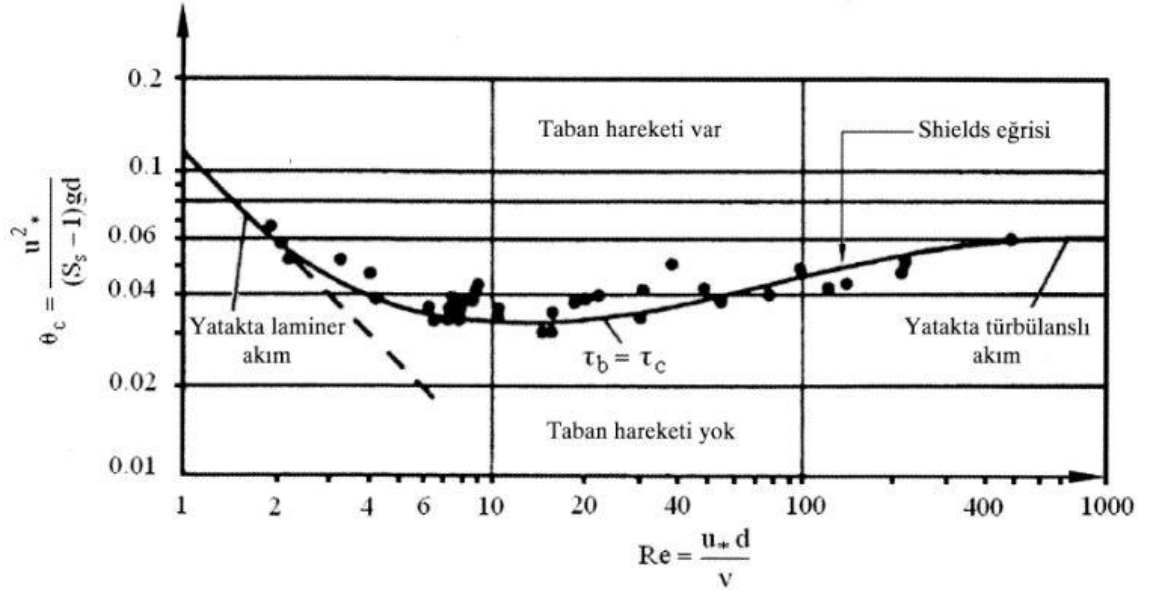
$$d_n \leq 11.6 \frac{v}{u_*} \Rightarrow \text{Hidrolik cilalı taban} \quad (3.22a)$$

$$d_n \geq 70 \frac{v}{u_*} \Rightarrow \text{Pürüzlü taban} \quad (3.22b)$$

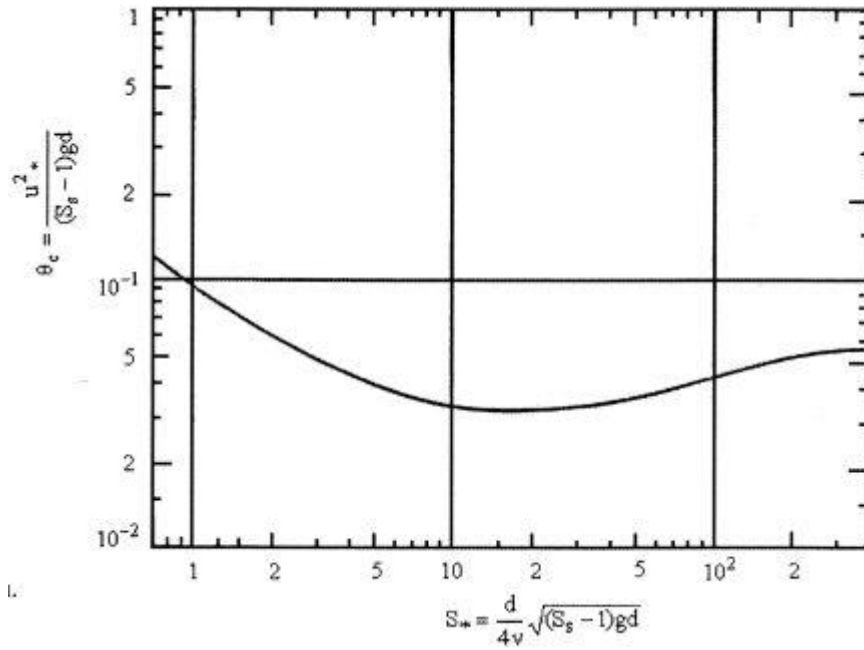
$$11.6 \frac{v}{u_*} \leq d_n \leq 70 \frac{v}{u_*} \Rightarrow \text{Geçiş hali tabanı} \quad (3.22c)$$

Kayma hızının iki eksen üzerinde bulunması nedeniyle Shields diyagramının kullanılması kolay olmamaktadır. Bu nedenle, Shields diyagramı kritik Shields parametresi (θ_c) ile sediment-akışkan parametresi (S_*) ilişkisini gösteren bir diyagram Şekil 3.7'de verilmiştir. Sediment-akışkan parametresi aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$S_* = \frac{d \sqrt{(S_s - 1)gd}}{4\nu} \quad (3.23)$$



Şekil 3.6. Shields Diyagramı [10]

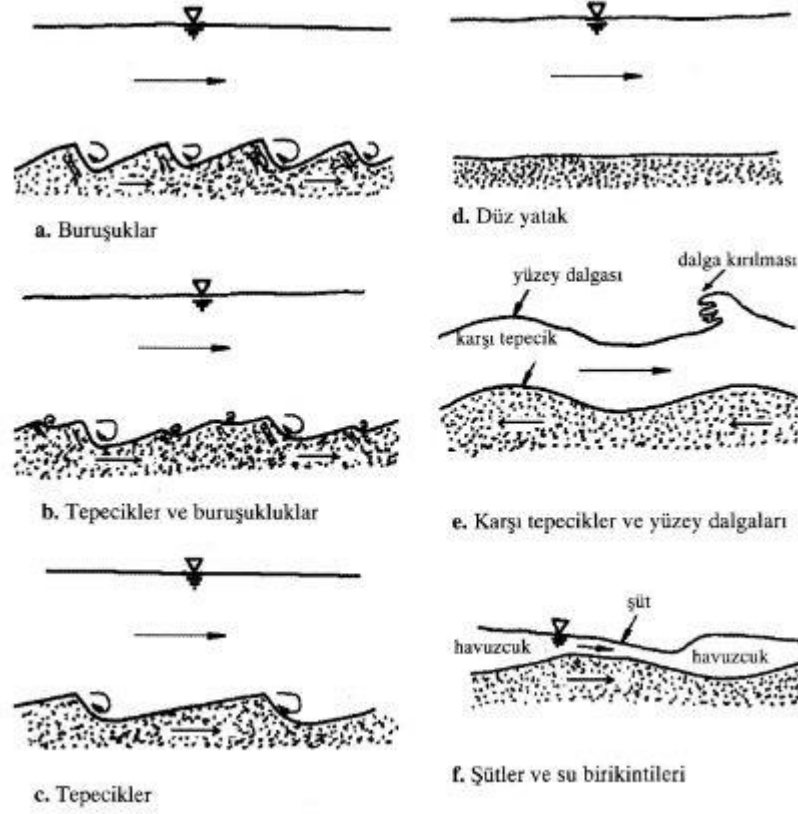


Şekil 3.7. Değiştirilmiş Shields diyagramı [10, 13]

3.5. Yatak Formları, Yatak Pürüzlülüğü ve Efektif Kayma Gerilmesi

Yapılan incelemelerin çoğunda yatak üzerindeki maddelerin tanelerden oluştuğu ve aralarında kohezyon bulunmadığı kabul edilir. Gerçekte kohezyonun hiç olmaması mümkün değildir. Kohezyon etkisi ihmal edilebilir. Şekil 3.8'de kanal içerisinde

hareket eden sürüntü maddesinin kanal tabanında oluşturduğu yatak şekilleri verilmiştir.

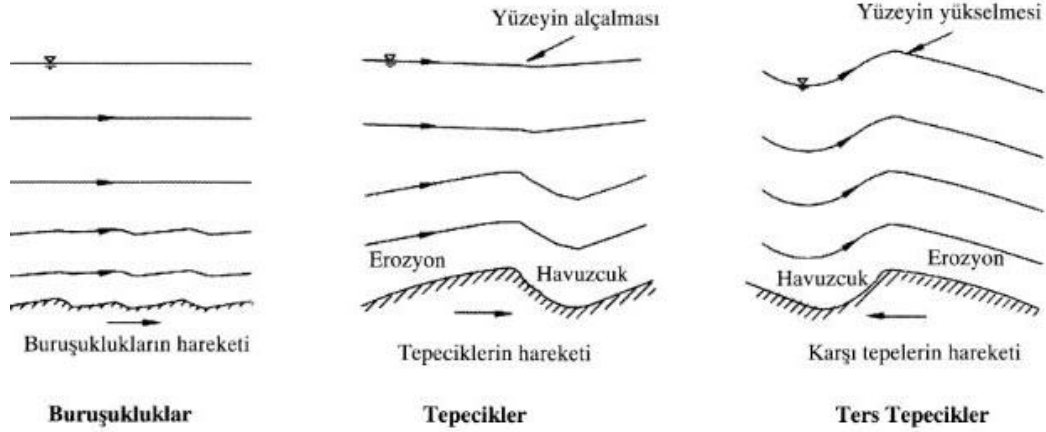


Şekil 3.8. Yatak Şekilleri [10]

3.5.1. Yatak Formları

Su tanelerden oluşan bir yatak üzerinde çok küçük bir hızla aktığı zaman, önce hiç tane hareketi olmaz. Hız artarak sürükleme gerilmesinin sınır değeri aşıldığı zaman tabandaki taneler hareket etmeye başlar. Eğer yatak malzemesi kum gibi ince malzemeden oluşuyorsa ($d_{50} < 0.7 \text{ mm}$) küçük akım hızlarında ilk önce dalgacıklar şeklinde malzeme birikimi oluşur. Bu buruşuklukları kumlu sahillerde görmek mümkündür. Çöllerde rüzgârların tesiri ile benzer şekiller oluşur. Buruşuklukların tipik yükseklikleri $H_r \approx 100d_{50}$, uzunlukları $L_r = 1000d_{50}$ olarak verilebilir. Düşük akım hızlarında buruşuklukların formları oldukça düzenli olup memba eğimleri 6° , mansap eğimleri 32° 'dir. Akım hızının artması ile buruşukluklar üç boyutlu formlara girer.

Daha yüksek hızlarda tepecikler oluşur. Şekilleri buruşukluklara benzer fakat daha büyüktür. Buruşukluklarla beraber göçükürler.

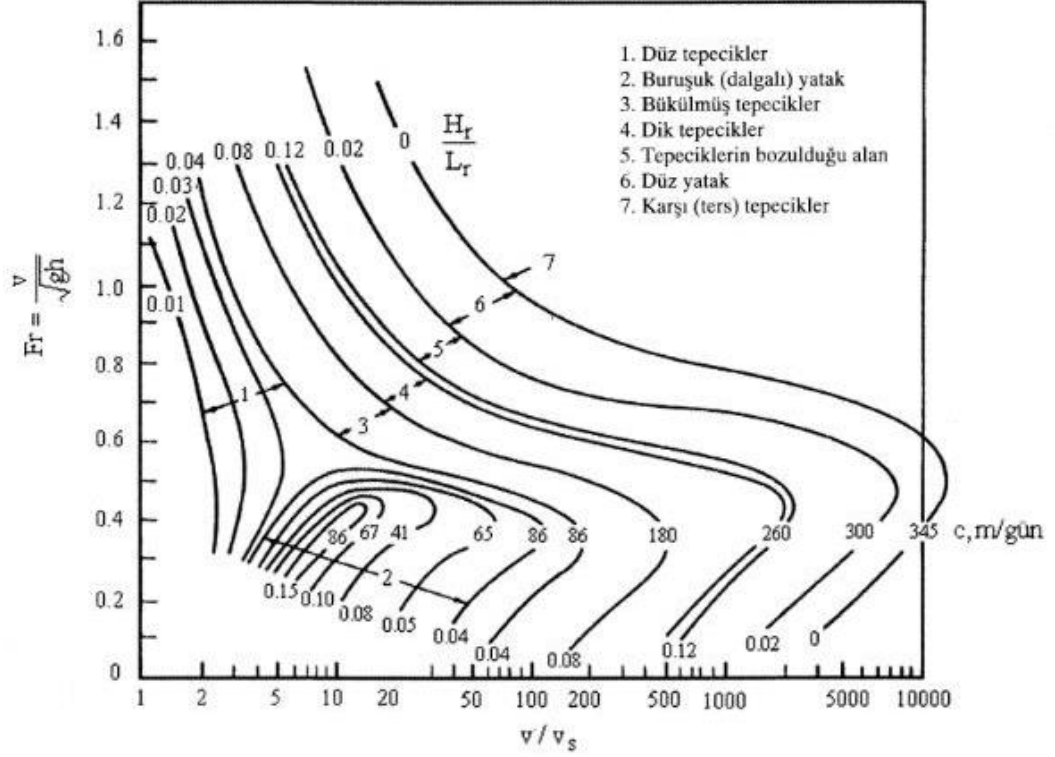


Şekil 3.9. Akım şekilleri [10]

Daha büyük hızlarda buruşukluklar tamamen ortadan kalkar ve yalnız tepecikler kalır. Tepeciklerin büyüklükleri en çok derinlikle kontrol edilir. Tepecikler $d_{50} > 0.6$ mm olan iri parçacıklarla oluşur. Ancak 2 mm'den daha iri malzemelerde yani iri kumlarda buruşukluklara rastlanmaz. Bu durum su altında tanelerin 8 mm/sn'den daha büyük olan çökme hızlarına karşılık gelir. Hızlar daha da artarsa tepeciklerin büyümesi nedeniyle, kretlerindeki su derinliği azalır. Bunun sonucunda krette artan hız ile yıkanarak düz yataklar meydana gelir. Hız daha da artarsa kum dalgaları oluşur ve yüzeyde dalgalanmalar belirir. Froude sayısının birden büyük değerlerinde yani akım sel rejiminde olduğu zaman, karşı (ters) tepecikler oluşur. Su yüzeyindeki dalgalar çok büyüyerek ve dikleşerek memba tarafına doğru kırılır ve tabandaki bu dalgalar sebebiyle karşı tepecikler memba tarafına doğru hareket eder.

Yüksek debilerde sürüntü maddesi miktarı artar. Buna bağlı olarak tabanda dalgacıklar veya ters basamaklar oluşabilir.

Akımın ortalama değeri, akım derinliği ve sedimentin boyutu bilinirse, yatak formları ampirik diyagramlar kullanılarak tahmin edilebilir. Şekil 3.10'da Znamenskaya (1969) tarafından verilen diyagram dalgaların hızının (c) ve sediment çökme hızının (v_s) bilinmesi halinde yatak yükünün taşınımının tahmini için kullanılabilir [10, 14].



Şekil 3.10. Yatak formları [10, 14]

3.5.2. Yatak Pürüzlülüğü-Yatak Formu İlişkisi

Çeşitli akım bölgelerinde, farklı boyutta sedimentlerle ölçülen çok sayıdaki hız değerlerinin analizi, yatak pürüzlülüğü ile yatak tipi arasında aşağıdaki ilişkinin verilebileceğini göstermiştir.

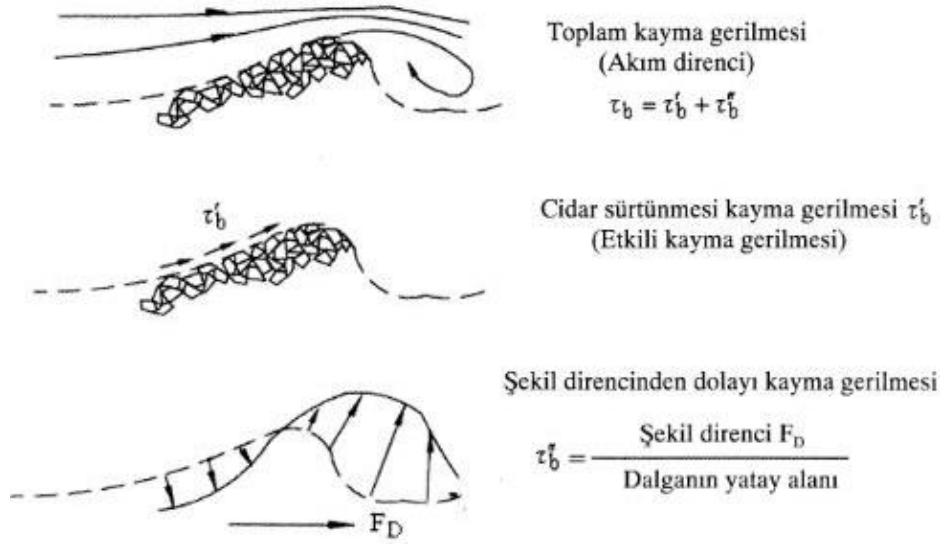
$$k_s \approx (1-10)d_{50} \Rightarrow \text{Düz yatak} \quad (3.24)$$

$$k_s \approx 100d_{50} = H_r \Rightarrow \text{Dalgalı yatak} \quad (3.25)$$

3.5.3. Etkili Kayma Gerilmesi

Dalgalı yatak halinde akımın direncini, cidar direnci (τ'_b) ile dalgaların şekil direncinin (τ''_b) toplamı oluşturur. Şekil 3.11'de dalgalı yatak üzerinde akıma karşı direnç gösterilmiştir. Tek bir sedimente etki ettiği için (τ'_b) aynı zamanda efektif kayma gerilmesi olarak isimlendirilir.

$$\tau_b = \tau'_b + \tau''_b \quad (3.26)$$



Şekil 3.11. Dalgalı yatak üzerinde akıma karşı direnç [10]

Düz yatak halinde $\tau''_b = 0$, ve yatak pürüzlülüğü $2.5d_{50}$ alınarak efektif kayma gerilmesi aşağıdaki denklemlerle bulunabilir:

$$\tau'_b = \tau_b = \frac{1}{2} \rho f v^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{0.06}{\left(\log \left(\frac{12h}{2.5d_{50}} \right) \right)^2} \right) v^2 \quad (3.27)$$

Burada h su derinliği, v ise ortalama akım hızıdır. Dalgalı yatak halinde, τ'_b aynı şekilde bulunur. Fakat toplam gerilme, şekil direnci sebebiyle daha fazladır.

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{0.06}{\left(\log \left(\frac{12h}{2.5d_{50}} \right) \right)^2} \right) v^2 \quad (3.28)$$

τ_b ile τ'_b arasındaki fark, dalgalı yatağın oluşması halinde τ_b 'deki artış ile yatak yükü taşınımının artmamasını açıklamaktadır.

3.6. Sürüntü Maddesi Taşınım Miktarını Veren Formüller

Sürüntü maddesi miktarının bulunması için pek çok ampirik bağıntı geliştirilmiştir. Burada, çok sayıda deneysel veri kullanılarak eğri uydurma yöntemiyle verilmiş olan ve kullanışları uygun ve pratik üç tanesi verilecektir.

Sediment taşınımı için kullanılan simge ve birimi q (m^3/snm)'dir. Bu sedimentin hacmini gösterir. Kazı hacmi için buna porozitenin ayrıca eklenmesi gerekir. Ayrıca burada kohezyonsuz sediment ele alınacaktır.

Sürüntü maddesi taşınım miktarı (q_b) için boyutsuz genel bir bağıntı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\phi_B = \frac{q_B}{d\sqrt{(S_s - 1)gd}} \quad (3.29)$$

3.6.1. Kalinski-Frijlink Formülü

Kalinski-Frijlink Formülü ilk defa Frijlink (1952) tarafından verilmiştir [10, 15]:

$$q_b = 2d_{50}\sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \exp\left(\frac{-0.27(S_s - 1)d_{50}\rho g}{\tau'_b}\right) \quad (3.30)$$

Bu denklemden, τ_b , taban kayma gerilmesi, τ'_b ise efektif kayma gerilmesidir.

3.6.2. Meyer-Peter Formülü

Meyer-Peter (1948) deneysel verilerle yaptıkları çalışmalar sonucunda aşağıdaki formülü vermişlerdir [10, 16]:

$$\phi_B = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5} \quad (3.31)$$

Bu denklemden,

$$\theta' = \text{Efektif Shields parametresi, } \Rightarrow \theta' = \frac{\tau'_b / \rho}{(S_s - 1)gd}$$

τ'_b = Efektif kayma gerilmesi,

θ_c = Kritik Shields parametresidir.

3.6.3. Einstein-Brown Formülü

$$\phi_B = 40K(\theta')^3 \quad (3.32)$$

$$K = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{(S_s - 1)gd_{50}^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{(S_s - 1)gd_{50}^3}} \quad (3.33)$$

Bu denklemden K , Einstein-Brown katsayısını ifade eder [10, 17].

3.7. Askıda Madde Miktarının Hesabı

Bir kanalda permanent rejimli bir akımda türbülans çalkantıları sebebiyle sedimentler askıda tutulur. Sediment konsantrasyonu, 1m^3 sudaki sediment hacmi olarak (cm^3/m^3) şeklinde ifade edilir. Askıdaki sedimentlerin düşey dağılımının hesabı için klasik bir yaklaşım, Prandtl'in karışım boyu teorisi ile yapılabilir.

Çökelme hızı v_s olan üniform bir kum düşünelim. Şekil 3.12'de gösterilen permanent türbülanslı bir akımda yatay düzlem A-A üzerindeki birim yüzeyden birim zamanda aşağıya ve yukarıya doğru hareket eden sediment miktarı,

$$q_u = (v' - v_s) \left(c - \frac{1}{2} L \frac{dc}{dz} \right) : \text{Yukarıya doğru hareket eden madde miktarı} \quad (3.34)$$

$$q_d = (v' + v_s) \left(c + \frac{1}{2} L \frac{dc}{dz} \right) : \text{Aşağıya doğru hareket eden madde miktarı} \quad (3.35)$$

Permanent akım durumunda $q_u = q_d$ olması gerekeceğinden,

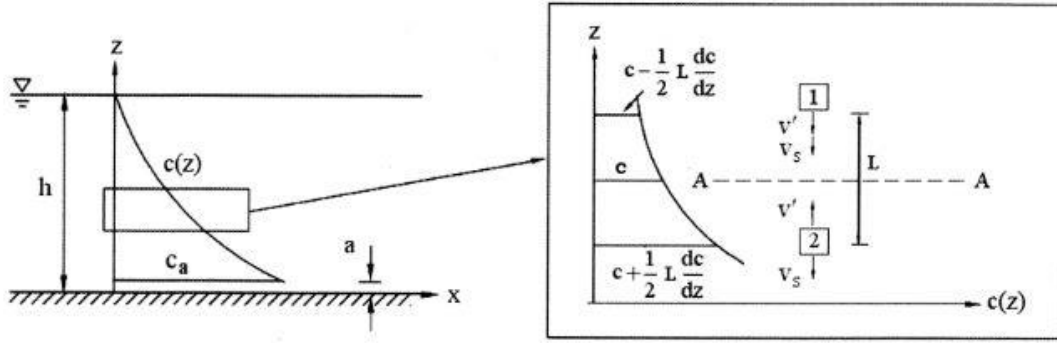
$$cv_s + \frac{1}{2} v' L \frac{dc}{dz} = 0 \quad (3.36)$$

bulunur. Aşağıdaki kabul yapılırsa,

$$\frac{1}{2} v' L = \kappa u_* z \left(1 - \frac{z}{h} \right) \quad (3.37)$$

$\kappa = 0.4$ kabul edilirse, u_* kayma hızı olmak üzere,

$$c v_s + \kappa u_* z \left(1 - \frac{z}{h} \right) \frac{dc}{dz} = 0 \quad (3.38)$$



Şekil 3.12. Permenant türbülanslı bir akımda askıda katı maddeler [10]

Bu denklem $c|_{z=a}$ integrasyon sabiti ile entegre edilirse,

$$c(z) = c_a \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{\frac{v_s}{\kappa u_*}} \quad (3.39)$$

yazılabilir. Bu denklemdeki a referans yüksekliği, c_a referans sediment konsantrasyonu olarak isimlendirilir. Referans yüksekliği, sürüntü maddesi yükü ile askıda madde yükü arasındaki sınırı göstermektedir. Bijker (1992), a değerini yatak pürüzlülük yüksekliği olarak, c_a değerini de sürüntü maddesi taşınma miktarı olarak almayı teklif etmiştir [10, 18].

Sürüntü maddesi taşınımının $z = 0$ ile $z = a = k_s$ yatak yükü tabakası içinde oluştuğu ve bu tabakada sabit bir sediment konsantrasyonu olduğu varsayılmıştır. Şekil 3.13'te Bijker tarafından kullanılan hız profili verilmiştir. Buna göre, pürüzlü akımda da viskoz alt tabakanın bulunduğu, bunun $z = 0$ ile $z = z_0 e$ arasında yer aldığı ve lineer hız dağılımının logaritmik hız dağılımına teğet olduğu belirtilmektedir.

Logaritmik hız dağılımı ile,

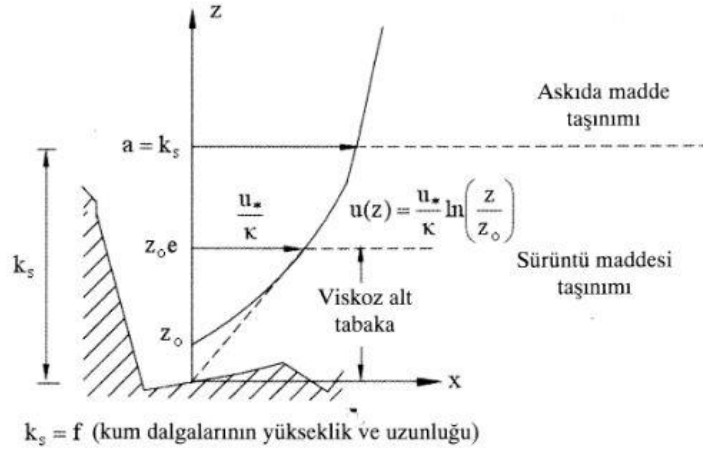
$$u|_{z=z_0e} = u_* / \kappa \quad (3.40)$$

yazılabilir. Sürüntü maddesi tabakasında ortalama hız (v_b) olarak,

$$v_b = \frac{1}{k_s} \left(\frac{1}{2} \frac{u_*}{\kappa} z_0 e + \int_{z_0 e}^{k_s} \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) dz \right) \approx 6.34 u_* \quad (3.41)$$

Yazılırsa, sürüntü maddesi taşınımı aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$q_B = v_b k_s c_a \quad (3.42)$$

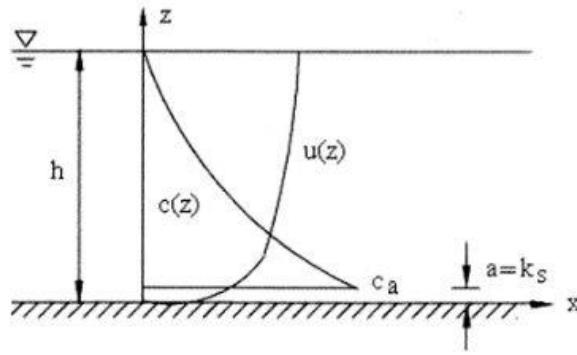


Şekil 3.13. Pürüzlü akımda viskoz alt tabaka [10]

Buna göre referans sediment konsantrasyonu,

$$c_a = \frac{q_B}{v_b} = \frac{q_B}{6.34 u_* k_s} \quad (3.43)$$

olarak yazılabilir. Şekil 3.14'te durumda askıdaki sediment konsantrasyonunun ve akım hızının düşey dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Askıdaki sediment konsantrasyonu ve akım hızının düşey dağılımı [10]

Askıdaki sediment taşınımı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$q_s = \int_a^h u(z)c(z)dz = \int_a^h \left(\frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) c_a \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{\frac{v_s}{\kappa u_*}} \right) dz$$

$$= 11.6u_*c_a a \left(I_1 \ln \left(\frac{h}{0.033k_s} \right) + I_2 \right) \quad (3.44)$$

Burada I_1 ve I_2 , Einstein entegralleri olup aşağıdaki gibi verilebilir [10, 17]:

$$I_1 = 0.216 \frac{A^{(z_*-1)}}{(1-A)^{z_*}} \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B} \right)^{z_*} dB \quad (3.46)$$

$$I_2 = 0.216 \frac{A^{(z_*-1)}}{(1-A)^{z_*}} \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B} \right)^{z_*} \ln B dB \quad (3.47)$$

$$\text{Burada, } A = \frac{k_s}{h}, B = \frac{z}{h}, z_* = \frac{v_s}{\kappa u_*} \quad (3.48)$$

Denklemden, a ve c_a değerleri için Bijker önerisi $a = k_s$, $c_a = \frac{q_B}{6.34u_*k_s}$

kullanılırsa askıda madde miktarı denklemi aşağıdaki şekilde verilebilir [10, 18]:

$$q_s = 1.83q_B \left(I_1 \ln \left(\frac{h}{0.033k_s} \right) + I_2 \right) \quad (3.49)$$

3.8. Toplam Sediment Taşınım Miktarı

Bu konuda çok sayıda formül verilmiştir. Bunlardan iki tanesi aşağıda verilmiştir.

Bijker Formülü [10, 18]:

$$q_t = q_B + q_s = q_B \left(1 + 1.83 \left(I_1 \ln \left(\frac{h}{0.033k_s} \right) + I_2 \right) \right) \quad (3.50)$$

Engelund Formülü [10, 11]:

$$q_t = 0.05v^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{(S_s - 1)g}} \left(\frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} \right)^{1.5} \quad (3.51)$$

4. LİTERATÜR TARAMASI

4.1. Kararlı Akım (Akıntı) Etkisinde Oyulma Derinliği

Chao ve Hennessy (1972): Kararlı akım etkisinde denizaltı boru hatları etrafındaki oyulma derinliklerinin tahmini için bir metot önermiştir. Çalışmaları şu adımları içermektedir:

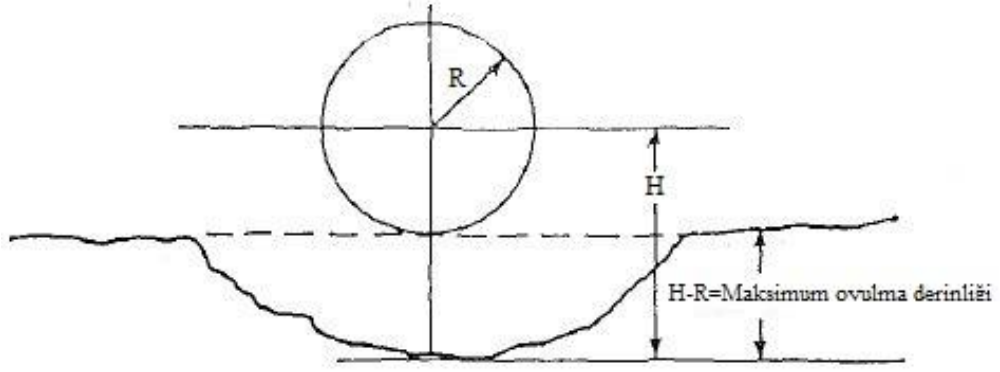
1. Yaklaşan akım durumu için oyulma çukuru boyunca jet hızı ve debinin hesaplanması.
2. Oyulma çukurundaki jet hızı, taban katı madde kayma gerilmesi, kritik kayma gerilmesine eşit oluncaya kadar oyulmayı sürdürmektedir. Oyulma çukuru genişledikçe jet hızı azalır. Oyulma derinliğinin hesap ile bulunabilmesi için oyulmanın temiz su şartlarında gerçekleşmesi gerekir. Bu nedenle oyulma çukuruna katı madde taşınımının olmamalıdır. Boru hattı altında katı madde taşınımı varsa, dinamik dengeye bağlı olarak, oyulma çukuruna taşına katı madde oranı ile oyulma çukurundan ayrılan katı madde miktarı birbirine eşit olmalıdır.

Maksimum oyulma derinliğinin hesabı için incelenen bu iki yönteme ihtiyaç duyulmuştur. İki boyutlu potansiyel akım teorisine bağlı olarak, q_{bot} , oyulma çukurunun birim genişliğinden geçen debi ve V_{avg} , ortalama jet hızı olmak üzere;

$$q_{bot} = V_0 \left(H - \frac{R^2}{2H - R} \right) \quad H \geq R \text{ için} \quad (4.1)$$

$$V_{avg} = \frac{q_{bot}}{(H - R)} = V_0 \left[\frac{2 \left(\frac{H}{R} \right)^2 - \left(\frac{H}{R} \right) - 1}{2 \left(\frac{H}{R} \right)^2 - 3 \left(\frac{H}{R} \right) + 1} \right] \quad H \geq R \text{ için} \quad (4.2)$$

denklemleri verilmiştir. Şekil 4.1’de Chao ve Hennessy (1972) tarafından kullanılan değişkenlerin tanımı ifade edilmiştir [19, 20]. Burada;



Şekil 4.1. Chao ve Hennessy (1972) tarafından kullanılan değişkenler [19, 20]

V_0 = Borunun üzerindeki rahatsız edilmemiş akım hızını,

R = Borunun yarıçapını,

H = Boru merkezinden itibaren ölçülen oyulma derinliğini göstermektedir.

Bu metodun kullanılmasındaki dezavantaj, çözümün yapılması için potansiyel akım teorisinin kullanılmasıdır. Gerçek akışkanlarda, akım ideal değildir ve boru hattının mansabında sınır tabakasından ayrılma meydana gelir. Bu olay akım durumlarını etkiler. Önerilen bu metod oyulma çukurundaki debi ve jet hızı için olduğundan büyük değerler vermektedir. Ayrıca bu yöntem oyulma çukurundaki taban malzemesi için kritik kayma gerilmesinin hesabına gereksinim duymaktadır. Fakat araştırmacılar kritik kayma gerilmesinin nasıl hesaplanacağı hakkında bilgi vermemişlerdir [19, 20].

Kjeldsen et al. (1973): Denizaltı boru hatları altında tek yönlü akım şartlarında yerel oyulma derinliğini araştırmak için kanal deneyleri yapmıştır. Tablo 4.1’de araştırmacıların yaptığı deneylerin sınır durumları özetlenmiştir.

Oyulma derinliği ile ilgili olarak;

S = Boru tabanından itibaren ölçülen oyulma derinliği,

$$\frac{V_0^2}{2g} = \text{Hız yükü,}$$

D = Boru çapı olmak üzere:

$$S = 0.972 \left(\frac{V_0^2}{2g} \right)^{0.2} D^{0.8} \quad (4.3)$$

ampirik eşitliğini önermişlerdir. Bu eşitlik, ilk olarak yatak seviyesi üzerindeki boru hatlarının deney şartları için verilmiştir. Bu denklem, oyulma derinliğinin sadece akım hızına ve boru çapına bağlı olarak değişmekte olduğunu, ayrıca taban malzemesinin ve akım derinliğinin oyulma olayına herhangi bir etkisinin olmadığını kabul etmiştir. 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 [19, 21].

Tablo 4.1. Daha önceki araştırmacıların yaptığı deneylerin sınır durumları [19]

Araştırmacılar	Su Derinliği (m)	Hız (m/s)	Sediment boyutu (mm)	Boru çapı (mm)
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
Mao (1986)	0.25, 0.35	----	0.36	50, 100

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 membasındaki 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, mansap tarafında gerçekleşen oyulma ya da yığılma,

3. Boru altında artan akım hızı nedeniyle meydana gelen oyulma bölgesi (tünel erozyonu) olarak tanımlamışlardır.

Bijker ve Leeuwenstein (1984) borulanma, tünel erozyonu ve art-iz erozyonunu tanımlamışlar ve Kjeldsen'e dayanarak yeni bir ampirik bir bağıntı elde etmişlerdir.

$$S = 0,929 \left(\frac{V_0^2}{2g} \right)^{0.26} D^{0.78} d_{50}^{-0.04} \quad (4.4)$$

Bu denklemde;

S = Boru tabanından itibaren ölçülen oyulma derinliğini,

V_0 = Rahatsız edilmemiş ortalama akım hızını,

D = Boru çapını,

d_{50} = Tane çapını ifade etmektedir.

Araştırmacılar, boru hattı etrafındaki erozyonun ana sebebi olarak, borunun etrafındaki akımın taşıma kapasitesindeki yerel artışı göstermişlerdir. Taşıma kapasitesindeki azalmaya bağlı olarak yığılmanın oluştuğunu belirtmişlerdir [19, 22].

İbrahim ve Nalluri (1986): Sadece tek yönlü akım şartlarında, deniz altı boru hatları etrafındaki yerel oyulmayla ilgili Newcastle Üniversitesi'nde yapılan kapsamlı bir deneysel çalışma neticesinde iki ampirik eşitlik önermişleridir. Bu iki eşitlik şöyledir:

Temiz su durumu için $\left(\frac{V_0}{V_{kr}} < 1 \right)$:

$$\frac{S}{D} = 4.706 \left(\frac{V_0}{V_{kr}} \right)^{0.89} \left(\frac{V_0}{\sqrt{gy_n}} \right)^{1.43} + 0.06 \quad (4.5)$$

Hareketli taban durumu için $\left(\frac{V_0}{V_{kr}} > 1 \right)$:

$$\frac{S}{D} = 0.084 \left(\frac{V_0}{V_{kr}} \right)^{-0.3} \left(\frac{V_0}{\sqrt{gy_n}} \right)^{-0.16} + 1.33 \quad (4.6)$$

Burada;

V_0 = Ortalama akım hızını,

V_{kr} = Taban malzemesi hareketi için kritik hızı,

g = Yerçekimi ivmesini,

y_n = Akım derinliğini,

ifade etmektedir.

Araştırmacılar, 4.5 ve 4.6 denklemlerinde, Kjeldsen'in vermiş olduğu 4.3 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 4.5'de, oyulma derinliği, akım hızıyla doğru orantılı, akım derinliği ile ters orantılı olarak değişirken, denklem 4.6'da tam tersidir. Ortaya çıkan bu çelişkinin nedeni, bu denklemlerin tamamıyla eğri uydurma yoluyla türetilmesi ve oyulma olayının fiziksel açıklamasına yeterince önem verilmemesidir. Ayrıca 4.6 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 malzemesinin çapı, kritik hıza dolaylı etkisi olurken, oyulma olayına etkisi olmadığı görülür.

Temiz su oyulması şartlarında yapılan deneylerden elde edilen veriler ile 4.5 denklemini kullanılarak hesaplanan veriler karşılaştırıldığında, hesaplanan verilerin deney sonuçlarından küçük kaldığı tespit edilmiştir. 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 çalışmada elde edilen sonuçlara göre 3-4 saatlik deney süresinde temiz su oyulma derinliği dengesinin sadece %50 -%70' ne ulaşır. Deney süresi İbrahim ve Nalluri'nin (1986) verilerinde düşük oyulma derinliğinin elde edilmesinin en önemli sebebidir [19, 23].

Bijker ve Leeuwestein (1984); Kjeldsen et al. (1973); İbrahim ve Nalluri (1985), 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 [19, 22].

Maza (1987): Boru hatları altındaki oyulmanın, boru ve düzgün taban arasındaki boyutsuz açıklık ve akımın Froude sayısının bir fonksiyonu olabileceğini belirtmiştir. Maza'ya göre (1987) deneylerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak hazırlanmış olan Şekil 4.2'deki eğrilere bakılarak boru hatları altındaki oyulma derinliğinin tahmin edilebileceğini belirtmiştir [19, 24]. Burada;

Fr = Froude sayısını,

e = Bozulmamış taban ile boru arasındaki açıklığı (pozitif ve ya negatif olabilir),

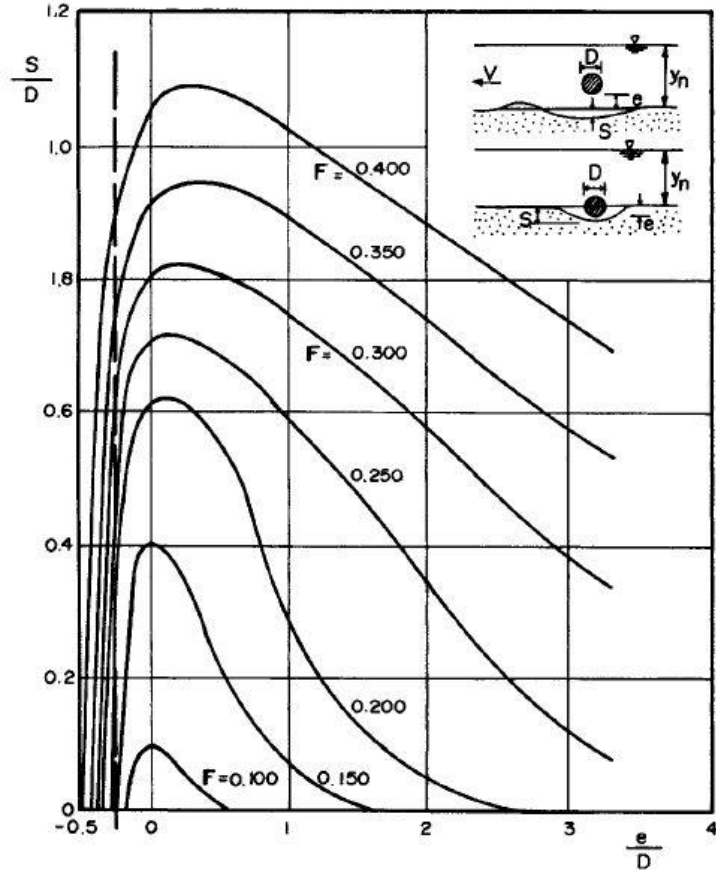
y_n = Akım derinliğini,

S = Oyulma derinliğini,

D = Boru çapını,

V_0 = Akımın ortalama hızını belirtmektedir.

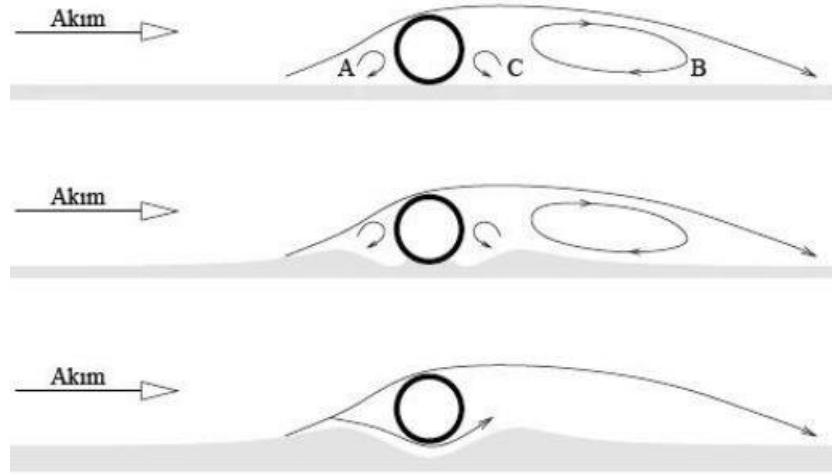
$\frac{e}{D}$, $\frac{S}{D}$ ve Fr değerleri boyutsuz parametreleri ifade etmektedir.



Şekil 4.2. e/D ve Fr sayısının bir fonksiyonu olarak boru hatları altındaki yerel oyulma derinliklerinin değişimi [19, 24]

Mao (1988): Oyulmanın nasıl başladığını açıklamaya çalışmıştır. Boru hattının yerleştirildiği kum taban boyunca basınç dağılımının değişiminden dolayı yeraltı suyu akımının oyulma olayına etkisi olduğunu, ancak bu etkinin tabandaki kum tanelerini hareket ettirebilecek şiddette olmamasına rağmen tanelerin sadece hareket etme kabiliyetlerini sağlaması yönünde olduğunu belirlemiştir.

Şekil 4.3’de 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 getirmekte ancak bu vorteksin etki alanının C vorteksi ile sınırlandırıldığı belirlenmiştir [25, 26].



Şekil 4.3. Oyulma başlangıcının şematik olarak izahı [26]

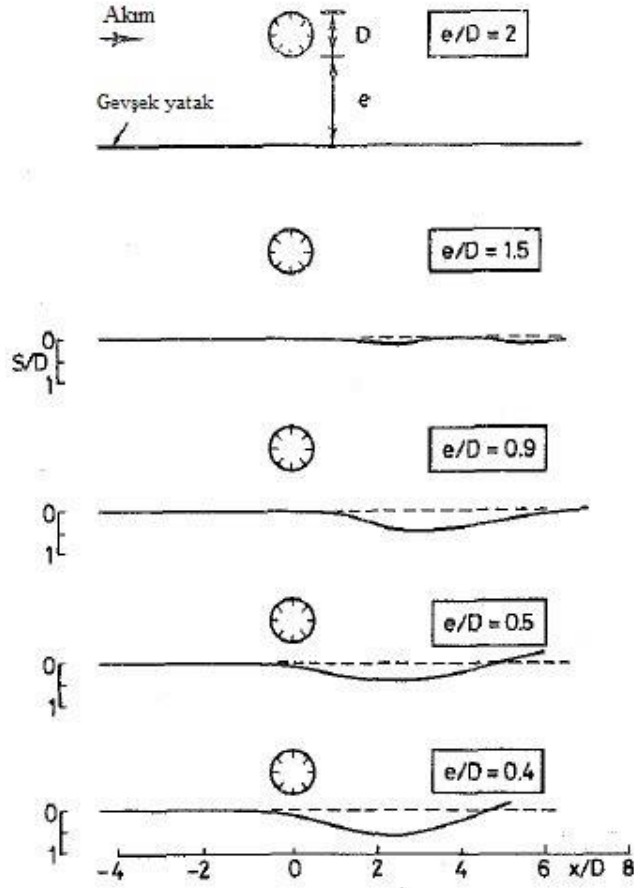
Bu vortekslerin birlikte etkisi ve boru altındaki akım nedeniyle yerel oyulma olayı başlamakta ve borunun altında küçük bir açıklık meydana gelmektedir. Araştırmacı, oyulma olayının başlamasının rahatsız edilmemiş akım hızına bağlı olduğunu belirtmiştir.

Akım hızının çok büyük olması durumunda vortekslerin şiddeti 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 hattının altında açıklığın oluşmadığı belirtilmiştir. Mao, oyulma mekanizmasının başlamasından hemen sonra boru hattı boyunca ve akım doğrultusunda yerel oyulmanın hızla geliştiğini, böylece artık oyulma işleminin iki boyutlu olarak göz önüne alınabileceğini belirtmiştir [25, 26].

Sümer ve ark. (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 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.

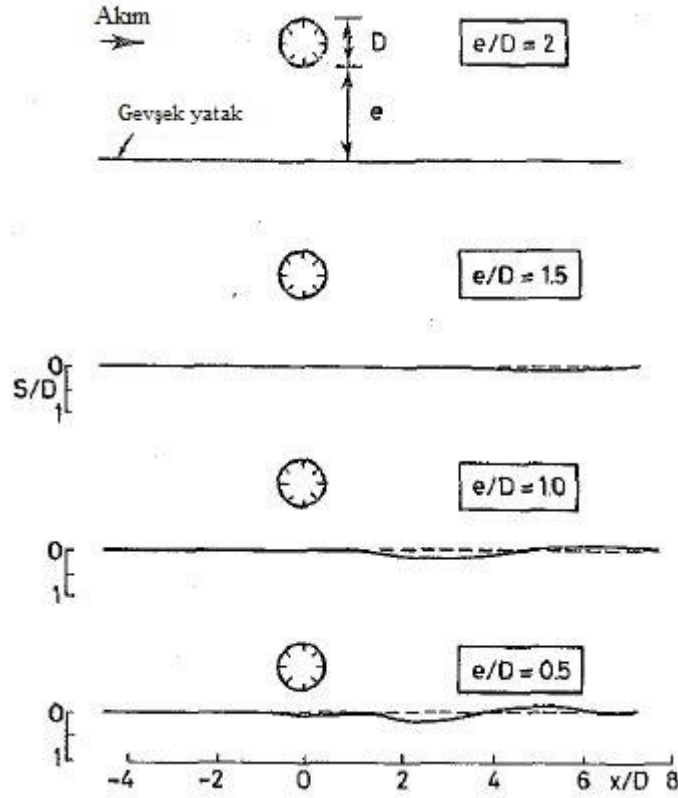
Araştırmacılar vorteks saçılımlarının oyulma olgusu üzerine etkisini araştırmak için kontrollü koşullar altında bir seri deney yapmışlardır. Bu deneylerde boru hattı,

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 4.4 ve Şekil 4.5 oyulmanın borunun tam altında değil biraz mansabında başlayıp geliştiğini gösterdiğinden, oyulmanın art-iz etkisi ile meydana geldiği belirtilmiştir.



Şekil 4.4. Oyulma profilleri $t = 400$ dk., $\theta = 0.018$, $D = 100$ mm, $V_0 = 25$ cm/s [27]

Taban boyunca vorteks saçılımlarının etkilediği bölge sonlu bir uzunluğa sahiptir. Yapılan deneyler sonucunda e/D oranı 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.



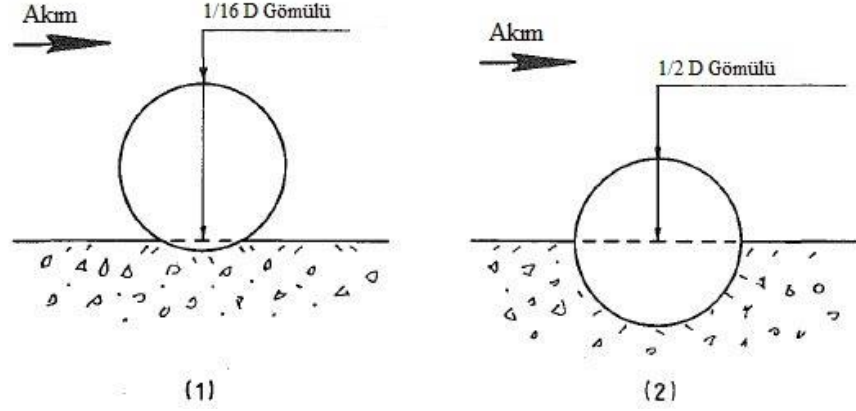
Şekil 4.5. Oyulma profilleri $t = 200$ dk., $\theta = 0.018$, $D = 50$ mm, $V_0 = 25$ cm/s [27]

Bu çalışma, Reynolds sayısının $1-2.5 \times 10^4$ değerleri arasında nehir 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 [19, 27].

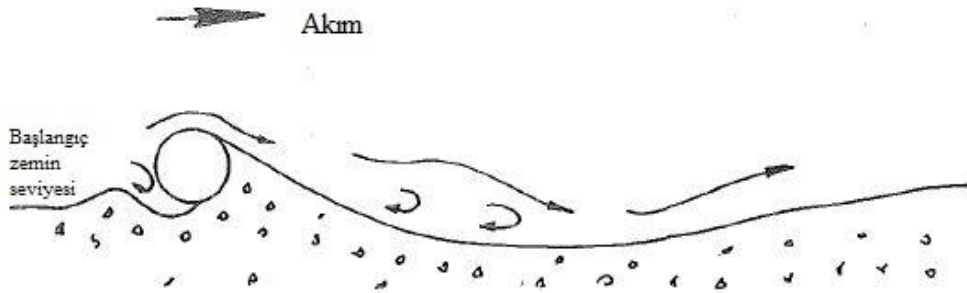
Chiew (1990-1991): Hareketli tabandaki denizaltı boru hatları çevresinde meydana gelen yerel oyulmanın mekaniğinin anlaşılabilmesi için tek yönlü akım şartlarında detaylı bir deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmacı, tünel oyulmasının akım derinliğinin azalmasıyla eşzamanlı olarak başladığını belirtmiştir. Oyulmanın, borunun mansabında başladığı ve borulanmanın etkisiyle malzemenin boru altından fişırma 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 ulaşmaya 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 4.6 (1)'de yerleştirilen borular için, y_n / D değerinin 3,5'ten büyük değerlerinde tünel oyulması görülmeyeceği, eğer boru Şekil 4.6 (2)'deki gibi yerleştirilirse, hiçbir rölatif akım derinliğinde tünel oyulması gerçekleşmeyeceği belirtilmiştir. Her iki örnekte de oyulmanın meydana gelmediği hallerde, art-iz bölgesindeki ters akımın, Şekil 4.7'de görüldüğü gibi taban malzemesini borunun mansap tarafını tamamen kapatıncaya kadar memba yönüne doğru taşıdığını ve tünel oyulmasının başlamasını engellediğini gözlemlemiştir [28].



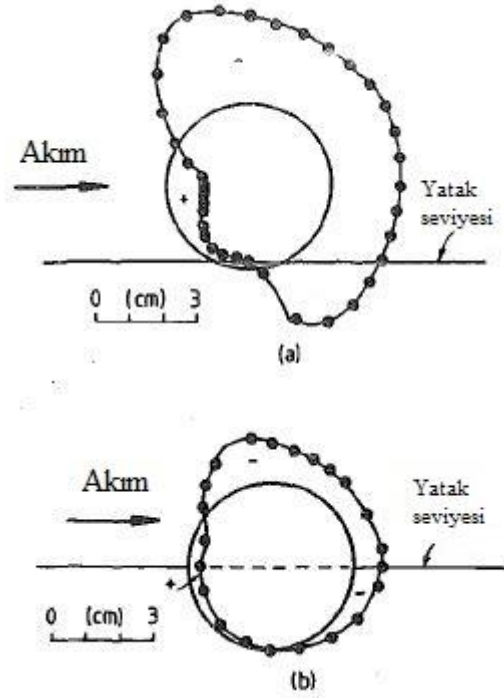
Şekil 4.6. Deneysel kullanılan gömme derinlikleri [28]



Şekil 4.7. Tünel oyulması gerçekleşmediğinde meydana gelen oyulma biçimi [28]

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 4.3'de 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 4.8 ve Tablo 4.2, silindir etrafında ölçülen basınç dağılımlarını ve mansap basınç gradyanını göstermektedir. Ayrıca Tablo 4.2'de, memba ve mansap arasındaki basınç farkları değerlendirilerek hesaplanan ortalama basınç gradyanları da yer almaktadır. Sonuçlara a pozisyonundaki boru için, mansap basınç gradyanının, boşluk suyu gradyanını ($i_f = 0.9$) aştığını, b pozisyonundaki boru için ise aşmadığını göstermiştir. Burada a pozisyonundaki boruda tünel oyulması gerçekleşmiş, b pozisyonundaki boruda gerçekleşmemiştir. Bu da bize, tünel oyulmasının başlangıcında borulanmanın etkin rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 4.8. Boru hattı etrafındaki basınç dağılımları [28]

Tablo 4.2. Borular için basınç gradyanlarının karşılaştırılması [19, 28]

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

Araştırmacı oyulmanın, yn/D 'nin küçük değerlerinde gerçekleştiğini söylemiş ve oyulmanın, borunun mansap kısmında başladığını ifade etmiştir. Kohezyonsuz zeminler için bu tip bir erozyonun, boşluk suyu gradyanını;

$$i_f = (1 - n)(\Delta - 1) \quad (4.7)$$

bağıntısındaki değerin aşılmasıyla gerçekleştiği belirtilmiştir. Burada, n = porozite, Δ =rölatif yoğunluktur [19, 29].

Araştırmacı, hangi basınç gradyanında, nasıl bir tünel oyulması olduğunu belirlemek amacıyla bir dizi deney yapmıştır. Sonuçlar, genellikle zemin mekaniğinde kullanılan boşluk suyu gradyanı formülünün (4.7 bağıntısı), denizaltı boru hatları etrafındaki

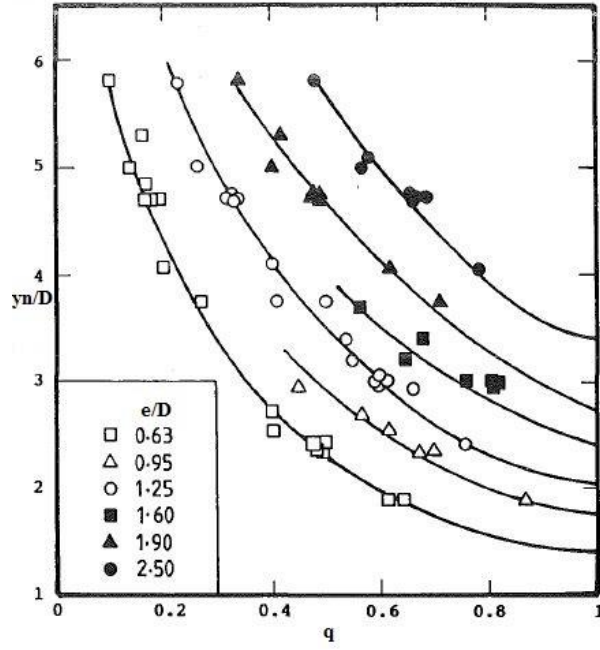
oyulmalar söz konusu olduğunda da kullanılabileceğini göstermiştir. Tablo 4.3, deneylerden elde edilen kritik basınç gradyanlarını göstermektedir. Bu tabloda, hesaplanarak bulunan boşluk suyu gradyanı ile kritik basınç gradyanları arasındaki yakınlık dikkat çekmektedir. Eğer bir kum tabakası içerisinde 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.

Tablo 4.3. Ortalama basınç gradyanları [19, 28]

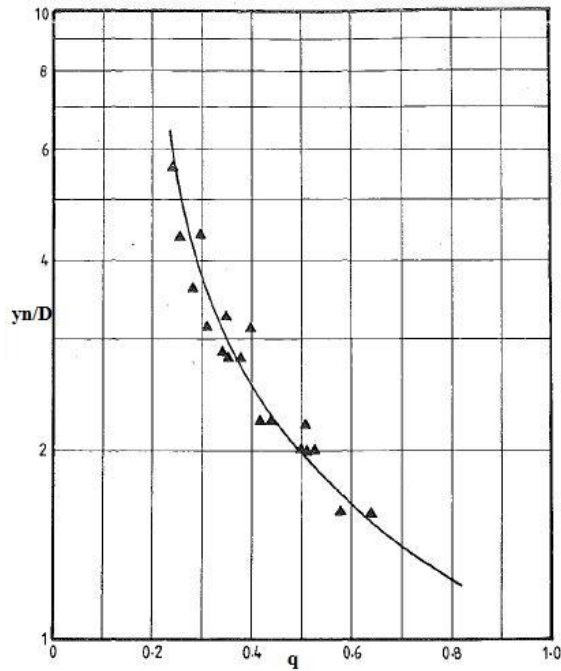
Borunun gömülme derinliği, e (mm)	Borunun açıkta kalan kısmının yüksekliği (mm)	Boru sırtı ile su seviyesi arasındaki mesafe (mm)	Ortalama basınç gradyanları	i_f
3	45	25	1.03	0.9
17	31	55	0.90	0.9
24	24	68	0.90	0.9
37	11	24	0.95	0.9

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 bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir. Büyük rölatif akım 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 4.9'da Chiew'in (1991) elde etmiş olduğu ampirik fonksiyon gösterilmiştir.

Şekil 4.10'da da akım derinliği parametresi, y_n / D , boşluktan geçen akımın gelen akıma oranı, q (q_{bot} / q_0), ile ilişkili olarak ampirik bir fonksiyon verilmiştir. Şekil 4.10'da, Şekil 4.9'dan farklı olarak, e / D 'nin olaya etkisi olmadığı görülmektedir. Şekil 4.10'da Şekil 4.9 gibi, akım derinliğinin artmasıyla boru altı boşluk akımının azaldığı belirtilmektedir. Şekil 4.10'daki eğriler kullanılarak boşluk akımı oranı tayin edilebilir [19, 30].



Şekil 4.9. Chiew tarafından verilmiş y_n/D 'nin q ve e/D parametrelerine bağlı olarak değiştiğini ifade eden grafik [30]

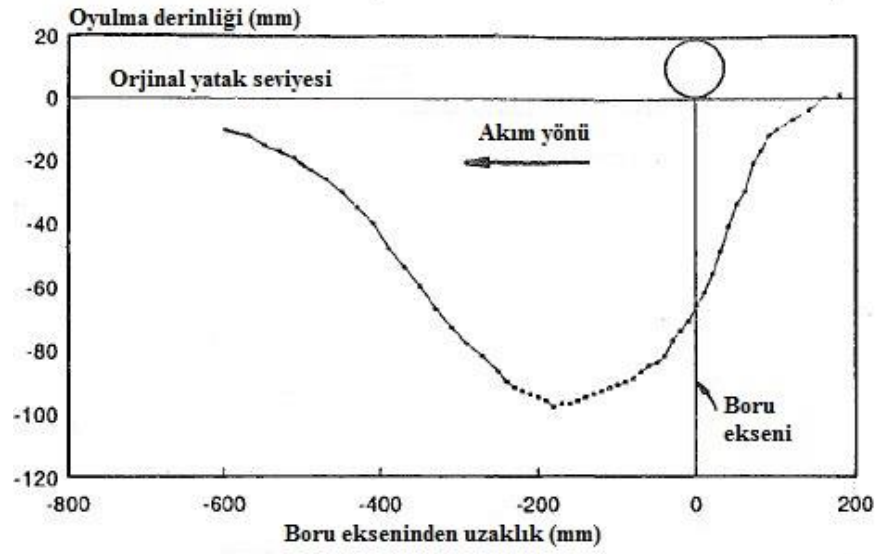


Şekil 4.10. y_n/D 'nin q 'ye bağlı değişimi [30]

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 4.11’de, yukarıdaki akım şartlarında gerçekleşmiş tipik bir oyulma profili görülmektedir.



Şekil 4.11. Tipik denge oyulma profili [30]

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 4.11’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. 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 [19, 30].

Moncada ve Aguirre (1999): Akarsuları geçen ve akıma dik şekilde yerleştirilmiş boru hatlarındaki oyulma olayını etkileyen parametreleri;

V_0 = Ortalama akım hızını,

y_n = Normal akım derinliğini,

ρ = Suyun özgül kütleini,

ρ_s = Taban malzemesinin özgül kütleini,

μ = Suyun dinamik viskozitesini,

J_0 = Enerji çizgisi eğimini,

B = Kanal genişliğini,

d_{50} = Taban malzemesi çapını,

D = Boru çapını,

e = Bozulmamış taban ile boru arasındaki açıklığı,

g = Yerçekimi ivmesini,

ifade etmek üzere sıralamışlardır (Şekil 4.12).

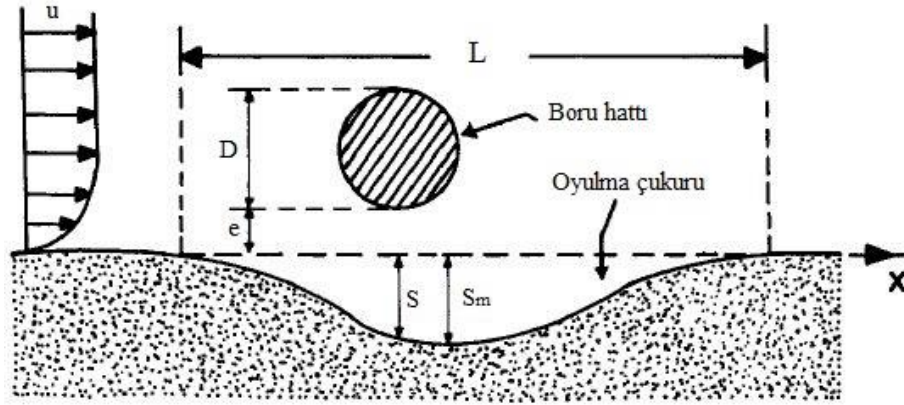
Oyulma çukuru derinliği S ve oyulma çukuru genişliği L , dengeye ulaştığında bu parametreler arasındaki ilişkinin aşağıdaki değişkenlere bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

$$S, L = f_{1,2}(V_0, y_n, \rho, \rho_s, \mu, J_0, B, d_{50}, D, e, g) \quad (4.8)$$

Araştırmacılar, 4.8 eşitliğindeki değişkenlere Buckingham Π teoremi uygulayarak, rölatif denge oyulma derinliği (S/D) ve rölatif denge oyulma çukuru genişliğinin (L/D) aşağıdaki boyutsuz parametrelere bağımlı olduğunu göstermişlerdir:

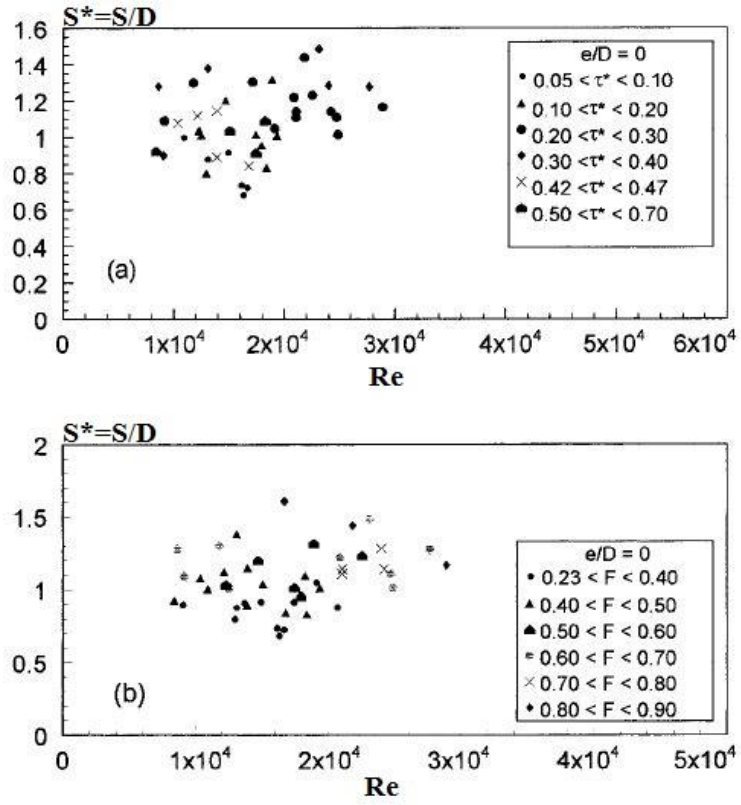
$$S/D, L/D = f_{3,4} (y_n/d_{50}, y_n/D, J_0, y_n/B, Fr, Re, \tau_*, e_*) \quad (4.9)$$

4.9 denkleminde Fr , engelden önce ana kanaldaki akımın Froude sayısı $V_0/\sqrt{gy_n}$, Re , boru Reynolds sayısı ($V_0 D \rho / \mu$), τ_* , katı madde geçişine bağılı olarak verilmiş boyutsuz Shields parametresi ($y_n J_0 / \Delta d_{50}$), e_* , borunun taban düzleminde itibaren rölatif açıklığı (e/D) ve $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$ rölatif yoğunluktur.



Şekil 4.12. Oyulma çukurunda ölçülen değerler [31]

Şekil 4.13'deki iki grafikte, boyutsuz oyulma derinliği S/D , Reynolds sayısının ve Shields parametresinin bir fonksiyonu olarak, Şekil 4.13 a'da, Reynolds sayısının ve Froude sayısının bir fonksiyonu olarak ise Şekil 4.13 b'de verilmiştir. Son şekilde Froude sayısının artışı ile oyulma derinliğinin de arttığı görülmektedir. $e/D = 0$ için, Re , $9 \times 10^3 - 3 \times 10^4$ 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.



Şekil 4.13. (a) Rölatif oyulma derinliğinin (S/D), Re ve τ^* ile değişimi; (b) rölatif oyulma derinliğinin (S/D), Re ve Fr ile değişimi [31]

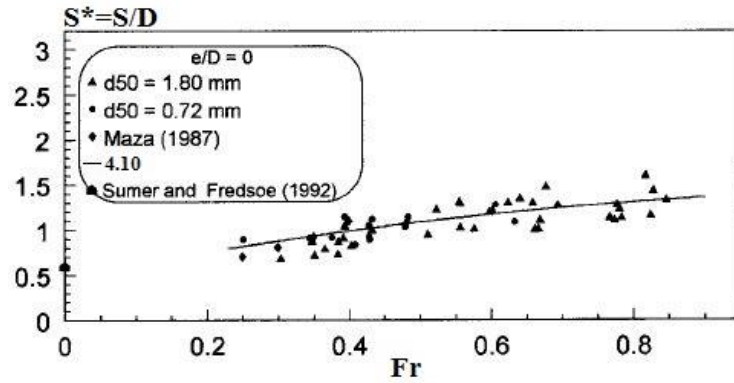
Bu şekillerde, esas olarak Froude sayısının oyulmaya etkili bağımsız bir değişken olduğu ifade edilmiştir. Şekil 4.14'te, $e/D = 0$ için, deneylerden elde edilen rölatif oyulma derinlikleri (S/D), akımın Froude sayısının birer fonksiyonu olarak görülmektedir. Froude sayısı 0.23–0.84 arasında değişmektedir. Şekil 4.13 ayrıca, $e/D = 0$ değerleri için Şekil 4.10'dan 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 (1987)'nin vermiş olduğu ve Moncada-Aguirre (1999)'nin deneylerinden elde edilen sonuçlar, Şekil 4.14'te görüldüğü üzere aynı eğilimdedirler. Şekil 4.14'te, Moncada-Aguirre (1999)'nin 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 (1990, 1992)'nin verdikleri verilerde ise bu değer

0.6'ya tekabül etmektedir. Böylece farklı çalışmalardan alınmış bu verilerin iyi uyum gösterdikleri söylenebilmektedir.

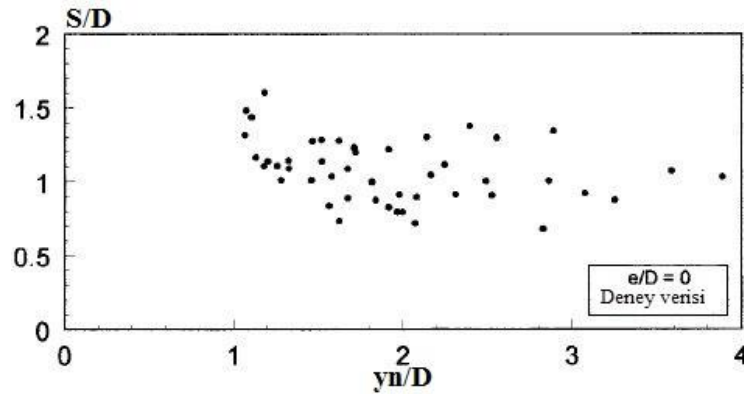
Şekil 4.14 ayrıca, taban malzemesi çapı ne olursa olsun, oyulma derinliği ile Froude sayısı arasında iyi bir ilişki olduğunu da göstermektedir. $0.2 \leq Fr \leq 0.9$ için;

$$S/D = 0.9 \tanh(1.4Fr) + 0.55 \quad (4.10)$$

eşitliği verilmiştir. Burada korelasyon katsayısı $r' = 0.7$ ve rölatif hata % 10'dur. Şekil 4.15'de ise borunun akıma uyguladığı blokaj etkisini gösterebilmek için rölatif oyulma derinliğinin (S/D) rölatif akım derinliği (y_n/D) ile değişimi verilmiştir. Şekil 4.15'den $S/D - y_n/D$ arasında belirgin bir ilişki elde edilemediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.14. Hareketli taban şartlarında Froude sayısının Fr rölatif oyulma derinliğine (S/D) etkisi [31]



Şekil 4.15 y_n/D 'nin S/D 'ye etkisi [31]

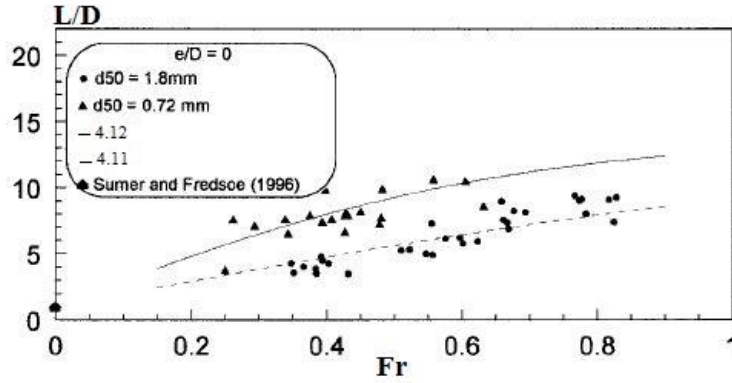
Rölatif oyulma genişliği L/D ile Fr arasındaki ilişki de Şekil 4.16'da verilmiştir. Her iki parametre arasında iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Ayrıca, Fr arttığında L/D 'nin de arttığı, $L/D=1$ için $Fr \rightarrow 0$ 'a yaklaştığı ve küçük tane çaplı zeminlerde büyük oyulma genişliğine erişildiği saptanmıştır. Benzer değerler Sumer ve Fredsoe (1996) tarafından da verilmiştir. Araştırmacılar, $d_{50} = 1.8$ mm için, aşağıdaki eşitliği elde etmişlerdir.

$$L/D = 13 \tanh(0.74Fr) + 1.0 \quad (4.11)$$

$$d_{50} = 0.72 \text{ mm için;}$$

$$L/D = 13 \tanh(1.5Fr) + 1.0 \quad (4.12)$$

4.11 ve 4.12 denklemleri $0.13 \leq Fr \leq 0.9$ için geçerlidir. 4.11 denkleminde korelasyon katsayısı $r' = 0.64$ ve rölatif hata % 23'dür. 4.12 denkleminde ise korelasyon katsayısı $r' = 0.90$ ve rölatif hata % 6.5'dir.

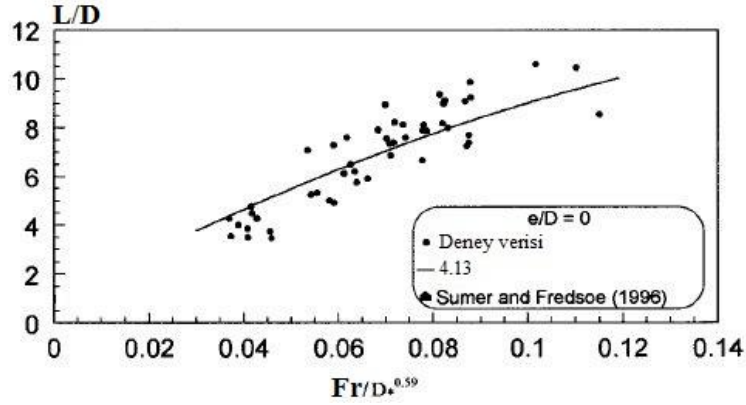


Şekil 4.16. Froude sayısının (Fr) rölatif oyulma genişliği (L/D) ile değişimi [31]

Rölatif genişlik L/D ile $Fr/D_*^{0.59}$ arasındaki ilişki Şekil 4.17'de verilmiştir. Burada $D_* = d_{50}(g\Delta v^2)^{1/3}$, 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:

$$L/D = 13 \tanh(7.2Fr/D_*^{0.59}) + 1.0 \quad (4.13)$$

olur ve bu $0.03 \leq Fr/D_*^{0.59} \leq 0.12$ için geçerlidir. Korelasyon katsayısı $r' = 0.71$ ve rölatif hata %26.6'dır.

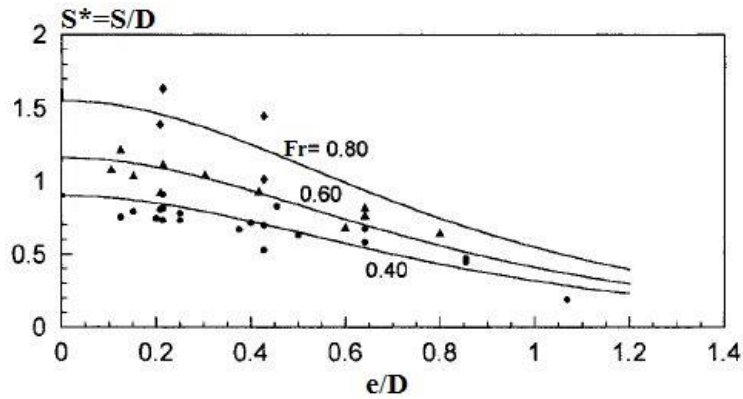


Şekil 4.17. $Fr/D_*^{0.59}$ parametresinin rölatif oyulma genişliğine (L/D) etkisi [31]

Şekil 4.18'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 kullanılabilen eşitlik şöyledir:

$$S/D = 2Fr \operatorname{sech}(1.7e/D) \quad (4.14)$$

Bu denklem Froude sayısının ortalama değerleri için ($Fr = 0.40; 0.60; 0.80$) elde edilmiştir. 4.14 denkleminde korelasyon katsayısı $r' = 0.85$ ve rölatif hata %14'dür. Sonuç olarak, Moncada-Aguirre'nin (1999) bulduğu deneysel sonuçların, Maza'nın (1987) vermiş olduğu eğriler demetine uyduğu söylenebilir.

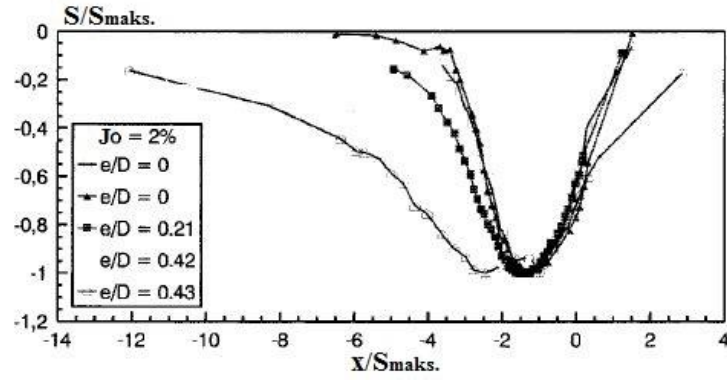


Şekil 4.18. Boru pozisyonunun denge oyulma derinliğine etkisi [31]

Deney kapsamında, boşluk oranının (e/D) ve eğimin (J_0) oyulma çukurunun büyüklüğü ve şekli üzerindeki etkisi ile ilgili bir çalışma da yapılmıştır. Şekil 4.19'da, $J_0 = \%2$ eğim için çeşitli e/D oranlarına karşılık gelen birçok boyutsuz profil görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.19'da, 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 [19, 31]. Şekil 4.19'da;

S_m = Maksimum denge oyulma derinliği,

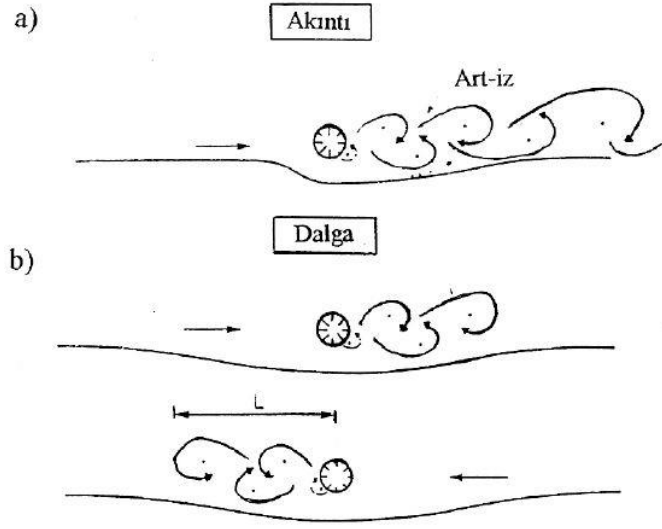
x = Akım yönünde engelden itibaren ölçülen mesafedir.



Şekil 4.19. Farklı boşluk oranları (e/D) ve $\%2$ taban eğimi için oyulma çukurunun boyutsuz profilleri [31]

4.2. Dalga ve Akıntı Etkisinde Oyulma Derinliği

Bu başlıkta, rüzgâr 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 mansap hem de memba tarafında oluşmasıdır. Bu nedenle, Şekil 4.20'de görüldüğü gibi kararsız akım halinde kararlı akımdan farklı olarak, oyulma çukuru sadece mansapta değil, borunun her iki tarafında da yumuşak bir eğime sahip olur.



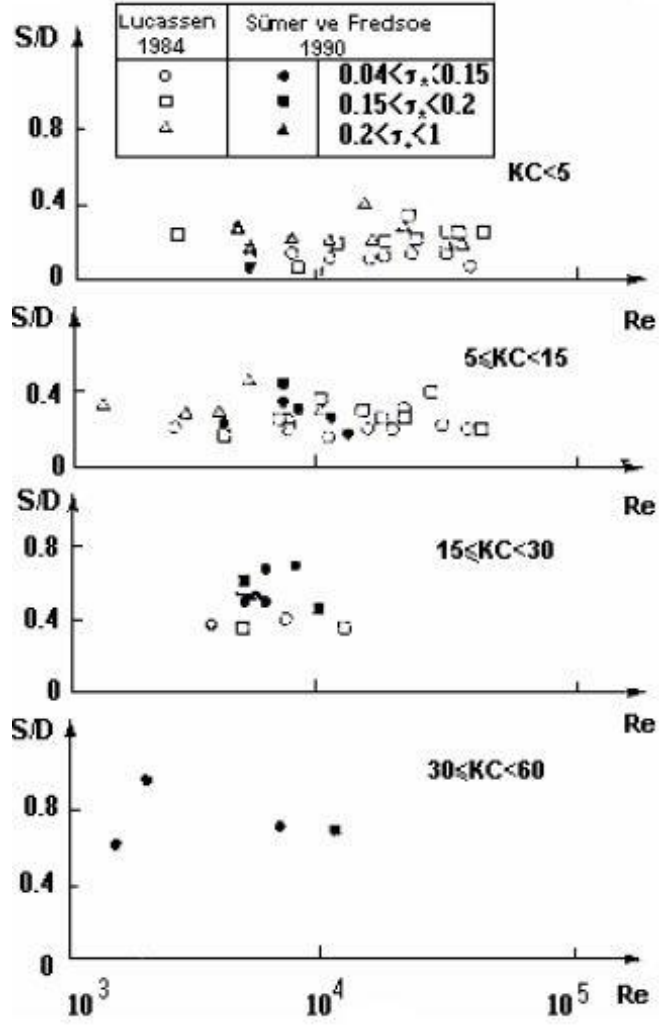
Şekil 4.20. Art-iz etkisi; (a) akıntı, (b) dalga [32]

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

$$KC = \frac{V_m T}{D} \quad (4.15)$$

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 [25, 32].

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 mm çaplı borular kullanmışlardır. Birkaç deneyleri dışında genellikle hidrolik cilalı boruları tercih etmişlerdir.



Şekil 4.21. Dalgalı ortamda oyulma derinliğinin boru Reynolds sayısı ve Shields parametresi ile değişimi [32]

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi boru Reynolds sayısının 10^3 ve 10^5 değerleri arasında oyulma derinliğinin önemli bir değişim göstermediği belirtilmiş ancak Reynolds sayısının $2 \times 10^5 - 3 \times 10^5$ değerleri arasında oyulma derinliğinde küçük bir azalma beklenebileceği ifade edilmiştir. Aynı zamanda Şekil 4.21’de oyulma derinliğinin Shields parametresi ile değişiminin oldukça zayıf olduğu görülmektedir.

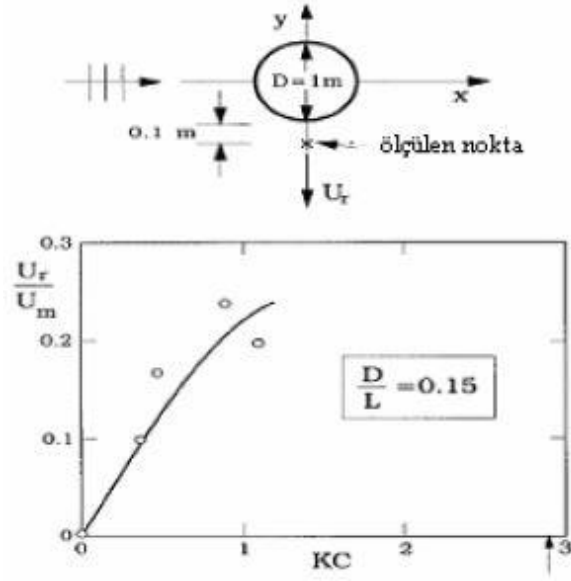
Araştırmacılar KC sayısının denge oyulma derinliğine etkisini de incelemişler ve rölatif denge oyulma derinliğinin KC sayısı ile oldukça uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Hidrolik cilalı borular için gerçekleştirilen deneylerde boru 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 boru Reynolds sayısının vorteks saçılımları üzerine etkisinin kaybolduğunu gözlemlemişlerdir [19, 33].

Sümer ve Fredsoe (1990), boru pürüzlüğünün 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 belirtmişlerdir.

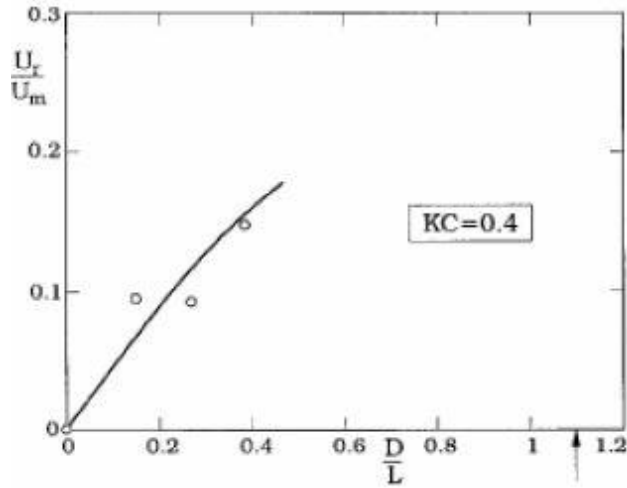
Araştırmacılar ayrıca, denge oyulma derinliğinin belirlenmesinde boru ile taban arasındaki açıklık oranının önemli bir etkisinin olduğunu, ancak bu etkinin KC sayısının artan değerlerinde belirginleştiğini ifade etmişlerdir.

Kısmi olarak deniz tabanına gömülü ve dalga etkisine maruz boru hatları etrafındaki oyulmanın başlangıcını incelemişlerdir. Şekil 4.22, kararlı akım üzerinde KC sayısının etkisini göstermektedir. U_r ile nitelendirilen kararlı akımın, artan KC ile birlikte arttığını göstermektedir. Silindir çapı, su derinliği, ve dalga periyodu verildiğinde, dalga yüksekliği ne kadar büyük ise, KC sayısı da o kadar büyük olur. Diğer taraftan, dalga yüksekliği ne kadar büyük ise, sabit akıntı da o kadar büyük olur. Bu nedenle, artan KC sayısı ile birlikte akım artmalıdır [19, 32].



Şekil 4.22. Zamansal ortalamalı kararlı akım hızının radyal bileşeni [34]

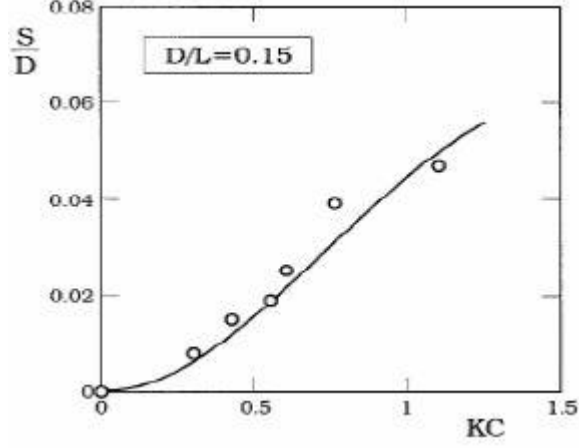
Şekil 4.23, kararlı akım üzerindeki D/L 'nin etkisini, kırınım parametresini, göstermektedir. Radyal hız, bir önceki şekilde olduğu gibi, aynı noktada ölçülür ve veriler $KC = 0.4$ içindir. Şekil 4.23, kararlı akımın artmasıyla D/L 'nin de arttığını göstermektedir. Kararlı akımın, yansıyan ve kırınan dalgalara yatak sınır tabakasının tepkisinin bir sonucu olması nedeniyle, artan D/L ile birlikte artması gerekir.



Şekil 4.23. Zamansal ortalamalı kararlı akım hızının radyal bileşeni [34]

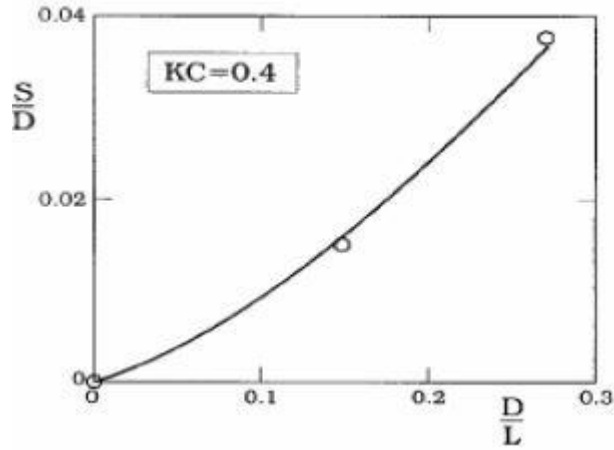
Şekil 4.24, KC 'ye karşı çizilen ($D/L = 0.15$ için) deneylerde elde edilen maksimum oyulma derinliğini belirtir. Şekil, oyulma derinliği ile KC sayısı arasında iyi bir

bağıntı olduğunu gösterir. KC sayısı ne kadar büyük olursa oyulma derinliği de o kadar büyük olur.



Şekil 4.24. Maksimum oyulma derinliği ile KC ' nin grafiği [34]

Şekil 4.25, D/L kırınma parametresinin maksimum oyulma derinliği üzerindeki etkisini gösterir. Veriler $KC=0.4$ içindir. Şekil, D/L 'nin artması ile oyulma derinliğinin arttığını gösterir. Bu, kararlı akım ile ilgilidir. D/L değeri ne kadar büyük olursa, kararlı akım da o kadar büyük olur.



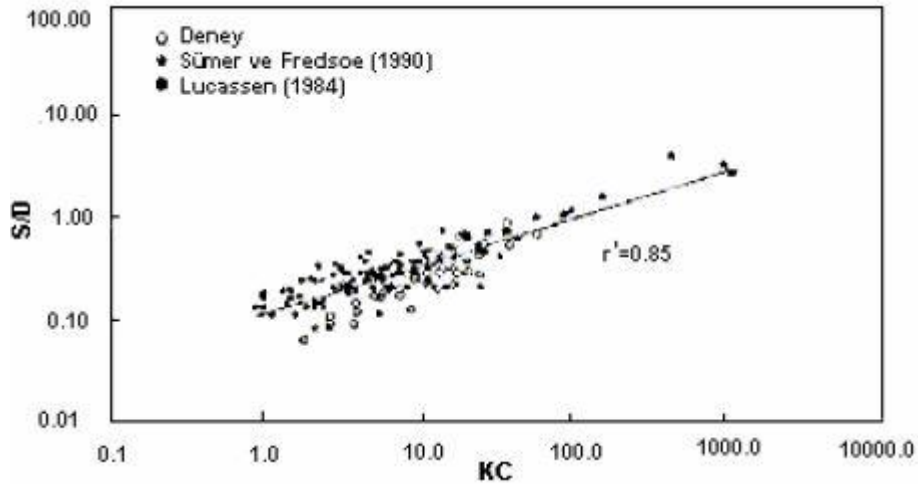
Şekil 4.25. Maksimum oyulma derinliği ile D/L 'nin grafiği [34]

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 [19, 34].

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 [19, 35].

Araştırmacılar, D , boru çapı, H , dalga yüksekliği ve T , dalga periyodunun artmasıyla S , denge oyulma derinliğinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Şekil 4.26'da rölatif oyulma derinliği S/D ile KC sayısının ilişkisi verilmektedir. Deney sonuçları, Sümer ve Fredsoe (1990)'nun ve Lucassen (1984)'in verileri ile karşılaştırılmıştır. Üç araştırmanın verilerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir [19, 32, 35, 36].



Şekil 4.26. Maksimum denge oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi [35]

Elde edilen bu eğrinin denklemi şu şekilde verilmiştir:

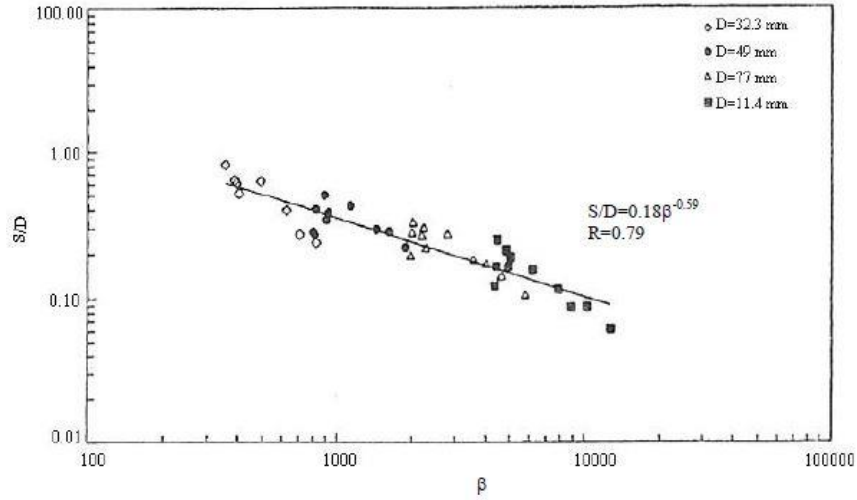
$$S/D = 0.11KC^{0.45} \quad (4.16)$$

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. Kararsız 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:

$$\beta = \frac{KC}{Re} = \frac{vT}{D^2} \quad (4.17)$$

olarak verilmiştir [32].

β 'nin rölatif oyulma derinliğine etkisi Şekil 4.27'de gösterilmektedir. Şekil 4.27'de görüldüğü üzere, β arttıkça S/D küçülmektedir.



Şekil 4.27. Rölatif oyulma derinliğinin β parametresi ile değişimi [35]

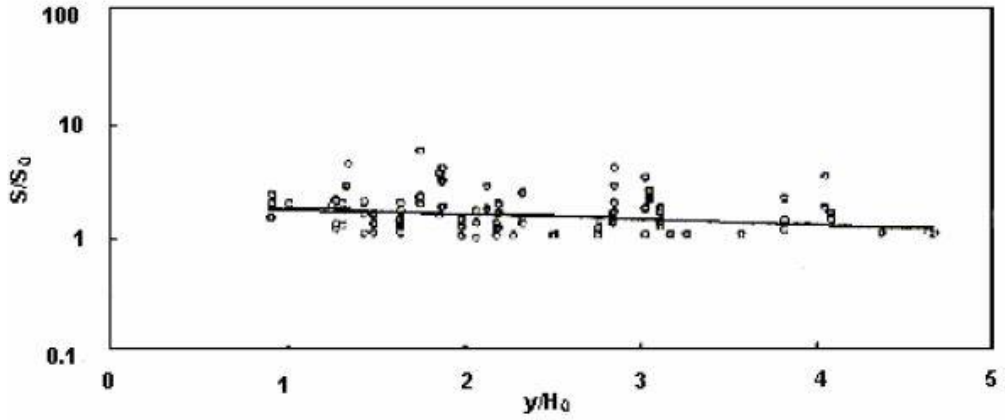
Elde edilen bu eğrinin denklemi şu şekilde verilmiştir:

$$\frac{S}{D} = 0.18\beta^{-0.59} \quad (4.18)$$

Şekil 4.27'nin 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 Şekil 4.28'deki grafik aynı dalga şartlarında gerçekleşen eğimli kanaldaki erozyon ile yatay kanaldaki erozyonu karşılaştırmak için verilmiştir.



Şekil 4.28. Normalleştirilmiş oyulma derinliğinin (S/S_0) derinlik parametresi (y/H_0) ile değişimi [35]

S_0 = Yatay eğimli kanal tabanında gerçekleşen oyulma derinliği,

S = Denge oyulma derinliğini (eğimli kanallar için),

$\frac{S}{S_0}$ = Normalleştirilmiş oyulma derinliğini,

y = Akım derinliğini,

H_0 = Yerel dalga yüksekliğini,

$\frac{y}{H_0}$ = Dalga parametresini ifade etmektedir.

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 4.29'de verilmiştir.

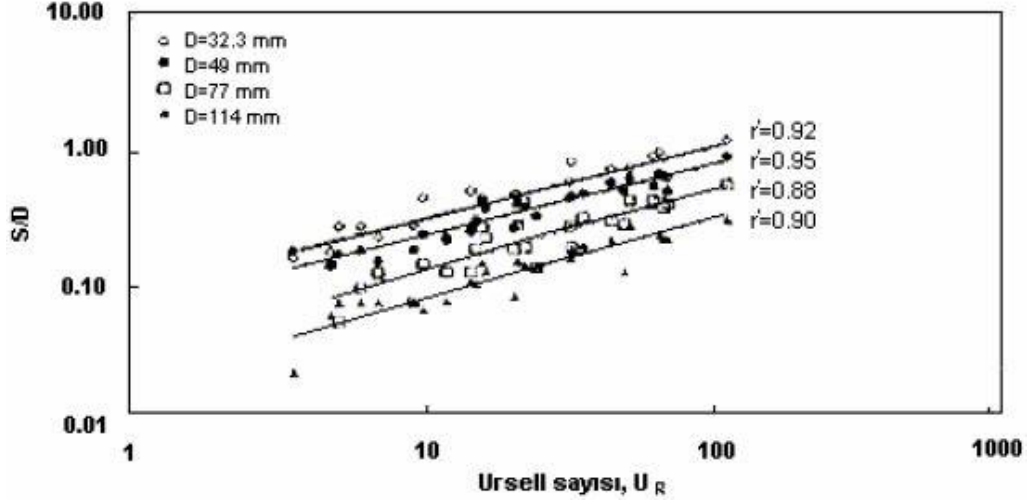
H_0 = Yerel dalga yüksekliği,

L_0 = Yerel dalga boyu,

y = Yerel akım derinliği olmak üzere Ursell sayısı:

$$U_R = \frac{H_0 L_0^2}{y^3} \quad (4.19)$$

olarak verilmektedir.

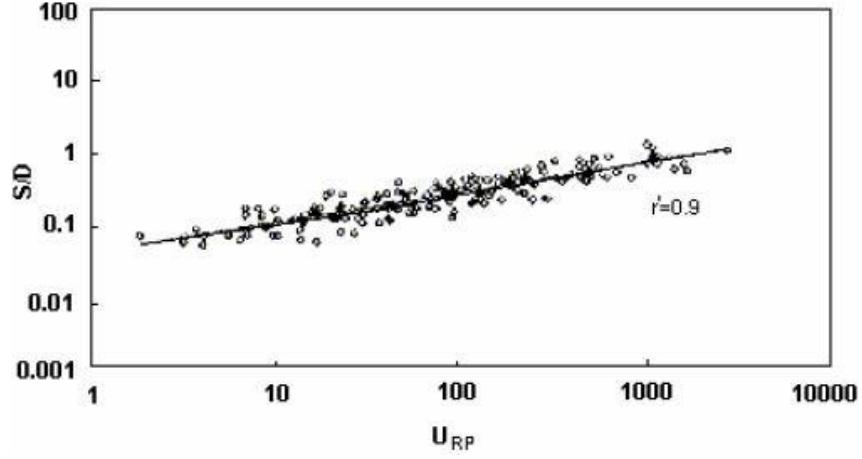


Şekil 4.29. Rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi [35]

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:

$$U_{RP} = U_R \left(\frac{H}{D} \right)^2 = \frac{H^3 L^2}{y^3 D^2} \quad (4.20)$$

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 4.30'da S/D 'nin U_{RP} ile değişimi gösterilmiştir.

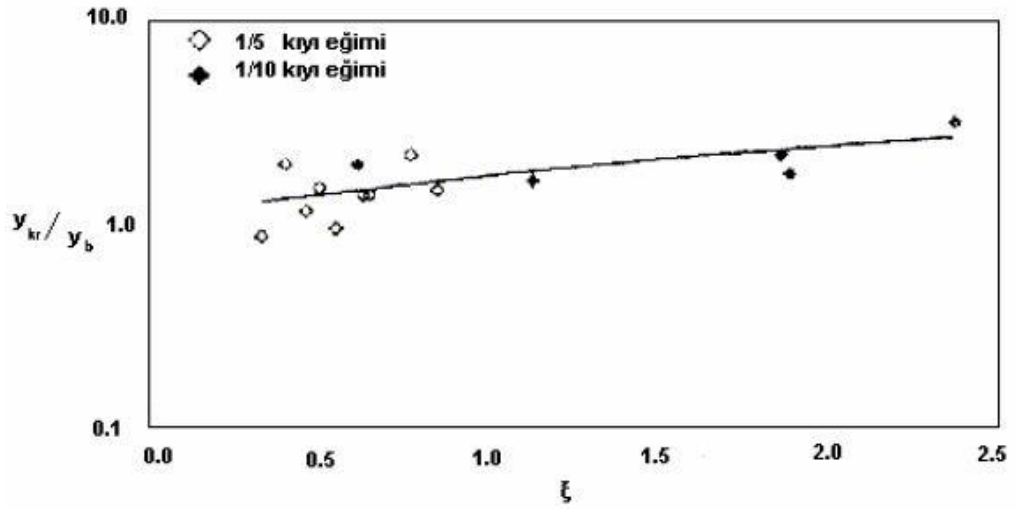


Şekil 4.30. Bütün taban eğimleri için boru Ursell sayısının (U_{RP}) rölatif oyulma derinliği ile değişimi [35]

Elde edilen bu eğrinin denklemi şu şekildedir:

$$\frac{S}{D} = 0.042U_{RP}^{0.41} \quad (4.21)$$

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 Şekil 4.31’de verilen eğriyi elde etmişlerdir.



Şekil 4.31. Maksimum oyulma derinliğinin konumu [35]

Eğrinin denklemi,

$$\frac{y_{kr}}{y_b} = 0.65\xi + 1.1 \quad (4.22)$$

olarak elde edilmiştir.

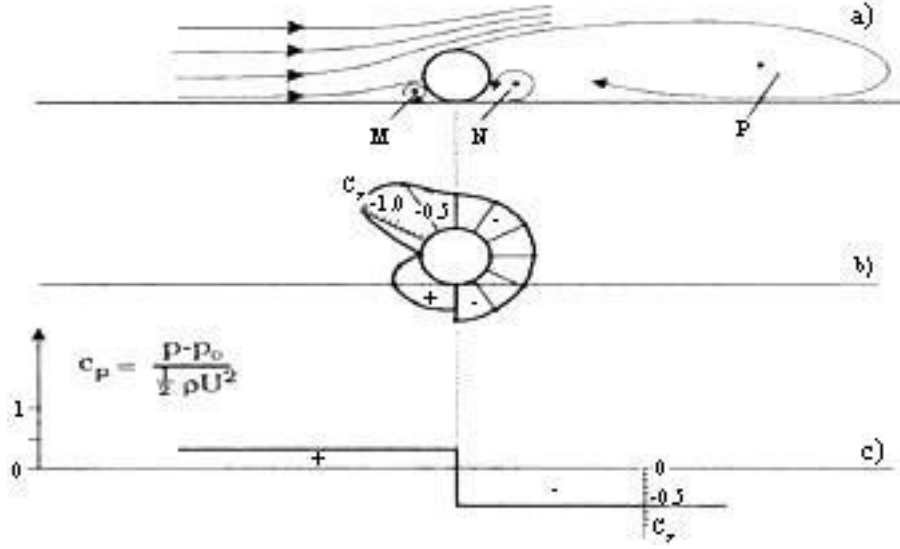
$$\xi = \frac{J_0}{\sqrt{H_0 L_0}} \quad (4.23)$$

Denklemini ise surf parametresini ifade etmektedir.

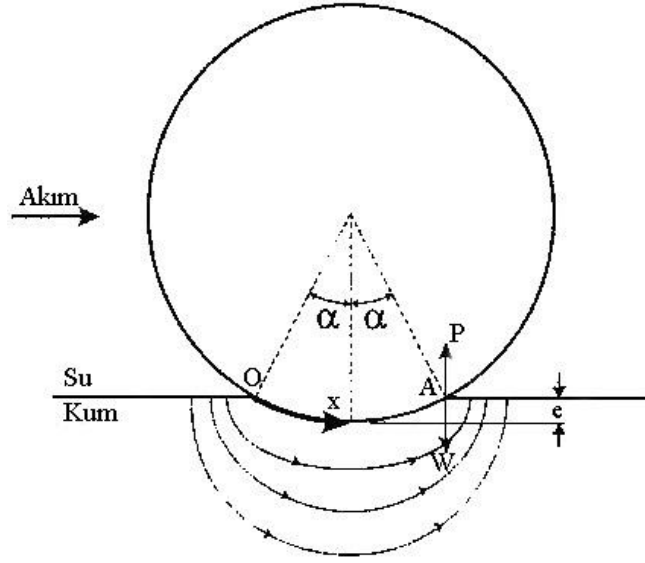
Sümer ve Fredsoe (2001-2002): Hem dalga hem de akıntı etkisinde oyulmanın başlangıcını çalışmışlardır. Boru altındaki basınç gradyanını ölçerek basınç gradyanı tarafından yönlendirilen aşırı sızma akımını göstermişlerdir. Borulanmanın, boru altındaki oyulma başlangıcına neden olan ana faktör olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca bu çalışmada oyulmanın başlangıcıyla ilişkili kritik koşulları da tanımlamışlardır [25, 34].

Akıntı etkisinde bir boru hattı tabana yerleştirildiği zaman borunun memba ve mansap arasındaki basınç farkı (Şekil 4.32) boru altındaki kum taban içinde sızma akımına (Şekil 4.33) neden olmaktadır [25, 37].

Akıntı hızının artmasıyla basınç farkı tarafından yönlendirilenden daha hızlı bir şekilde sızma akımının debisi artırılarak kritik bir noktaya ulaşılır ve aynı anda borunun mansabındaki kum yüzeyi artar ve en sonunda kum ve su karışımı ayrılarak boru altında açıklık meydana gelir. Bu süreç literatürde borulanma olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4.34).



Şekil 4.32. Tabana yerleştirilmiş bir boru için basınç dağılımı [38]



Şekil 4.33. Borunun altında sızma akımı [37]

Burada $P = \frac{\partial p}{\partial x} \Delta x$, sızma kuvveti, $W = \gamma(s-1)(n-1)\Delta x$, tanelerin batık ağırlığı, p , basınç, x , taban ve borunun membası arasındaki birleşme noktasında ölçülen boru çevre uzunluğu, n , porozite, γ_s , tane özgül ağırlığı, γ , suyun özgül ağırlığı, S_s , özgül gravite, $\frac{\partial p}{\partial x}$, sızma akımını yönlendiren basınç gradyanını temsil etmektedir.

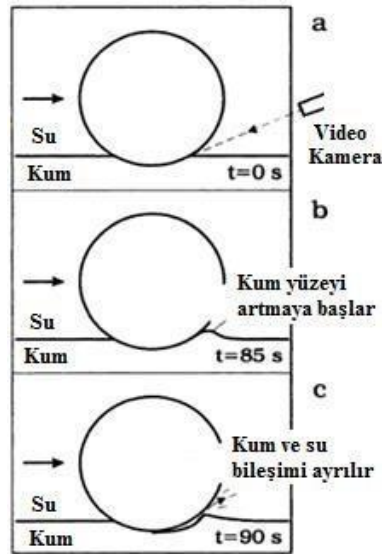
Eğer basınç gradyanı tanelerin batık ağırlığını aşarsa borulanma için kritik koşula ulaşılır ($P \geq W$) [25, 37].

$$\frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{p}{\gamma} \right) \geq (S_s - 1)(1 - n) \quad (4.24)$$

Sümer ve Fredsoe (2001-2002), akıntı durumunda yapmış oldukları çalışmalarda aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir [25, 34].

1. Artan hız ile basınç gradyanı artmaktadır ($p \approx V^2$) (Şekil 4.32c).
2. Basınç gradyanı arttığında boru mansabındaki kum yüzeyinin artmaya başlamasıyla kritik bir noktaya ulaşılmaktadır (Şekil 4.34b).
3. Bu süreç zamanın kısa bir periyodu için devam etmekte (5 s.) ve sonra kum ve yüzey birleşiminde ayrılma meydana gelmektedir (Şekil 4.34c)
4. Oyulmanın başlangıcı iki boyutlu oyulmada asla boru uzunluğu boyunca aynı anda meydana gelmez ancak üç boyutlu oyulmada meydana gelmektedir.
5. Borulanma koşulunun meydana gelebilmesi için basınç gradyanının,

$$\frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{p}{x} \right), (1 - n)(S_s - 1) \text{ değerine ulaşması gerekmektedir.}$$

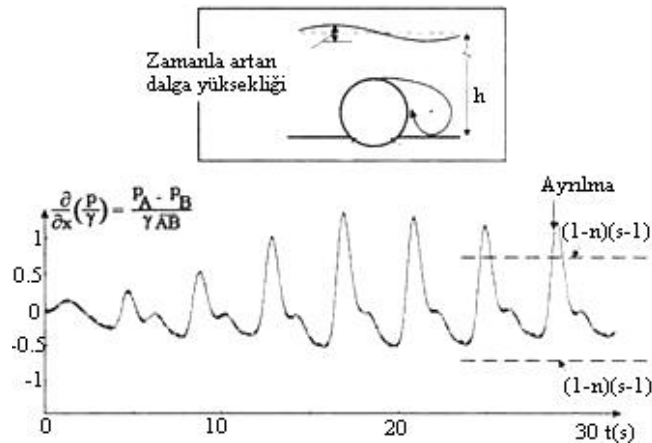


Şekil 4.34. Borulanma [34]

Sümer vd. (2001), ayrıca yapmış oldukları çalışmada Mao (1986), Chiew (1990), Sümer ve Fredsoe (1990) kabullerinin aksine borunun memba ve mansap bölgelerinde oluşan vortekslerin oyulmanın başlangıcından önce borunun altını oymadıklarını belirtmişlerdir.

Dalga koşulunda yapmış oldukları çalışmalarda aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir [25, 34, 39].

1. Oyulmanın başlangıcı dalga tepesinin yarım periyodunda meydana gelmektedir (ayrılma, Şekil 4.35).
2. Dalga çukurunun yarım periyodunda borulanmaya neden olan basınç gradyanı yeterince büyük olmamaktadır.
3. Basınç gradyanı, $\frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{p}{x} \right)$, $(1-n)(S_s - 1)$ değerine ulaştığında veya aştığında oyulmanın başlangıcı meydana gelmektedir (Şekil 4.35).
4. Akıntı durumunda oyulmanın başlangıcı için gerekli basınç gradyanına 5 s mertebeleri gibi oldukça uzun zaman periyodlarında ulaşılırken dalga durumunda her dalga tepesinin yarım periyodu için 0.5 s mertebeleri gibi çok kısa zaman periyodlarında ulaşılır (Şekil 4.35).
5. Ayrıca her bir dalga tabandaki taneleri gevşeterek daha çabuk harekete geçmesini sağlamaktadır. Bu da oyulmanın başlangıcı üzerinde etkili olmaktadır.



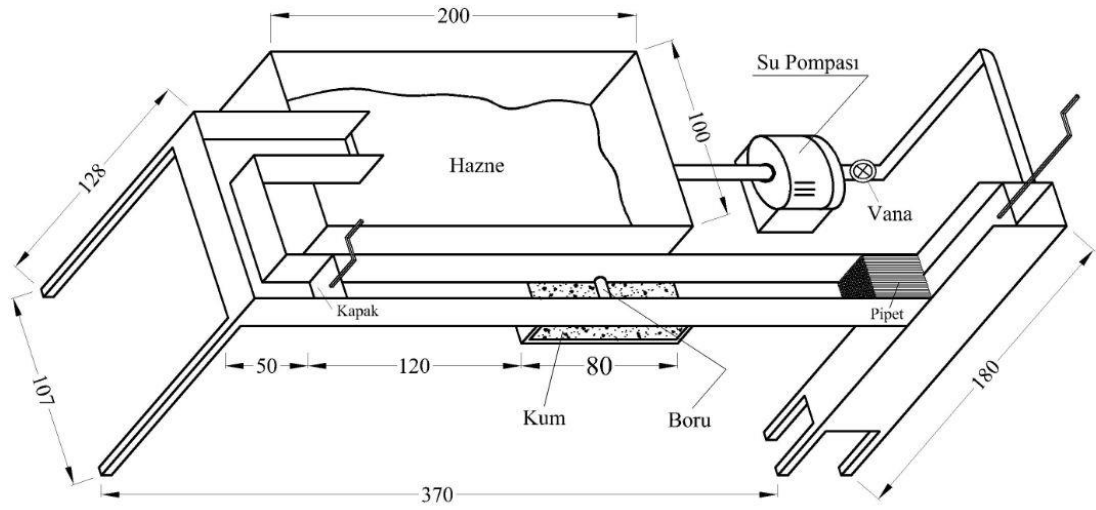
Şekil 4.35. Dalga etkisinde boru altında basınç gradyanının zaman serisi [34]

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

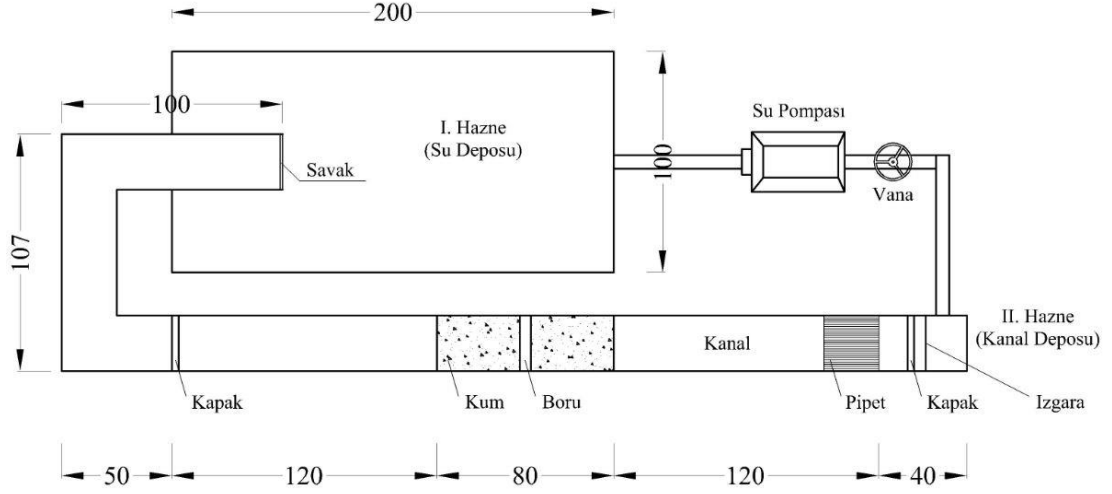
Bu bölümde, deney düzeneğinin kurulması, ölçüm teknikleri, deneyde kullanılan taban malzemesinin özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, boyut analizi yardımıyla deneysel çalışmaya etki eden boyutsuz parametreler belirlenmiştir.

5.1. Deney Düzeneği

Bu çalışma, Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarında mevcut dikdörtgen en kesitli doğrusal bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de perspektifi verilen mevcut doğrusal kanalın genişliği 25 cm, derinliği 25 cm ve uzunluğu 320 cm olup, açık kanalın yan duvarları ve tabanı camdan yapılmıştır. Şekil 5.2’de şematik görünümü verilen dikdörtgen kesitli doğrusal kanalın orta kısmında deneyde kullanılan kum malzemesinin serildiği 80 cm uzunluğunda ve 11 cm derinliğinde bir düşü havuzu bulunmaktadır.



Şekil 5.1. Kanalın perspektif görünümü



Şekil 5.2. Kanalin Planı

Dikdörtgen kesitli doğrusal açık kanal deney sisteminde iki adet hazne bulunmaktadır. Bunlardan ilki 100 cm genişliğinde, 200 cm uzunluğunda ve 120 cm derinliğinde suyun depolandığı haznedir. İkinci hazne ise 35 cm genişliğinde, 40 cm uzunluğunda ve 140 cm derinliğinde kanal deposudur. Su deposundan pompa yardımıyla yükseltile su kanal deposuna aktarılmaktadır. Bu kısma açık kanalın memba kısmı diyebiliriz.

Açık kanalın memba kısmı ve mansap kısmında kapaklar bulunmaktadır. Kanalın memba kısmında bulunan kapak kanal deposundaki su yüksekliğinden yukarıda tutulmuştur. Memba kısmında kapağın hemen ön tarafında, pipetlerin kanal genişliğini kapatacak şekilde üst üste yapılandırılmasıyla elde edilen bir pipet demeti yerleştirilmiştir. Memba kısmının hemen arka tarafına ise bir ızgara yerleştirilmiştir. Bunların amacı, pompadan gelip kanal deposuna dökülen suyun enerjisini kırarak suyun durgunlaşmasını sağlamak ve kanalın orta kısmında bulunan deney sistemine yaklaşan akımın üniform olmasını sağlamaktır. Ayrıca, ızgara filtre görevi yaparak su deposunda biriken kum tanelerinin taşınması yoluyla kanala geçişini engelleyerek pipetlerin tıkanmasını önlemiştir. Bu nedenle tıkanma nedeniyle suyun yükselmesine karşı ızgara belirli aralıklarla deney öncesinde temizlenmiştir. Kanalın mansap kısmında bulunan ayarlanabilir kapak yardımıyla istenilen akım derinliği sağlanmıştır. Kanalda ilerleyen su, kanal genişliğinde dikdörtgen kesitli keskin kenarlı bir savak yardımıyla suyun depolandığı birinci hazneye boşalmaktadır.

Boru hatlarını temsil etmek üzere laboratuvarında kurulan fiziksel modelde çelik borular kullanılmıştır. Çelik boruların her biri 25 cm uzunluğunda olup, 3×3 cm ve 5×5 cm boyutlarındaki kutu kesitli borular ile çapları D=3 cm ve D=5 cm olan dairesel kesitli borulardan oluşmaktadır. Bu borular akım doğrultusuna dik olarak ve taban malzemesi ile boru arasında boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

5.2. Deneylerde Akım Debisinin ve Oyuşma Derinliklerinin Ölçüm Yöntemleri

5.2.1. Portatif Tip Ultrasonik Debimetre ile Ölçüm Yöntemi

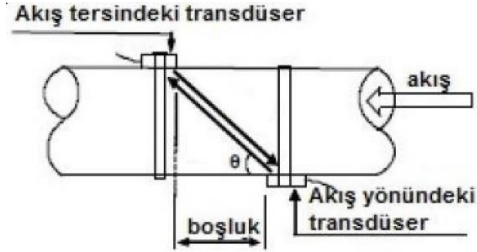
Deneylerde kapalı borudaki sıvının hızını ölçmek için dizayn edilmiş, boru dışından hassas ölçüm yapabilen Şekil 5.3’de gösterilen TUF2000H portatif tip ultrasonik debimetre kullanılmıştır.



Şekil 5.3. TUF2000H portatif tip ultrasonik debimetre

Transit zamanlı debimetre hem ultrasonik iletici hem de ultrasonik alıcı olarak çalışan iki adet transdüser kullanılmaktadır. Transdüserler birbirlerinden belirli uzaklıkta kapalı boru üzerine kelepçelenir. Transdüserler kapalı boru üzerine 15-400 mm arasındaki boru çapları için uygun olan sesin borudan iki kez geçtiği “V” metodu ile monte edilmiştir. Montaj metodunun seçimi boru ve sıvı karakteristiklerine bağlıdır. Debimetre iki transdüser arasında ses enerjisindeki modüle edilmiş

frekansın sıra ile gönderilmesi ve alınması ile çalışır. Ses iki transdüser arasında yol alırken geçen süre yani transit geçiş zamanı ölçülür. Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, ölçülmüş transit zamandaki fark borudaki sıvının hızı ile doğrudan ilgilidir.



Şekil 5.4. Portatif tip ultrasonik debimetrenin çalışma prensibi

$$V = \frac{MD}{\sin 2\theta} \times \frac{\Delta T}{T_{up} T_{down}} \quad (5.1)$$

- θ = Ses dalgası gönderme (iletim) açısını,
- M = Ultrasonik sesin geçiş zamanını,
- D = Borunun iç çapını,
- T_{up} = Pozitif yayılma zamanını,
- T_{down} = Negatif yayılma zamanını,
- ΔT = Pozitif ve negatif yayılma zamanları arasındaki farkı

ifade etmektedir.

Portatif tip ultrasonik debimetre ile ölçüm yapılacak borunun 76 mm dış çapı, 67 mm iç çapı ve 4,5 mm et kalınlığı bir kumpas yardımıyla belirlenerek boru özellikleriyle birlikte cihaza tanıtılmıştır. Transdüserler boru üzerine monte edilmeden önce debimetrenin sinyal kalitesinin daha iyi olması açısından boru üzerindeki boya kazınarak titiz bir şekilde temizlenmiştir. Daha sonra transdüserlerin hava ile temasını azaltarak debimetrenin sinyal kalitesini artırmak için transdüserlere akustik bağlayıcı jel sürülmüştür. Portatif tip ultrasonik debimetre anlık ölçüm yapmaktadır. Bu nedenle yapılan her deneyde debimetrenin LCD ekranının üç adet fotoğrafı çekilerek değerlerin ortalaması alınmıştır.

5.2.2. Boru Hatları Altındaki Tabanda Oyulma Derinliklerinin Ölçüm Yöntemi

Deneyde kullanılan 3×3 cm ve 5×5 cm boyutlarındaki kutu kesitli çelik borular ile çapları D=3 cm ve D=5 cm olan dairesel kesitli çelik boruların tam orta noktalarına 5 mm çapında delik açılmıştır. Boru hatları altındaki tabanda meydana gelen oyulma derinlikleri Şekil 5.5'te görüldüğü gibi akış devam ederken borunun tam orta noktasında açılan delikten, bir kumpas ile birlikte hareket eden çelik bir telin sarkıtılması ile telin tabana değdiği noktanın uzunluğu ölçülmüştür. Bu uzunluk boru çapından düşülerek oyulma derinliği belirlenmiştir.



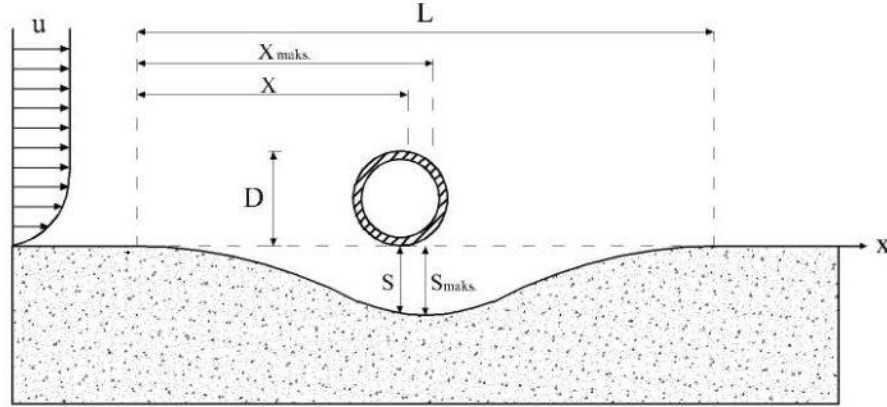
Şekil 5.5. Boru hattı altında meydana gelen oyulma derinliğinin ölçülmesi

Maksimum oyulma derinliğinin yeri, kanalın her iki noktasından dikkatli bir şekilde gözlemlenerek renkli kalemler ile cam üzerine işaretlenmiştir. Buradaki ölçümler de akımı ve taban oyulmasını etkilemeden çok ince kesilmiş bir çelik şerit metre ile alınmaya çalışılmıştır. Ayrıca son deneylerde tutarlılık açısından su tahliye edildikten sonra Şekil 5.6'te görülen boru orta noktasındaki 5 mm'lik deliklerden geçecek şekilde yapılmış tahta bir cetvel delikten sarkıtılarak oyulma derinliği ölçümü kontrol edilmiştir.



Şekil 5.6. Boru hattı altında meydana gelen oyulma derinliğinin ölçülmesi

Yapılan deneylerde akım derinliğinin yanında Şekil 5.7’de gösterilen oyulma çukurunun genişliği L , oyulmanın başlangıcından borunun orta noktasına kadar olan mesafe X ve bu mesafe altındaki oyulma derinliği S , oyulmanın başlangıcından maksimum oyulmanın gerçekleştiği X_{maks} ve bu mesafe altındaki maksimum oyulma derinliği S_{maks} değerleri ölçülmüştür.

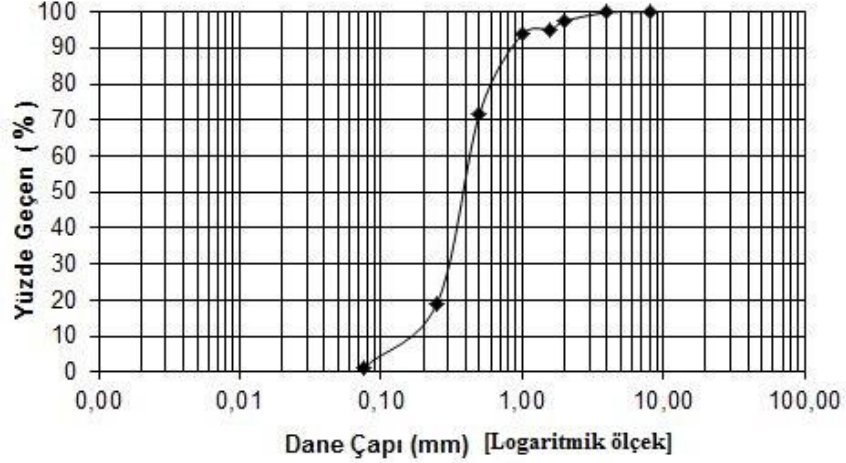


Şekil 5.7. Deneysel çalışmada ölçülen mesafelerin şematik gösterimi

5.3. Deneyde Kullanılan Taban Malzemesinin Özellikleri ve Granülometri Eğrisi

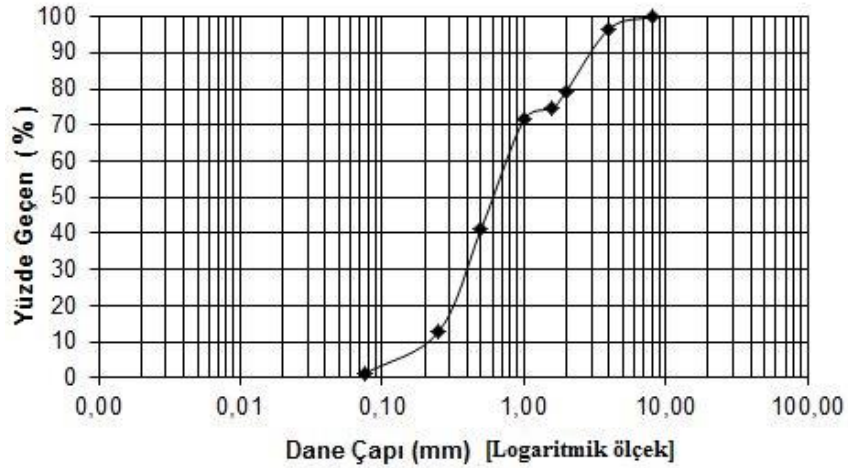
Deneysel çalışmada taban malzemesi olarak 0-3 mm ve 0-5 mm yıkanmış ve elenmiş dere kumu kullanılmıştır. Taban malzemesinin yoğunluğu, piknometre deneyi ile

2.61 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Şekil 5.8’de gösterilen 0-3 mm taban malzemesi için yapılan granülometri çalışmasında $d_{50} = 0.38$ mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.8. 0-3 mm taban malzemesinin granülometri eğrisi

Şekil 5.9’da ise 0-5 mm taban malzemesi için yapılan granülometri çalışmasında $d_{50} = 0.60$ mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.9. 0-5 mm taban malzemesinin granülometri eğrisi

5.4. Boyut Analizi

Boyut analizi, hidrolik mühendisliğinde önemli bir yardımcı araçtır. Teorik ve deneysel çalışmalar birçok hidrolik problemine pratik çözümler getirmiştir. Günümüzde hidrolik yapılar model incelemeleri yapıldıktan sonra tasarlanarak inşa

edilmektedir. Boyut analizi mühendislikte, deneyleri ayarlama, sadeleştirme ve deney sonuçlarını analiz etme olanağı sağlamaktadır. Boyut analizi;

1. Bir birim sistemini diğerine dönüştürmek,
2. Formüllerin çıkarılması ve şekillendirilmesi,
3. Bir deneysel tasarımda değişken sayısının azaltılması,
4. Model tasarım prensiplerini belirlemek,

konularını kapsamaktadır.

Ölçü birimlerine bağlı fiziksel büyüklüklere, boyutlu büyüklükler denir. Bunlar hız, ağırlık, uzunluk, viskozite, kuvvet gibi büyüklüklerdir. Buna karşılık ölçü birimlerinden tamamen bağımsız olan büyüklüklere de boyutsuz büyüklükler denir.

Boyut analizinin esası, farklı değişkenleri kapsayan fiziksel sistemleri daha az sayıda boyutsuz gruplar halinde ifade etmektedir. Bütün fiziksel parametreler, mühendislikte [M] Kütle veya [F] Kuvvet, [L] Uzunluk, [T] Zaman temel boyutları olarak bilinen büyüklükler ile izah edilmektedir [10].

Doğrusal bir kanalda akıma dik olarak yerleştirilen boru hatları etrafındaki oyulma derinliğine ve oyulma çukurunun genişliğine etki eden parametreler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$S, L = f_{1,2}(D, \rho, \nu, y_n, V_0, \rho_s, B, d_{50}, g, S_0) = 0 \quad (5.2)$$

Burada; D boru çapı, y_n kanaldaki su derinliği, V_0 akım derinliğine göre elde edilen ortalama akım hızı, B kanal genişliğini ifade etmektedir.

Deneysel çalışmada olaya etki eden değişken sayısını azaltmak ve deneysel çalışmaların sonuçlarını daha kolay yorumlamak için boyut analizi uygulanarak etkili parametreler Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1’den aşağıdaki bağıntılar yazılabilir;

$$k_4 + k_{10} = 0 \quad (5.3)$$

$$-k_3 - 2k_9 - k_{12} = 0 \quad (5.4)$$

$$k_1 + k_2 + 2k_3 - 3k_4 + k_5 + k_6 + k_8 + k_9 - 3k_{10} + k_{11} + k_{12} = 0 \quad (5.5)$$

Tablo 5.1. Oyulma derinliğine etki eden parametreler için boyut analizi

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}
	S	L	V	ρ_s	y_n	d_{50}	S_0	B	g	ρ	D	V_0
L	1	1	2	-3	1	1	0	1	1	-3	1	1
M	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
T	0	0	-1	0	0	0	0	0	-2	0	0	-1

Bu üç denklemden k_{10}, k_{11}, k_{12} çözülmüşür;

$$k_{10} = -k_4 \quad (5.6)$$

$$k_{12} = -k_3 - 2k_9 \quad (5.7)$$

$$k_{11} = -k_1 - k_2 - k_3 - k_5 - k_6 - k_8 + k_9 \quad (5.8)$$

eşitlikleri elde edilmiştir. Buna bağlı olarak elde edilen boyutsuz parametreler Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Oyulma derinliğine etki eden boyutsuz parametreler

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}
	S	L	V	ρ_s	y_n	d_{50}	S_0	B	g	ρ	D	V_0
π_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
π_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
π_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1
π_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0
π_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0
π_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0
π_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
π_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0
π_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-2

Yukarıdaki işlemler sonucunda oyulmaya etki eden boyutsuz parametreler aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\pi_1 = S/D \Rightarrow S_*, \pi_2 = L/D \Rightarrow L_*, \pi_3 = \frac{v}{V_0 D} = \frac{1}{\text{Re}}, \pi_4 = \frac{\rho_s}{\rho}, \pi_5 = \frac{y_n}{D},$$

$$\pi_6 = \frac{d_{50}}{D}, \pi_7 = S_0, \pi_8 = \frac{B}{D}, \pi_9 = \frac{gD}{V_0^2} = \frac{1}{\text{Fr}^2} \quad (5.9)$$

Bir akım parçacığı için S_0 'ın etkileri küçük olduğundan ihmal edilebilir.

Bazı boyutsuz büyüklükler arasında dönüşümler yapılırsa;

$$\pi_5 / \pi_6 = \frac{\left(\frac{y_n}{D}\right)}{\left(\frac{d_{50}}{D}\right)} = \frac{y_n}{d_{50}}, \pi_6 / \pi_8 = \frac{\left(\frac{d_{50}}{D}\right)}{\left(\frac{B}{D}\right)} = \frac{d_{50}}{B} \quad (5.10)$$

boyutsuzları elde edilir.

Buna göre olaya etki eden boyutsuz parametreler;

$$\frac{S}{D}, \frac{L}{D} = f_{3,4} \left(\frac{1}{\text{Re}}, \frac{1}{\text{Fr}^2}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{y_n}{D}, \frac{y_n}{d_{50}}, \frac{d_{50}}{B} \right) \quad (5.11)$$

olarak ifade edilebilir.

5.11 fonksiyonel bağıntısında görülen boyutsuzlar sırasıyla;

$\frac{S}{D}$ = rölatif oyulma derinliği,

$\frac{L}{D}$ = rölatif oyulma çukurunun genişliği,

$\frac{y_n}{D}$ = rölatif su derinliği,

$\frac{d_{50}}{D}$ = rölatif tane çapı,

$\frac{\rho_s}{\rho}$ = rölatif yoğunluk,

$\text{Re} = \frac{V_0 D}{\nu}$ = boru Reynolds sayısı,

$$Fr^2 = \frac{V_0^2}{gD} \Rightarrow Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gD}} = \text{boru Froude sayısı,}$$

olarak ifade edilebilir [40].

5.5. Deneylerin Yapılışı

Boru hatlarını temsil etmek üzere laboratuvarında kurulan fiziksel modelde çelik borular kullanılmıştır. Çelik boruların her biri 25 cm uzunluğunda olup, 3×3 cm ve 5×5 cm boyutlarındaki kutu kesitli borular ile çapları D=3 cm ve D=5 cm olan dairesel kesitli borulardan oluşmaktadır. Bu borular akım doğrultusuna dik olarak ve taban malzemesi ile boru arasında boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.10).



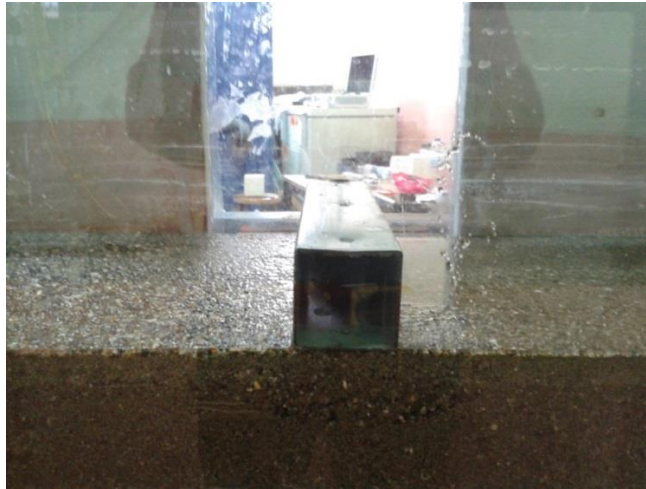
Şekil 5.10. Dairesel kesitli boru altında oyulma

Deneysel çalışma, 3.20 m uzunluğunda, 25 cm derinliğinde ve 25 cm genişliğinde dikdörtgen kesitli doğrusal açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanalin orta kısmında bulunan 80 cm genişliğe ve 11 cm derinliğe sahip düşü havuzuna deneyde kullanılan yıkanmış ve elenmiş taban malzemesi dikdörtgen kanal tabanı ile aynı hizaya gelecek şekilde serilmiştir. Şekil 5.11’de görüldüğü gibi her deney öncesinde taban malzemesinin bulunduğu yerde biriken su, düşü havuzunun altında bulunan tahliye vanası ile tamamen boşaltılmıştır.



Şekil 5.11. Düşü havuzunda bulunan taban malzemesinin suyunun boşaltılması

Daha sonra oyulmuş halde bulunan taban malzemesi, eksilen malzeme tamamlanarak bir spatula yardımıyla homojen olarak karıştırıldıktan sonra Şekil 5.12’de görüldüğü gibi yüzeyi bir mala yardımıyla düzeltilmiştir. Böylece bir sonraki deneye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.12. Taban malzemesinin düzeltilerek deneye hazır hale getirilmesi

Daha önce belirtildiği gibi deney düzeneğine yaklaşan akımın kararlı olmasını sağlamak için kanalın memba kısmına pipetlerin üst üste yapıştırılması ile elde edilen kanal genişliğinde ve derinliğinde bir düzenek yerleştirilmiştir. Akım derinliği borunun 40 cm gerisinden ölçülmüştür. Deney başlatılmadan önce doğrusal kanalın mansap kısmında bulunan kapak öncelikle yüksek tutulmuştur. Kanaldaki suyun istenilen debisi, pompaya bağlı bulunan bir vana yardımıyla yavaş yavaş artırılarak

ayarlanmıştır. Daha sonra kanal mansabında bulunan kapak yüksekliği düşürülerek tabanda çok az katı madde hareketi olacak şekilde suyun hızı ayarlanmıştır. 120 dakika sonra akım derinliği, borunun orta kısmından ölçülen oyulma derinliği ve oyulma derinliğinin yeri, maksimum oyulma derinliği ve maksimum oyulma derinliğinin yeri, oyulma çukurunun genişliği ölçülmüştür. Daha sonra kanal mansabındaki kapak yüksekliği tekrar düşürülerek aynı işlemler en az iki defa daha 120 dakika boyunca tekrar edilmiştir. Deneyler her boru için üç farklı debide ve her debi için en az üç farklı akım derinliklerinde olmak üzere toplamda 84 kez yapılmıştır. Açık kanalda deneyde kullanılan sınır şartları Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Deney sınır şartları ($d_{50}=0.60$ mm)

D (cm)	Q (m³/h)	y_n (cm)	V₀ (m/s)	Fr	Fr²	Re
3	10-21	9.2-5.4	0.12-0.30	0.13-0.41	0.02-0.17	6484-14063
5	10-21	9.2-6.6	0.12-0.34	0.13-0.43	0.02-0.18	6576-14804
3×3	10-21	9.2-4.8	0.12-0.37	0.13-0.49	0.02-0.24	6470-15198
5×5	10-21	9.2-5.6	0.13-0.30	0.15-0.40	0.02-0.16	6720-13893

Tablo 5.4. Deney sınır şartları ($d_{50}=0.38$)

D (cm)	Q (m³/h)	y_n (cm)	V₀ (m/s)	Fr	Fr²	Re
3	10-21	9.2-5.2	0.13-0.30	0.15-0.40	0.02-0.16	6774-14068
5	10-21	9.2-5.0	0.12-0.31	0.13-0.37	0.02-0.13	6582-14277
3×3	10-21	9.2-4.4	0.14-0.32	0.15-0.45	0.02-0.14	6839-14338
5×5	10-21	9.3-5.1	0.14-0.31	0.15-0.36	0.02-0.13	6855-14236

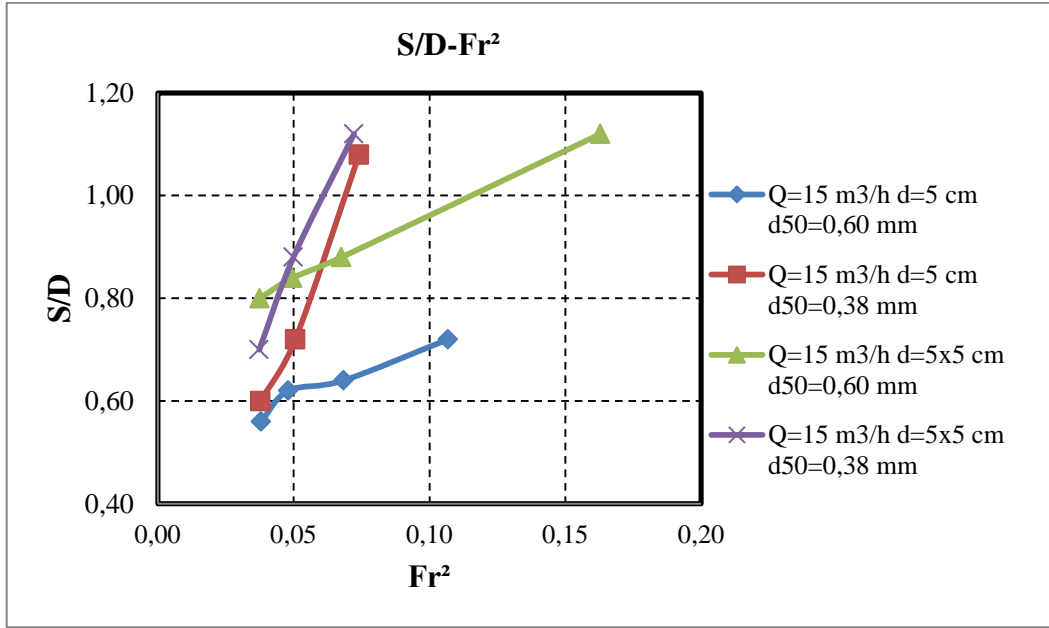
6. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Giriş

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli doğrusal kanalda $d_{50}=0.60$ mm ve $d_{50}=0.38$ mm çaplarında olmak üzere iki farklı taban malzemesi üzerine sırayla boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilen 3 cm ve 5 cm çaplarındaki dairesel kesitli borular ile 3×3 cm ve 5×5 cm ebatlarındaki kare kesitli boruların her biri için sırasıyla ortalama 10 m³/h, 15 m³/h ve 20 m³/h kanal debilerinde ve her debi için ortalama 9.2 cm, 8.4 cm ve 7.6 cm akım derinliklerinde boru hatları etrafında taban malzemesinde meydana gelen oyulma derinlikleri incelenmiştir. Boyut analizi yardımıyla elde edilen rölatif oyulma derinliği (S/D), maksimum rölatif oyulma derinliği (S_{mak}/D) ve rölatif oyulma çukuru genişliği (L/D) değerleri, akımın Froude sayısının karesi (Fr^2) ve açık kanalın Reynolds sayısı (Re) ile olan ilişkileri grafiksel olarak incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen grafikler ek olarak verilmiştir.

6.2. Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D) Akımın Froude Sayısının Karesi (Fr^2) İle Değişimi

Şekil 6.1’de 5 cm çapındaki dairesel kesitli boru ile ebatları 5 cm olan kare kesitli boruda rölatif oyulma derinliğinin (S/D) akımın Froude sayısının karesi (Fr^2) ile değişimi karşılaştırılmıştır. Grafikte görüldüğü gibi Froude sayısının (Fr) artması ile rölatif oyulma derinliği (S/D) artmaktadır. Aynı akım şartlarında, taban malzemesi çapının küçülmesi ile rölatif oyulma derinliğinin (S/D) daha fazla arttığı görülmektedir. Ayrıca, grafikte taban malzemesi çapının aynı olması durumunda, kare kesitli boru hattında oluşan rölatif oyulma derinliği (S/D), dairesel kesitli boru hattında oluşan rölatif oyulma derinliğinden (S/D) daha fazla olduğu görülmektedir.



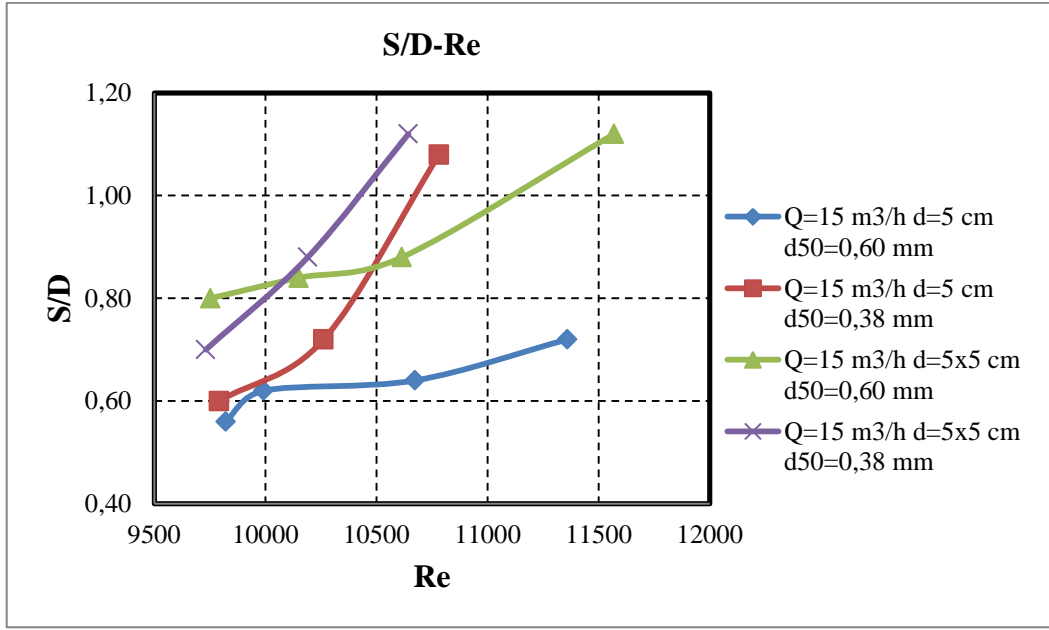
Şekil 6.1. Rölatif oyulma derinliğinin (S/D) akımın Froude sayısının karesi (Fr^2) ile değişimi

6.3. Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D) Akımın Reynolds Sayısı (Re) İle Değişimi

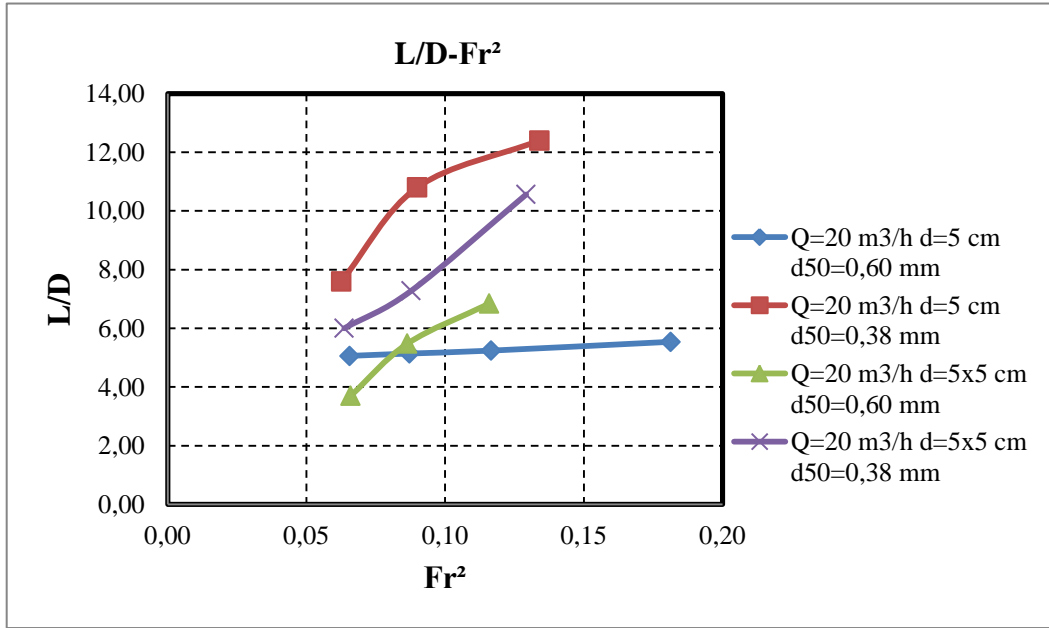
Şekil 6.2’de 5 cm çapındaki dairesel kesitli boru ile ebatları 5 cm olan kare kesitli boruda rölatif oyulma derinliğinin (S/D) akımın Reynolds sayısı (Re) ile değişimi karşılaştırılmıştır. Grafikte görüldüğü gibi Reynolds sayısının (Re) artması ile rölatif oyulma derinliği (S/D) artmaktadır.

6.4. Rölatif Oyulma Çukuru Genişliğinin (L/D) Akımın Froude Sayısının Karesi (Fr^2) İle Değişimi

Şekil 6.3’de 5 cm çapındaki dairesel kesitli boru ile ebatları 5 cm olan kare kesitli boruda rölatif oyulma çukuru genişliğinin (L/D) akımın Froude sayısının karesi (Fr^2) ile değişimi karşılaştırılmıştır. Grafikte görüldüğü gibi Froude sayısının karesinin (Fr^2) artması ile rölatif oyulma çukuru genişliği (L/D) artmaktadır.



Şekil 6.2. Rölatif oyulma derinliğinin (S/D) akımın Reynolds sayısı (Re) ile değişimi

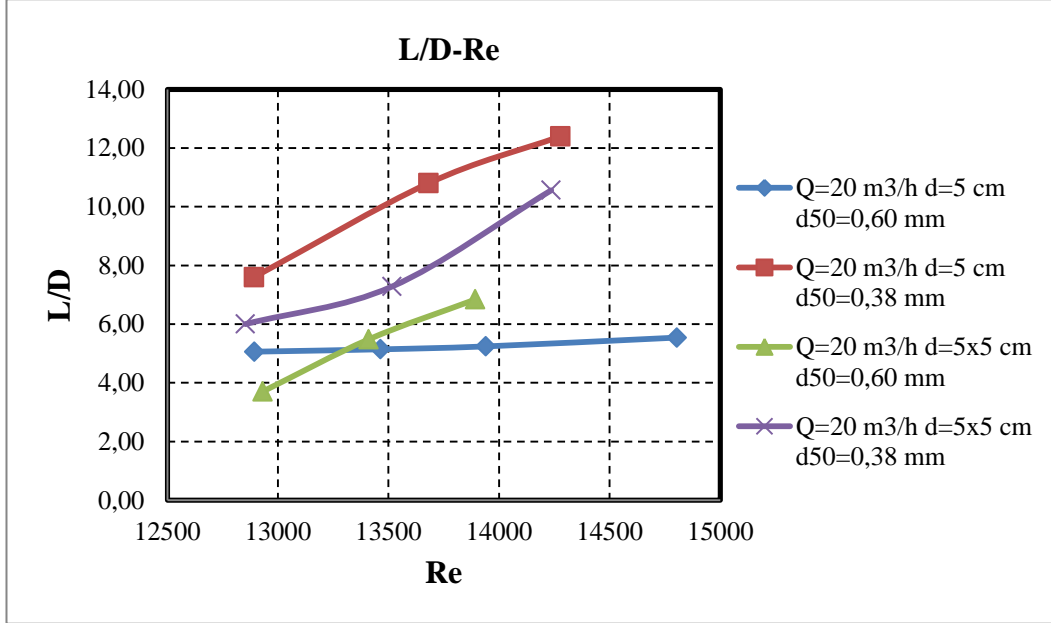


Şekil 6.3. Rölatif oyulma çukuru genişliğinin (L/D) akımın Froude sayısının karesi (Fr^2) ile değişimi

6.5. Rölatif Oyulma Çukuru Genişliğinin (L/D) Akımın Reynolds Sayısı (Re) İle Değişimi

Şekil 6.4'de 5 cm çapındaki dairesel kesitli boru ile ebatları 5 cm olan kare kesitli boruda rölatif oyulma çukuru genişliğinin (L/D) akımın Reynolds sayısı (Re) ile

değişimi karşılaştırılmıştır. Grafikte görüldüğü gibi Reynolds sayısının (Re) artması ile rölatif oyulma çukuru genişliği (L/D) artmaktadır.



Şekil 6.4. Rölatif oyulma çukuru genişliğinin (L/D) akımın Reynolds sayısı (Re) ile değişimi

7. YAPAY SİNİR AĞLARI

7.1. Giriş

Bu bölümde Yapay sinir ağları (YSA) ile ilgili kısa bilgi verildikten sonra boru hatları altında meydana gelen maksimum oyulma derinliğinin, yapay sinir ağları ile belirlenmesi için model oluşturulacaktır.

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin çalışma prensibinden esinlenerek geliştirilen ve beynin işlevlerini belirli bir yazılım aracılığı ile gerçekleştirmeye çalışan mantıksal programlama teknikleridir.

7.2. Yapay Sinir Ağları (YSA) Yönteminin Tanımı ve Tarihçesi

Yapay sinir ağları (YSA) insan beyninden esinlenerek geliştirilmiş, bağlantılar aracılığı ile birbirine bağlanan ve her biri kendi belleğine sahip olan işlemci elemanlardan oluşan paralel ve dağıtılmış bilgi işleme yapılarıdır. Bir başka deyişle YSA'lar biyolojik sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır [41]. Yapay sinir ağlarının literatürde mevcut olan, yapılmış birçok tanımı bulunmaktadır. Bu tanımlamalardan birkaçı aşağıda verilmiştir.

Haykin (1994), YSA'lar deneysel bilgiyi saklayan ve onu kullanmak için işe yarar hale getiren paralel dağıtılmış işlemcilerden oluştuğunu ve YSA'ların iki yönden beyine benzediğini belirtmiştir [42]. Bunlar;

1. Bilgi, ağ yapısı tarafından bir öğrenme işlemi yoluyla kazanılır.
2. Nöronlar arasında bulunan ve sinaptik ağırlıklar olarak adlandırılan ağırlıklar bilgiyi depolamak için kullanılır.

Zurada (1992) ise “deneysel bilgiyi kazanan, saklayan ve bu bilgileri kullanan fiziksel hücre sistemleri olarak” YSA'yı tanımlanmıştır [43].

Yapay sinir ağları, genellikle, matematiksel bir model olarak ifade edilemeyen ya da matematiksel modelleri çok karmaşık olan problemlerin çözümlenmesinde başarı ile uygulanmaktadır. Beynin fizyolojisinden esinlenerek oluşturulmuş olan YSA'larda nöron adı verilen ve birbirleri ile bağlantılı olan işlemci elemanlar bulunmaktadır.

YSA'ların öğrenbilme özelliği birçok araştırmacının dikkatini çeken bir özelliktir. Öyle ki YSA'lar, doğrusal olan ya da olmayan bir probleme ait tek veya çoklu değişkenlere bağlı olarak tanımlanabilen giriş verileri ile yine tek veya çoklu değişkenlere bağlı olarak tanımlanabilen çıkış değerleri arasında ilişki kurabilme yeteneğine sahiptir.

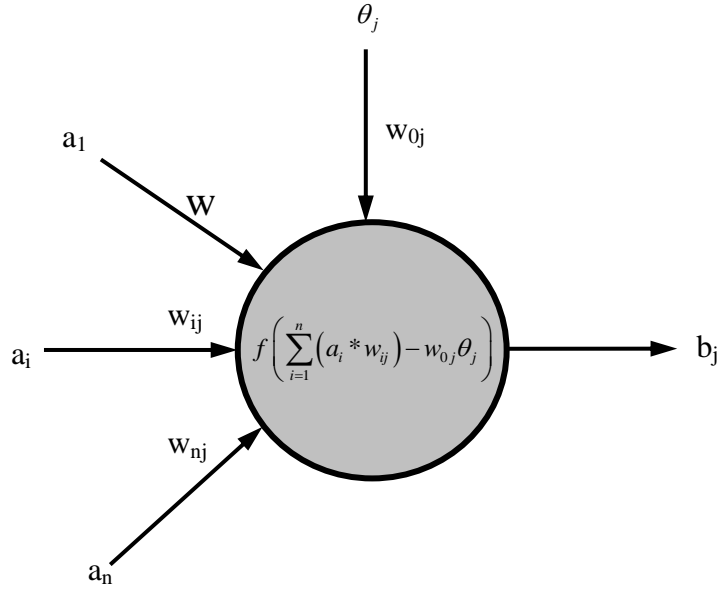
Modern anlamda YSA'lar üzerinde yapılan ilk çalışmalar; 1940'lı yıllarda McCulloch ve Pitts tarafından yapılan çalışma ile başlamıştır. McCulloch ve Pitts 1943 yılında yaptıkları çalışma ile yapay nöronlarda oluşan ağ yapılarının aritmetik ve mantıksal fonksiyonları hesaplayabileceğini göstermiştir. McCulloch ve Pitts tarafından yapılan çalışma ile aynı zamanda, nöron adı verilen işlemci elemanın biçimsel modeli de ilk defa ortaya konmuştur [44].

Yapay sinir ağları konusunda pratik ilk uygulama 1950'li yılların sonlarında, perseptron ağı ve bu ağ yapısına ait öğrenme kuralının Rosentblatt tarafından önerilmesi ile yapılmıştır. Rosentblatt tarafından 1958 yılında bulunan ve perseptron olarak adlandırılan nöron benzeri yapının desen tanıma işlemindeki başarısı YSA araştırmalarına karşı büyük ilgi uyandırmıştır [45].

YSA'lar ile ilgili olarak 1970'li yıllarda da bazı önemli çalışmalar yapılmıştır. 1972 yılında Kohonen ve Anderson birleşik hafızalar üzerine çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmaları ile de danışmansız öğrenme yöntemlerinin gelişmesine ışık tutmuşlardır. 1980'li yıllarda kapasiteleri oldukça artmış olan kişisel bilgisayarların yaygınlaşması, yeni ve önemli fikirlerin ortaya atılması ile YSA konusundaki araştırmalar tekrar hız kazanmıştır [41, 43, 46].

7.3. Yapay Nöron

Nöronlar, YSA'ların temel elemanı olan bilgi işleme birimleridir. Şekil 7.1'de yapay bir nöron modeli gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Yapay nöron yapısı

Yapay bir nörona ait olan üç temel bileşen tanımları aşağıda yapılmış olan bağlantı ağırlıkları, toplama fonksiyonu ve aktivasyon (transfer) fonksiyonudur.

1. **Bağlantı Ağırlıkları:** Nöronlar arasında bulunan bağlantıların her biri kendilerine ait w değeri ile gösterilmektedir. Öyle ki bir j nöronunu bir k nöronuna bağlayan bağlantının girişinde bulunan bir x_j sinyali x_{kj} ağırlık değeri ile çarpılıp k nöronuna giriş değeri olarak iletilir. j ve k nöronları arasında bulunan bağlantı aracılığı ile k nöronuna aktarılan sinyal k nöronu üzerinde uyarıcı bir etki yapıyor ise (+) bir ağırlık değeri ile, engelleyici bir etki yapıyor ise (-) ağırlık bir değeri ile ağırlıklandırılır.
2. **Toplama Fonksiyonu:** Herhangi bir nöron tarafından kabul edilen ağırlıklandırılmış olan giriş değerleri nöron yapısında bulunan doğrusal bir toplama fonksiyonu aracılığı ile toplanarak nöronun giriş değeri bulunur.
3. **Aktivasyon Fonksiyonu:** Herhangi bir nöronun net giriş değerine karşılık olan çıkış değerinin belli bir değer aralığında kalmasını sağlayan fonksiyondur. Nöronun giriş ve çıkış değerleri arasında ilişki kurmaktadır. Şekil 7.1'de gösterilen doğrusal olmayan bir nöron modelinde dış ortamdan uygulanan ve threshold (eşik) değeri adı verilen bir θ_k değeri de bulunmaktadır. Bu değer nöronun net giriş değerlerini azaltan bir etkiye sahiptir. Diğer taraftan nörona

ait net giriş değerini artırıcı bir etkisi olan ve threshold değerinin negatifi olarak ifade edilen bias terimi de nöron yapısına dış ortamdan uygulanabilmektedir. Yapay bir k nöronu matematiksel olarak Denklem (7.1) ve Denklem (7.2)'de verilen eşitlikler ile tanımlanabilir [42].

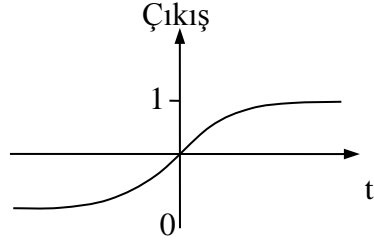
$$u_k = \sum_{j=1}^P w_{kj} x_j \quad (7.1)$$

$$y_k = \varphi(u_k - \theta_k) \quad (7.2)$$

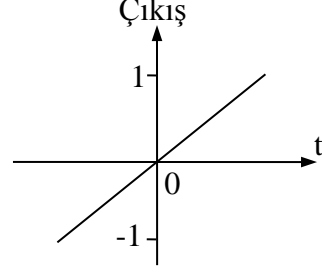
Burada; $x_1, x_2, x_j, \dots, x_p$, değerleri k nöronuna gelen giriş sinyalleri; $w_{k1}, w_{k2}, w_{kj}, \dots, w_{kp}$, değerleri k nöronu bağlantı ağırlıkları; u_k , ağırlıklandırılmış giriş değerlerin doğrusal toplamı; θ_k , k nöronu threshold (eşik) değeri; φ , k nöronu aktivasyon fonksiyonu; y_k , k nöronu çıkış sinyalidir.

7.4. Aktivasyon (Transfer) Fonksiyonu

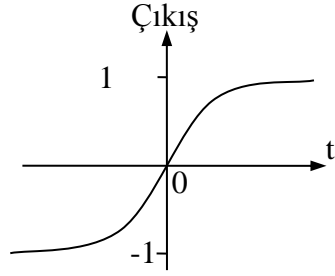
Yapay sinir ağları (YSA), herhangi bir nörona gelen ağırlıklandırılmış girişlerin toplamı ile nöronun threshold (eşik) değeri arasındaki fark bu nörona ait net giriş değeri, başka bir ifade ile nöronun aktiflik seviyesi olarak tanımlanır. Nöronun net giriş değeri ile bu değere karşılık elde edilecek olan çıkış değeri arasındaki ilişki aktivasyon fonksiyonları yardımı ile sağlanır. Aktivasyon fonksiyonları, öğrenme eğrisi ya da transfer fonksiyonları olarak da adlandırılabilirler. YSA yapısı içerisinde kullanılacak transfer fonksiyonlarının sürekli ve türevi alınabilir fonksiyonlar olması gerekmektedir. Ağ yapısına sunacağımız problemin özelliklerine göre doğrusal ya da doğrusal olmayan bir transfer fonksiyonu seçilebilir. YSA'larda en çok tercih edilen transfer fonksiyonları Şekil 7.2'de gösterilmiştir [47].



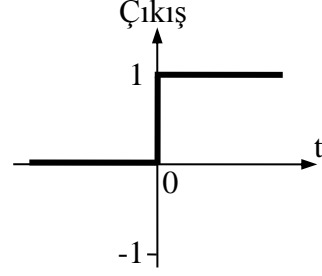
(a) Sigmoid



(b) Doğrusal



(c) Hiperbolik Tanjant



(d) Keskin Sınırlayıcı

Şekil 7.2. YSA'larda en çok tercih edilen aktivasyon fonksiyonları

Keskin sınırlayıcı aktivasyon fonksiyonu (Hard Limit) herhangi bir nöronun net giriş değeri sıfırdan küçükse nöronun çıkış değerini 0'a, sıfırdan büyük ya da sıfıra eşit ise 1 değerine atamaktadır. Giriş değerlerine karşılık elde edilecek çıkış değerlerinin iki ayrı grupta sınıflandırılacağı problemler için tercih edilen bir aktivasyon fonksiyonudur. Nöronun çıkış değerinin aynı nöronun net giriş değerine eşit olduğu doğrusal transfer fonksiyonları Denklem (7.3) ve Denklem (7.4) ile ifade edilebilirler.

$$v_k = u_k - \theta_k \quad (7.3)$$

$$y_k = v_k \quad (7.4)$$

Burada; v_k , k nöronu net giriş değeridir.

Doğrusal transfer fonksiyonu doğrusal YSA yapılarında ve çok katmanlı ileri beslemeli YSA yapılarının çıkış katmanında kullanılmaktadır.

Logaritma sigmoid (S) transfer fonksiyonu Denklem (7.5)'i kullanarak $+\infty$ ile $-\infty$ aralığında herhangi bir değere sahip olan nöron net giriş değerlerini 0 ile 1 aralığında sınırlandırılmış herhangi bir çıkış değerine atamaktadır. Genellikle geri yayılım öğrenme kuralının kullanıldığı çok katmanlı ağ yapılarında tercih edilen bir transfer fonksiyonudur [42, 47].

$$y_k = \frac{1}{1 + e^{-v_k}} \quad (7.5)$$

Nöron çıkış değerlerinin -1 ile $+1$ aralığında olduğu problemlerde Denklem (7.6) ile ifade edilen ve orjine göre ters simetrik olan hiperbolik tanjant (TH) fonksiyonu kullanılabilir. Hiperbolik tanjant fonksiyonunun kullanıldığı problemlerde nöron net giriş değeri $-\infty$ ile $+\infty$ aralığında değerler alabilmektedir:

$$y_k = \frac{1 - e^{-2v_k}}{1 + e^{2v_k}} \quad (7.6)$$

7.5. Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması

YSA' lar, nöronlardan ve ağ bağlantılarından meydana gelmektedir. Ağ bağlantı şekillerine ve öğrenme kurallarına göre YSA yapıları farklı şekillerde sınıflara ayrılırlar.

7.5.1. Mimari Yapılarına Göre Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları nöron adı verilen çok sayıdaki işlemci elemanın bir araya gelmesi sonucu oluşmaktadır. YSA yapılarında işlemci elemanlar ve bağlantıları çok farklı şekillerde bir araya getirilebilirler. Bunun sonucu olarak da ağ yapıları işlemci eleman ve bağlantı mimarilerine göre değişik isimler alırlar. YSA mimarileri, işlemci elemanlar arasındaki bağlantıların yönlerine göre veya ağ yapısı içerisindeki işaretlerin akış yönlerine göre birbirlerinden ayrılmaktadır. Bu ifadeye göre YSA' lar için ileri beslemeli (feedforward) ve geri beslemeli (feedback) ağlar olmak üzere iki temel ağ mimarisi tanımlanabilir.

7.5.1.1. İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları Yapısı

Bu tip YSA yapıları genellikle katmanlar şeklinde tasarlanmaktadır. Çoğunlukla, parametrelere bağlı olarak tanımlanan giriş verileri ağ yapısı içerisinde giriş katmanından çıkış katmanına doğru tek yönlü olarak iletilirler. Her katmandaki işlemci elemanlar sadece kendilerinden önceki katmanda bulunan işlemci elemanlardan giriş kabul edebilirler. Bir işlemci eleman kendisinin bulunduğu katmandan bir sonraki katmanda yer alan herhangi bir işlemci elemana bağlanabilirken kendi bulunduğu katmanda yer alan işlemci elemanlar ile bağlantı kuramamaktadır. Bu tip ağ yapıları giriş ve çıkış vektörleri arasında statik eşleme yapmaktadır. Yani, herhangi bir andaki çıkış değeri o andaki giriş vektörünün bir fonksiyonudur. Çok katmanlı perceptron ağlar (MLP) ve LVQ (Learning Vector Quantization) ağ yapıları ileri beslemeli ağ yapılarına örnek olarak verilebilirler.

7.5.1.2. Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağları Yapısı

Geri beslemeli ağ yapıları genellikle danışmansız öğrenme kurallarının uygulandığı ağ yapıları olarak da tanımlanabilirler. Bu tip ağ yapıları, çıkış katmanı dahil olmak üzere herhangi bir katmanın veya tüm katmanların çıkışlarını bir önceki katmana veya giriş katmanına ilettikleri yapılardır. Geri beslemeli YSA yapısında veri, giriş katmanından çıkış katmanına doğru ve çıkış katmanından giriş katmanına doğru olmak üzere iki yönlü olarak iletilir. Veri akışının çift yönlü olmasından dolayı bu tip ağ yapılarına yer alan ağırlıklar dinamik bir hafıza özelliği taşımaktadır. Bu tip YSA yapılarında herhangi bir anda gözlenen çıkış değeri o ana kadar işlenmiş olan tüm verilerin bir sonucu olarak elde edilir. Hopfield, Elman ve Jordan ağ yapıları bu tip YSA yapılarına örnek olarak gösterilebilirler [41, 48].

7.5.2. Öğrenme Yöntemlerine Göre Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması

Öğrenme kuralı, herhangi bir ağ yapısı içerisinde bulunan bağlantı ağırlıkları ve bias değerlerinin güncellenebilmesi için gerekli olan prosedürü tanımlamaktadır. Öğrenme kuralı aynı zamanda eğitim algoritması olarak da ifade edilebilir. Öğrenme kuralının amacı, ağ yapısının kendisine sunulan bir probleme karşılık en iyi sonuç değerlerini üretmesi için gerekli olan ağırlık ve bias değerlerinin tanımlanmasını sağlamaktır. Ağ yapılarının eğitimi için kullanılan öğrenme kuralları, danışmanlı

öğrenme (supervisedlearning), danışmansız öğrenme (unsupervisedlearning) ve takviyeli öğrenme (reinforcementlearning) olmak üzere üç öğrenme yöntemi başlığı altında toplanabilir [41, 47].

7.5.2.1. Danışmanlı Öğrenme

Danışmanlı öğrenmede öğrenme kuralı eğitim seti adı verilen bir örnekler kümesi ile desteklenmektedir. Denklem (7.7)'de yer alan bu örnekler kümesinde p_q ağ yapısına sunulan bir giriş örneği ve t_q da bu giriş değerine karşılık olan çıkış değeridir. Giriş örneklerinin ağ yapısına uygulanmasının ardından ağ yapısının bu giriş örnekleri için üretmiş olduğu çıkış değerleri elde edilir. Ağ yapısının giriş örnekleri için üretmiş olduğu çıkış değerleri bu giriş örneklerine ait olan gerçek çıkış değerleri ile karşılaştırılır.

$$\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \{p_3, t_3\}, \dots, \{p_q, t_q\} \quad (7.7)$$

Ağ tarafından üretilmiş olan çıkış değeri ile giriş örneklerine ait gerçek çıkış değerleri arasındaki farkın azaltılması için ağ yapısının ağırlık ve bias değerleri kullanılan öğrenme kuralı ile güncellenir. İki çıkış değeri arasındaki fark hata değeri olarak önceden belirlenmiş olan değerden küçük oluncaya kadar eğitim işlemine devam edilir. Hata değeri istenilen değer altına düştüğünde ağ yapısı içerisinde bulunan tüm ağırlık değerleri sabitlenerek eğitim işlemine son verilir. Danışmanlı öğrenmeye, geri yayılım kuralı örnek olarak verilebilir [41, 47].

7.5.2.2. Danışmansız Öğrenme

Bu öğrenme şeklinde ağ yapısı içerisinde bulunan ağırlık ve bias değerleri sadece ağ yapısına uygulanan giriş örneklerine göre değiştirilir. Ağ yapısına giriş örneklerine ait gerçek çıkış değerleri sunulmaz. Danışmansız öğrenmede; ağ, giriş verilerini üyeleri birbirinin benzeri olan sınıflara yol göstermeksizin ayırmaktadır. YSA bu sınıflandırma yaklaşımını gerçekleştirebilmek için ağırlıklarını benzer nitelikli verileri ayırt edebilecek şekilde değiştirir. Yarışmacı öğrenme (competitive learning), Grossberg tarafından geliştirilmiş olan ART (Adaptive Resonance Theory) ve Kohonen tarafından geliştirilmiş olan SOM (Self Organizing Map) öğrenme kuralları danışmansız öğrenmeye örnek olarak gösterilebilirler [41, 47, 48].

7.5.2.3. Takviyeli Öğrenme

Bu öğrenme şekli danışmanlı öğrenmeye benzemektedir. Ancak bu öğrenme şeklinde ağ yapısına sunulan her bir giriş örneğinin karşılığı olarak gerçek çıkış değerleri ağ yapısına sunulmaz. Buna karşılık ağ yapısının üretmiş olduğu çıkış değerlerinin uygulanan giriş verilerine uygunluğunun belirlenmesi için bir kriter kullanılır. Bu öğrenme şeklinde, ağ yapısı kullanılan kritere göre üretmiş olduğu çıkış değerlerinin iyi veya kötü olarak değerlendirmesini yapar. Optimizasyon problemlerinin çözümü için uygun bir öğrenme şeklidir. Hinton ve Seynowskin tarafından geliştirilmiş olan Boltzman kuralı ve genetik algoritma bu öğrenme şekline örnek olarak gösterilebilir [41, 47, 48].

7.6. Çok Katmanlı Perceptron Ağlar (MLP) ve Öğrenme Algoritmaları

MLP ağ yapıları, özellikle mühendislik uygulamalarında son derece yaygın olarak kullanılan bir sinir ağı modelidir. Bu ağ yapısının yaygın olarak tercih edilmesinin en büyük nedeni ise birçok öğrenme algoritmasının bu ağı eğitmede kullanılabilir olmasıdır.

7.6.1. Çok Katmanlı Perceptron Ağlar (MLP)

Ara katmanların bulunmadığı, sadece giriş ve çıkış katmanlarından oluşan perseptron ağ yapıları benzer giriş örneklerinin benzer çıkış örneklerine eşlenmesi konusunda oldukça başarılı tahminler yapmışlardır.

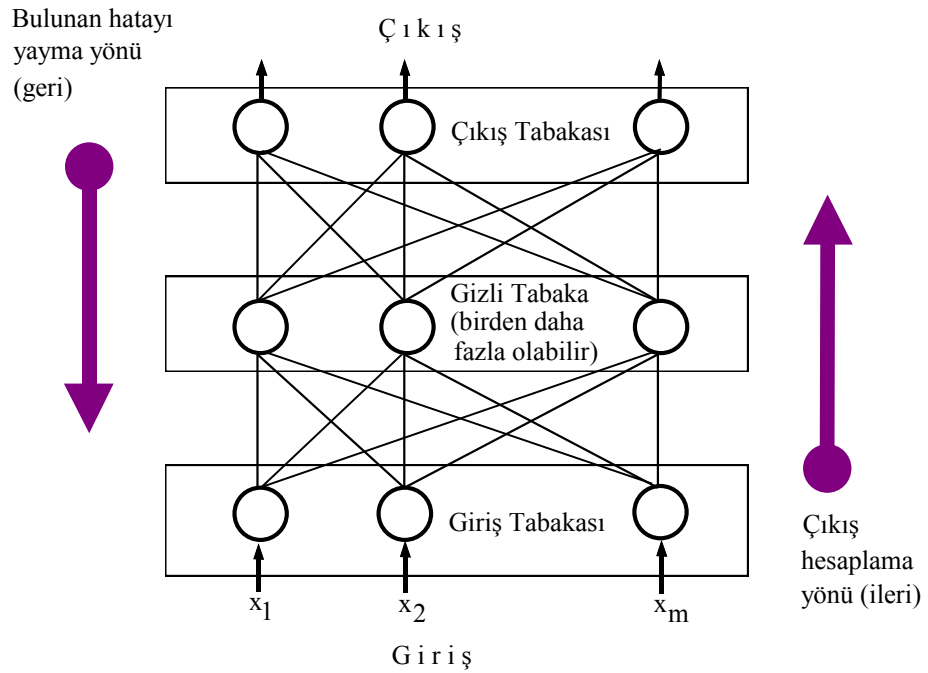
Ancak giriş ve çıkış örneklerinin çok farklı olduğu problemlerde bu tek katmanlı ağ yapılarının benzer başarıyı sergileyemedikleri gözlenmiştir. Tek katmanlı ağ yapılarının geliştirilmesi ile çok katmanlı perseptron (MLP) ağ yapıları oluşturulmuştur.

MLP ağ yapıları; dış ortamdan gelen sinyalleri algılayan giriş nöronlarının oluşturduğu bir giriş katmanı, gizli nöronlardan oluşan bir ya da daha fazla sayıda ara katman ve çıkış nöronlarının oluşturduğu bir çıkış katmanından meydana gelmektedir. Bu ağ yapısının en önemli özelliği; herhangi bir tabakada bulunan nöronun kendinden sonraki tabakada yer alan nöronlara kendi çıkış değerini gönderebilmesi ve kendi bulunduğu katmandan bir önceki katmanda yer alan

nöronların her birinden giriş verisi kabul edebilmesidir. MLP ağ yapılarında katmanlar ve aynı katman içerisinde yer alan nöronlar arasında bağlantı bulunmamaktadır. Şekil 7.3’de bir MLP ağ yapısı gösterilmiştir.

MLP ağ yapılarında giriş katmanında bulunan giriş nöronları dış ortamdan iletilen sinyallerin algılanmasını sağlarlar. Giriş katmanında, algılanan sinyaller üzerinde herhangi bir bilgi işleme yapılmaz.

Bu katmanda yer alan işlemci eleman sayısı tamamen uygulanan problemin giriş parametresi sayısına bağlıdır. Ara katmanda bulunan gizli nöronlar ile çıkış katmanında yer alan çıkış nöronları ise veri işleme yeteneğine sahip işlemci elemanlardır. Ara katmanda yer alan gizli nöronlar probleme ait olan giriş ve çıkış örnekleri arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkinin çözümlenmesinde büyük rol oynarlar. MLP ağ yapılarında ara katman sayısı ve ara katmanlarda kullanılacak nöron sayısı deneme–yanılma yolu ile bulunurken çıkış katmanında kullanılacak nöron sayısı uygulanan problemin özelliklerine bakılarak belirlenmektedir. Bu tip ağ yapılarında giriş sinyalleri ağ yapısı boyunca giriş katmanından çıkış katmanına doğru tabakalar boyunca ileri doğru yayılır. Geri besleme yoktur. Bu yüzden bu tip ağ yapıları ileri beslemeli sinir ağları sınıfında yer alırlar.



Şekil 7.3. Geri Yayılım MLP yapısı [45]

7.6.2. Geri Yayılım Öğrenme Kuralı

Perseptron yakınsama kuralı ya da diğer bir adı ile Delta kuralı olarak da bilinen bu kural, basit ağ yapıları ile kullanılabilen ve oldukça iyi sonuçlar veren bir öğrenme kuralıdır. Fakat bu öğrenme kuralı ara katmanların olduğu çok katmanlı ağ yapıları ile kullanılamamaktadır. Bu eksikliğin giderilebilmesi amacıyla Rumelhart, Hinton ve Williams tarafından günümüzün en popüler algoritması olan ve genelleştirilmiş delta kuralı ya da geri yayılım (backpropagation) yöntemi olarak adlandırılan öğrenme kuralı geliştirilmiştir [45].

Delta kuralında; ağ yapısı öncelikle sunulan giriş örneklerine karşılık olan çıkış değerlerini üretir. Daha sonra giriş örneklerine ait gerçek çıkış değerleri ile kendisinin üretmiş olduğu çıkış değerlerini karşılaştırır. Eğer ağ çıkış değeri ile gerçek çıkış değeri arasında fark yoksa bu durumda ağ yapısının kendisine uygulanan problemi öğrenemediği anlaşılır. Aksi takdirde ise ağ yapısı içerisinde bulunan bağlantı ağırlıkları iki çıkış değeri arasındaki farkın azaltılması ve bu iki sonuç değerinin birbirine yakınsamasının sağlanması amacıyla değiştirilir. Eğitim seti içerisinde bulunan her bir veri örneğine ait gerçek çıkış değeri ile ağ tarafından üretilen çıkış değeri arasındaki farkın kareleri toplamı minimize edilir. Hata değerinin her bir ağırlığa göre türevinin, negatif bir orantılılık sabiti ile, ağırlık değişimi ile doğru orantılı olması durumu delta kuralı olarak ifade edilir. Delta kuralı hata değeri ile orantılı bir şekilde ağ yapısı içerisinde bulunan bağlantı ağırlıklarını kuvvetlendirir ya da zayıflatır [49, 50].

Literatürde öğrenme algoritmaları sayısı oldukça fazladır ve bu algoritmaların farklı alanlardaki problemlere uygulamaları yapılarak karşılaştırmaları yapılmıştır [51, 52].

Öğrenme algoritmalarından Levenberg–Marquardt tekniği, geleneksel gradient descent tekniğine göre çok daha hızlı ve güçlüdür [46, 53]. Gopalakrishnan (2010) çalışmasında on iki farklı öğrenme algoritması karşılaştırmıştır. Levenberg–Marquardt tekniği diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında eğitime ve test aşamalarında en iyi performansa ve aynı zamanda en hızlı yakınsama özelliğine sahiptir. Bu nedenle çalışmada Levenberg–Marquardt algoritması kullanılmıştır. Diğer öğrenme algoritmaları ile ilgili detaylı bilgi literatürden temin edilebilir [46, 47, 52, 54, 55].

7.6.2.1. Levenberg–Marquardt Eğitim Algoritması (LM)

Levenberg–Marquardt (LM) eğitim algoritmasında da Quasi–Newton yöntemlerinde olduğu gibi Hessian matrislerinin hesaplanmadığı bir optimizasyon tekniği kullanılmıştır. LM eğitim algoritması, hata fonksiyonunun hata değerlerinin kareleri toplamı şeklinde ifade edilmesi durumunda Hessian matrislerini Denklem (7.8)'de belirtilen ifade yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$H = J^T J \quad (7.8)$$

Bu eşitlikte yer alan J, Jacobian matrisidir. Jacobian matrisi ağ yapısında oluşan hata değerlerinin ağırlık ve bias değişkenlerine göre 1. dereceden kısmi türevlerinden oluşur. LM eğitim algoritmasında hata fonksiyonunun gradientinin hesaplanabilmesi için de Denklem (7.9) kullanılır.

$$g = J^T e \quad (7.9)$$

Burada; e, ağ yapısında meydana gelen hata değerlerinin oluşturduğu bir hata vektörüdür.

Hessian matrislerinin hesaplanmasına göre daha basit bir şekilde bulunabilen Jacobian matrisleri standart geri yayılım kuralına göre hesaplanabilmektedir. LM eğitim algoritması, Newton yönteminde kullanılan değişim ifadesine benzer bir yaklaşımı Hessian matrislerine uygulamaktadır. Bu yaklaşım Denklem (7.10)'da gösterilmiştir.

$$x_{k+1} = x_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (7.10)$$

Skaler μ ifadesinin sıfır olduğu durumda ifade hemen hemen Newton yöntemi ile benzer olmaktadır. μ değerinin büyümesi durumunda ise eşitlik küçük bir adım boyunun kullanıldığı bir Gradient Descent ifadesine dönüşmektedir.

LM eğitim algoritması uygun ölçülerde boyutlandırılmış ileri beslemeli bir ağ yapısı için en hızlı şekilde yakınsayan bir yöntem olarak görünmektedir [45].

7.7. Yapay Sinir Ağları ile Maksimum Oyulma Derinliğinin Belirlenmesi

Yapay sinir ağları birçok bilim dalında kullanıldığı gibi hidroloji ve hidrolik bilim dallarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda, Minns (1995), Babovic (1995) ve Ervin ve Macleod (1999), YSA kullanarak bazı hidrolik problemlerinin çözümünde önemli sonuçlar elde etmişlerdir. Çobaner ve diğ. (2008), nehirler üzerindeki köprülerin gerisindeki su kabarmalarının belirlenmesinde YSA'ni başarılı bir şekilde uygulamışlardır [56, 57, 58, 59].

Levenberg–Marquardt tekniği kullanılarak çok tabakalı perceptrons (MLP) ağı eğitilmiştir. Bu Levenberg–Marquardt tekniği, geleneksel gradientdescent tekniğine göre çok daha hızlı ve güçlüdür [46, 53].

Maksimum oyulma derinliğinin belirlenebilmesi için, YSA ve ÇLR modellerinde giriş parametresi olarak taban malzemesi çapı (d_{50}), açık kanal Froude sayısı (Fr), kanaldaki suyun hızı (V), boru çapı (D), açık kanal Reynolds sayısı, (Re) akım derinliği (y_n) ile temsil edilirken, çıkış parametresi olarak ise boru hattı altında oluşan maksimum oyulma derinliği (S_{maks}) ile temsil edilmiştir. Bu parametrelerin maksimum ve minimum değeri Tablo 7.1 ve Tablo 7.2’de verilmiştir.

Tablo 7.1. Dairesel kesit için eğitme ve test veri setlerine ait giriş-çıkış parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri

Parametreler	Eğitme		Test	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
d_{50}	0.38	0.60	0.38	0.60
Fr	0.13	0.43	0.15	0.40
V_{kanal}	0.12	0.34	0.14	0.30
D	3	5	3	5
Re	6484	14804	6879	14063
y_n	5	9.4	5.2	9.2
$S_{maks.}$	2.2	6.4	2.3	5.6

Tablo 7.2. Kare kesit için eğitime ve test veri setlerine ait giriş-çıkış parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri

Parametreler	Eğitime		Test	
	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
d_{50}	0.38	0.60	0.38	0.60
Fr	0.13	0.49	0.18	0.45
V_{kanal}	0.12	0.37	0.15	0.32
D	3	5	3	5
Re	6470	15198	7195	14236
y_n	4.4	9.2	4.8	9.3
S_{mak}	2.2	6	2.5	6.6

Nöronların sınırlı aralıklı transfer fonksiyonlarına sahip olduğundan ağ modeli için veri örnekleri sunulmadan önce dataların ön işleme tabi tutulması genellikle zorunludur. Data örneklerinin ölçeklendirilmesinin sebebi, ağ ağırlıklarının yorumlanabilmesinin geliştirilmesi ve değişkenlerin önemliliğinin eşitlenmesi olarak tarif edilebilir [60, 61]. Verilere YSA uygulamadan önce, eğitime seti giriş ve çıkış değerleri Denklem (7.11) kullanılarak standartlaştırılmıştır.

$$x_{ni} = a \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + b \quad (7.11)$$

Burada, x_{\min} ve x_{\max} parametrelerin minimum ve maksimum değerlerini, x_{ni} standartlaştırılmış parametreyi belirtmektedir. a ve b ölçek faktörü olarak farklı değerler atanabilmektedir. Standartlaştırma yaklaşımı belli durumlarda kullanılabileceği konusunda sabit bir kural yoktur [61, 62]. Hesaplamalarda bu değerler sırasıyla 0.6 ve 0.2 alınmıştır.

YSA'da; gizli düğümlerin sayısı, öğrenme oranı ve başlangıç ağırlıkları gibi parametrelerin seçimi zor görevlerdendir. Optimum ağ geometrisi, deneme-yanılma yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir. YSA, tek gizli tabaka ile eğitilmiştir. Yeterli bağlantı ağırlıkları kullanıldıkça, tek gizli tabakanın herhangi bir sürekli fonksiyona yaklaşılabileceği de belirtilmelidir [63, 64].

Burada, modelin gizli tabaka düğüm sayısı, verilen herhangi bir fonksiyona yaklaşması için ne kadar gizli tabakaya gereksinim olduğunu söyleyen bir teori henüz olmadığından çeşitli ağ yapıları denendikten sonra belirlenmiştir. Eğitim aşamasında, uyarlamalı öğrenme oranları ve aynı başlangıç ağırlıkları Kişi (2005)'nin kullandığı gibi her YSA ağı için kullanılmıştır.

Tanjant sigmoid, logaritmik sigmoid ve doğrusal fonksiyonları, en iyi ağ modeli belirlemek için gizli ve çıkış tabaka nöronlarının aktivasyon fonksiyonları olarak denenmiştir. Gizli ve çıkış tabaka nöronları için sırasıyla logaritmik sigmoid ve doğrusal aktivasyon fonksiyonları kullanılarak uygun gizli düğüm sayısı, deneme yanılma açısından 10 olarak ayarlanırken, eğitim iterasyonu ise 100 olarak ayarlanmıştır.

Her metoda ait eğitim ve test aşamaları için Ortalama Karesel Hataların Karekökü (OKHK), Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve belirginlik katsayısı (r) değerleri hesaplanmıştır. Ortalama Karesel Hatanın Karekökü (OKHK) ve Ortalama Mutlak Hata (OMH) sırasıyla;

$$OKHK = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [S_{mak\ gözlenen,i} - S_{mak\ tahmin,i}]^2} \quad (7.12)$$

$$OMH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_{mak\ ölçülen,i} - S_{mak\ tahmin\ edilen,i}| \quad (7.13)$$

denklemleri ile verilmiştir.

Maksimum oyulma derinliklerinin (S_{mak}) modellenmesinde model değişkenleri olarak olaya etki eden değişkenler seçilmiştir. Seçilen değişkenlerin istatistiksel olarak korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan korelasyon katsayıları Tablo 7.3 ve Tablo 7.4'te verilmiştir.

Tablo 7.3. Dairesel kesit için hesaplanan korelasyon katsayıları

Değişkenler	Maksimum oyulma derinlikleri (S_{mak}) ile ilişkili olarak hesaplanan korelasyon katsayıları (r)
Boru kesiti, D (cm)	0.41
Kanaldaki akım hızı, V_{kanal} (m/s)	0.49
Froude sayısı (Fr)	0,51
Reynolds sayısı (Re)	0.40
Taban malzemesi çapı, d_{50} (mm)	-0.59
Akım derinliği, y_n (cm)	-0.32

Tablo 7.4. Kare kesit için hesaplanan korelasyon katsayıları

Değişkenler	Maksimum oyulma derinlikleri (S_{mak}) ile ilişkili olarak hesaplanan korelasyon katsayıları (r)
Boru kesiti, D (cm)	0.66
Kanaldaki akım hızı, V_{kanal} (m/s)	0.45
Froude sayısı (Fr)	0.41
Reynolds sayısı (Re)	0.39
Taban malzemesi çapı, d_{50} (mm)	-0.26
Akım derinliği, y_n (cm)	-0.15

Giriş değişkenlerine bakıldığında ÇKYSA ve ÇLR modellerinde dairesel ve kare kesit için maksimum oyulma derinliği (S_{mak}) ile korelasyonları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlere göre model girişleri sırasıyla belirlenmiştir. Dairesel kesit için en yüksek korelasyona sahip olan değişken ve en düşük korelasyona sahip değişken sırasıyla taban malzemesi çapı (d_{50}) ve akım derinliği (y_n) olarak bulunmuştur. Kare kesit için en yüksek korelasyona sahip olan değişken ve en düşük korelasyona sahip değişken sırasıyla boru kesiti (D) ve akım derinliği (y_n) olarak bulunmuştur.

Tablo 7.5'te maksimum oyulma derinliklerinin (S_{mak}) modellenmesinde dairesel ve kare kesitler için oluşan çok katmanlı yapay sinir ağları (ÇKYSA) modellerinin eğitime ve test aşamalarındaki hataları ve korelasyon (r) değerleri verilmiştir. Tablo 7.6'da ise Maksimum oyulma derinliklerinin (S_{mak}) modellenmesinde dairesel ve kare kesitler için oluşan çoklu lineer regresyon (ÇLR) modellerinin eğitime ve test aşamalarındaki hataları ve korelasyon (r) değerleri verilmiştir. Şekil 7.4'te dairesel

kesit için ÇKYSA (6,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri ve Şekil 7.5'te kare kesit için ÇKYSA (5,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri verilmiştir. Şekil 7.6'da Dairesel kesit için ÇLR (6,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri ve Şekil 7.7'de Kare kesit için ÇLR (5,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri verilmiştir.

Tablo 7.5. Maksimum oyulma derinliklerinin (S_{mak}) modellenmesinde dairesel ve kare kesitler için oluşan çok katmanlı yapay sinir ağları (ÇKYSA) modellerinin eğitime ve test aşamalarındaki hataları ve korelasyon (r) değerleri

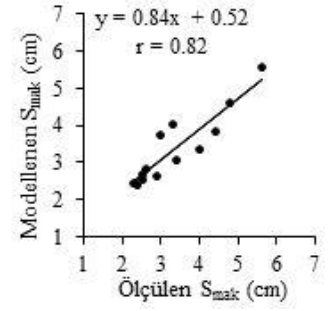
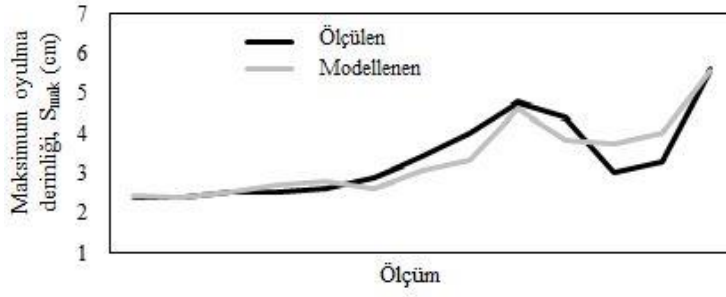
	Komb.	Girişler	Model ÇKYSA	Eğitime aşaması			Test aşaması		
				OKHK	OMH	r	OKHK	OMH	r
DAİRESEL KESİT	(i)	d_{50}	(1,1,1)	0.87	0.69	0.26	0.69	0.56	0.57
	(ii)	d_{50}, F_r	(2,1,1)	0.59	0.49	0.65	0.53	0.42	0.74
	(iii)	d_{50}, F_r, V_{kanal}	(3,1,1)	0.59	0.48	0.66	0.47	0.39	0.80
	(iv)	$d_{50}, F_r, V_{kanal}, D$	(4,1,1)	0.36	0.29	0.87	0.37	0.29	0.86
	(v)	$d_{50}, F_r, V_{kanal}, D, Re$	(5,1,1)	0.34	0.29	0.88	0.43	0.33	0.81
	(vi)	$d_{50}, F_r, V_{kanal}, D, Re, Y_n$	(6,1,1)	0.34	0.29	0.88	0.41	0.32	0.82
KARE KESİT	(i)	D	(1,1,1)	0.85	0.73	0.42	0.86	0.66	0.47
	(ii)	D, V_{kanal}	(2,1,1)	0.49	0.38	0.80	0.58	0.49	0.79
	(iii)	D, V_{kanal}, F_r	(3,1,1)	0.43	0.33	0.85	0.54	0.43	0.81
	(iv)	D, V_{kanal}, F_r, Re	(4,1,1)	0.43	0.33	0.84	0.52	0.41	0.82
	(v)	$D, V_{kanal}, F_r, Re, d_{50}$	(5,1,1)	0.31	0.25	0.92	0.36	0.31	0.91
	(vi)	$D, V_{kanal}, F_r, Re, d_{50}, Y_n$	(6,1,1)	0.31	0.25	0.92	0.37	0.32	0.92

Tablo 7.5'e bakıldığında çok katmanlı yapay sinir ağları (ÇKYSA) modellerinin maksimum oyulma derinliklerinin S_{mak} modellenmesinde eğitime ve test aşamalarındaki hata değerleri ile belirginlik katsayıları görülmektedir. Modele farklı değişkenlerin eklenmesiyle hata değerleri düşmektedir. Belirginlik katsayılarının da arttığı görülmektedir. Dairesel kesit için 6 girişli, 1 ara tabakalı ÇKYSA (6,1,1) modelinin test aşamasında en küçük hata değerleri verdiği görülmektedir. Kare kesit için ise 5 girişli ÇKYSA (5,1,1) modelinin en küçük hata değerleri verdiği görülmektedir.

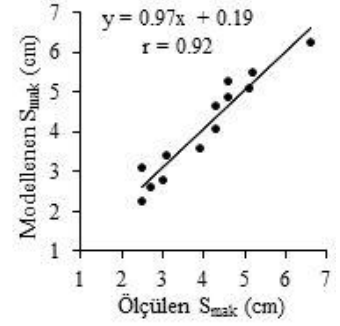
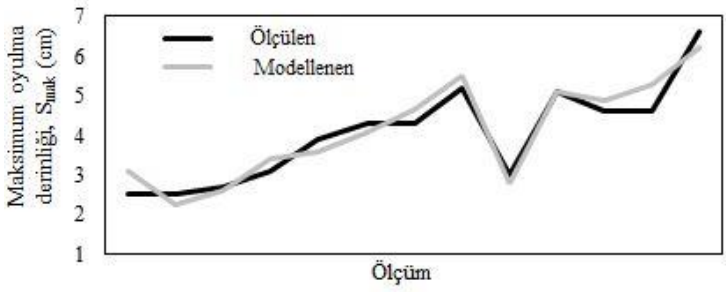
Tablo 7.6. Maksimum oyulma derinliklerinin (S_{mak}) modellenmesinde dairesel ve kare kesitler için oluşan çoklu lineer regresyon (ÇLR) modellerinin eğitime ve test aşamalarındaki hataları ve korelasyon (r) değerleri

				Eğitime aşaması			Test aşaması		
KESİT	Komb.	Girişler	Model ÇLR	OKHK	OMH	r	OKHK	OMH	r
				DAİRESEL KESİT	(i)	d_{50}	(1,1,1)	1.5	1.15
(ii)	d_{50}, F_r	(2,1,1)	1.03		0.81	0.19	0.93	0.69	0.24
(iii)	d_{50}, F_r, V_{kanal}	(3,1,1)	0.99		0.81	0.23	0.90	0.72	0.26
(iv)	$d_{50}, F_r, V_{kanal}, D$	(4,1,1)	0.58		0.47	0.68	0.68	0.64	0.59
(v)	$d_{50}, F_r, V_{kanal}, D, Re$	(5,1,1)	0.58		0.47	0.68	0.68	0.65	0.59
(vi)	$d_{50}, F_r, V_{kanal}, D, Re, Y_n$	(6,1,1)	0.51		0.40	0.75	0.55	0.46	0.70
KARE KESİT	(i)	D	(1,1,1)	0.89	0.75	0.42	0.77	0.87	0.47
	(ii)	D, V_{kanal}	(2,1,1)	0.61	0.50	0.79	0.67	0.54	0.79
	(iii)	D, V_{kanal}, F_r	(3,1,1)	0.57	0.45	0.81	0.68	0.50	0.78
	(iv)	D, V_{kanal}, F_r, Re	(4,1,1)	0.56	0.43	0.81	0.64	0.46	0.80
	(v)	$D, V_{kanal}, F_r, Re, d_{50}$	(5,1,1)	0.39	0.33	0.88	0.38	0.30	0.89
	(vi)	$D, V_{kanal}, F_r, Re, d_{50}, Y_n$	(6,1,1)	0.37	0.29	0.89	0.39	0.31	0.89

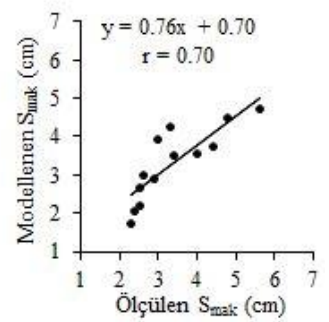
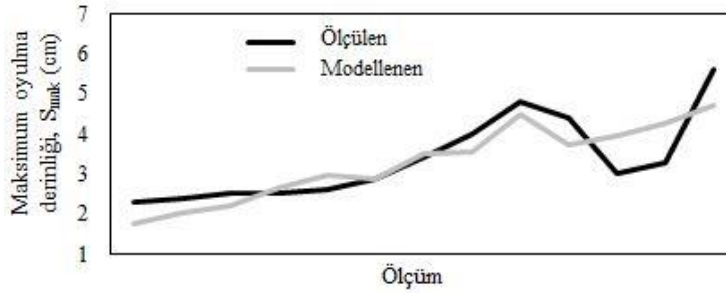
Tablo 7.6'ya bakıldığında modele farklı değişkenlerin eklenmesiyle hata değerlerinin düştüğü çoklu lineer regresyon (ÇLR) yönteminde de görülmektedir. Dairesel kesit için 6 girişli, 1 ara tabakalı ÇLR (6,1,1) modelinin test aşamasında en küçük hata değerlerini verdiği görülmektedir. Kare kesit için ise 5 girişli ÇLR (5,1,1) modelinin en küçük hata değerleri verdiği tespit edilmiştir. Her iki yöntemden elde edilen modellere bakıldığında 6 ve 5 girişli modellerin en iyi sonuçları verdiği görülmektedir. ÇKYSA yöntemi sonucu oluşan saçılma grafiklerine bakıldığında veri noktalarının doğru eksenine ÇLR yönteminde daha yakın olduğu görülmektedir. Bu durum da hata değerlerinin ÇLR'ye göre daha az olduğu söylenebilir.



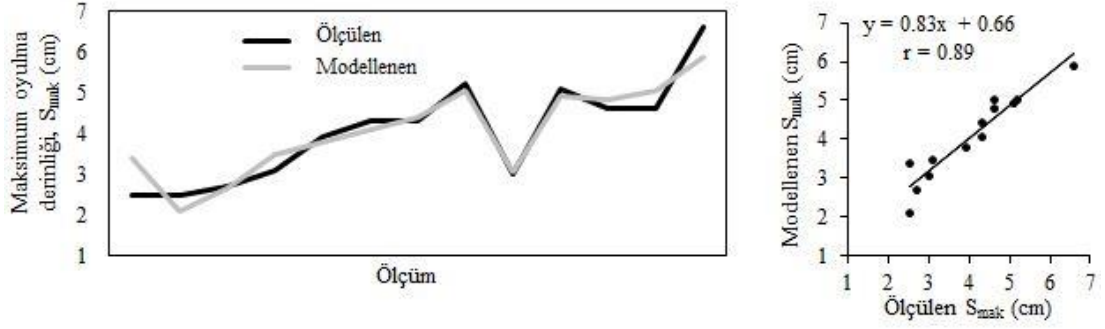
Şekil 7.4. Dairesel kesit için ÇKYSA (6,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri



Şekil 7.5. Kare kesit için ÇKYSA (5,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri



Şekil 7.6. Dairesel kesit için ÇLR (6,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri



Şekil 7.7. Kare kesit için ÇLR (5,1,1) modelinin test aşaması saçılma ve gidiş grafikleri

Sonuç olarak, ÇKYSA modelleri ÇLR modellerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yani gerçek değerlere daha yakın sonuçlar vermiştir. Ancak en iyi modellere bakıldığında değişken sayısının 5 ve 6 olduğu yani modele etkiyen tüm değişkenlerin hesaba girdiği görülmektedir. Modellemelerin bir amacı da az değişken ile fiziksel bir olayın sonuçlarına yakın sonuçlar veren fonksiyonları, ağı (modeli) bulmaktır. Bu sebeple, maksimum oyulma derinliklerinin (S_{mak}) modellenmesinde kullanılan ÇKYSA (6 girişli model) ve ÇLR (5 girişli model) yöntemlerinin tablo ve grafiklerindeki sonuçlar doğrultusunda tüm değişkenler ile deney düzeneğine paralel sonuçlar verdiği söylenebilir.

8. SONUÇLAR

1. Akarsu tabanına akım yönüne dik olarak yerleştirilen boru hatlarının altında oluşan oyulma, öncelikle borunun mansap tarafında meydana gelmektedir. Borunun memba ve mansap kısmında oluşan basınç farkından dolayı borunun memba kısmında öncelikle küçük bir açıklık oluşur. Bu açıklıkta artan hızın etkisiyle, taban kayma gerilmesi artar ve taban malzemesi hızlı bir şekilde borunun memba kısmından mansap kısmına doğru hareket eder. Bu ani taban malzemesi hareketi borunun memba ve mansap kısmındaki basınç farkı dengelenene kadar sürer.
2. Maksimum oyulma derinlikleri, boru hattının mansap kısmında meydana gelmektedir. Kare kesitli boru hatlarında oluşan maksimum oyulma derinlikleri, dairesel kesitli boru hatlarında oluşan maksimum oyulma derinliklerine göre boru hattının merkezine daha yakındır.
3. Boru kesitleri arttıkça meydana gelen oyulma derinlikleri de artmaktadır. Kare kesitli boru hatlarında oluşan oyulma derinlikleri, dairesel kesitli boru hatlarına oluşan oyulma derinliklerine göre daha fazladır.
4. Taban malzemesi olarak $d_{50}=0,38$ mm çapında oluşan oyulma derinliği, $d_{50}=0,60$ mm çapında oluşan oyulma derinliğinden daha büyüktür.
5. Rölatif oyulma derinliği (S/D) ve rölatif oyulma çukuru genişliği (L/D), akımın Froude sayısı (Fr) ve Reynolds sayısının artması ile artmaktadır. Rölatif akım derinliğinin (y_n/D)'nin boyutsuz oyulma derinliğine (S/D) etkisi ihmal edilebilir.
6. Kanaldaki akım hızının (V) artması neticesinde, kararlı akım durumunda borunun mansap kısmında oluşan art-iz etkisi, borunun memba kısmında da oluşmaktadır. Bu olay oyulma çukuru genişliğini (L) daha fazla artırmaktadır.
7. Boru hatları etrafında meydana gelen oyulma derinliklerine Froude sayısının etkisinin Reynolds sayısının etkisinden daha iyi olduğunu hesaplanan korelasyon katsayıları göstermiştir.
8. Maksimum oyulma derinliklerinin (S_{mak}) modellenmesinde kullanılan ÇKYSA (6 girişli model) ve ÇLR (5 girişli model) yöntemlerinin tablo ve grafiklerindeki sonuçlar doğrultusunda tüm değişkenler ile deney düzeneğine paralel sonuçlar verdiği söylenebilir.

Bu çalışmada yapılan deneyler, boru hatları ile taban malzemesi arasında boşluk bırakılmadan gerçekleştirilmiştir. Deneyler, daha farklı taban malzemeleri kullanarak, boru yzeyi kaplanarak, taban malzemesi ile boru hatları arasında belirli oranlarda boşluklar bırakılarak veya boru hatları belirli oranlarda taban malzemesine gmlerek tekrarlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Yüksel, Y., Üç, S., Akıma Yerleştirilen Engelden Dolayı Oluşan Türbülansın Tabana Etkisi, YÜD 3-4, 51-62, 1993.
2. Prandtl, L., In Verhandlungen des Dritten Internationalen Mathematiker-Kongress in Heidelberg, A. Krazer, ed., Teubner, Leipzig, Germany, 484, 1904.
3. Sümer, B.M., Fredsoe, J., Hydrodynamics Around Cylindrical Structures, World Scientific, Singapore, 528, 1997.
4. Zdravkovich, M.M., Flow Around Circular Cylinders, Oxford University Press Inc., New York, 1, 672, 1997.
5. Sümer, B.M., Ünsal, İ., Beyazıt M., Hidrolik, Birsen Yayınevi, 1995.
6. Yüksel, Y., Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik, Beta Yayınları, İstanbul, 2008.
7. Üç, S., Akarsu Kıvrımlarındaki Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Yerel Oyulmalar, İstanbul, 1979.
8. Aziz, S., Ard Arda Dizili Köprü Ayakları Etrafında Oluşan Oyulmanın Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi., İstanbul, 1996.
9. Tison, L.J., Erosion Autour Des Pilles De Pont En Riviere, Annales Des Travaux De Belgique, 41(3), 1940.
10. Berkün, M., Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik, Literatür Yayınları, s. 379-403, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2010.
11. Engelund, F., Hansen, E., A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams, Teknisk Forlag: Copenhagen, Denmark, 3rd edn, 62, 1972.
12. Fredsoe, J., Deigaard, R., Mechanics of Coastal Sediment Transport, World Scientific Publishing, Advances Series on Ocean Engineering, 3, 1992.
13. Madsen, O.S., Grant, W.D., Sediment Transport in the Coastal Environment. In: Report No. 209, Ralph M. Parsons Laboratory, for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, M.I.T., 105, 1976.
14. Znamenskaya, N.S., Morphological Principle of Modeling of River-Bed Processes, Proceeding 13 th Congress International Association of Hydraulics Research, Kyoto, 5(1), 1969.
15. Meyer-Peter, E., Muller, R., Compte Tenue Des Mesures Recentes De Transport Dans Les Rivieres Neerlandaises., 2. me., Journal Hydraulique Societe Hydraulique De France, Grenoble, 98-103, 1938.

16. Meyer-Peter, E., Muller, R., Formulas for Bed-Load Transport, Sec. Int. IHAR Congress, Stockholm, Sweden, 1948.
17. Einstein, H.A., The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, Technical Bulletin No. 1026, U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D. C., 1950.
18. Bijker, E.W., Mechanics of Sediment Transport by the Combination of Waves and Current., In Design and Reliability of Coastal Structures, 23rd International Conference on Coastal Engineering., American Society of Civil Engineers, New York, 147-173, 1992.
19. İsmailoğlu, M.L., Akarsu Kıvrımlarını Geçen Dairesel Kesitli Boru Hatları Etrafında Oyulma Derinliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2005.
20. Chao, J.L., Hennessy, P.V., Local Scour under Ocean Outfall Pipelines, J. Water Pollution Control Federation, 44(7), 1443-1447, 1972.
21. Kjeldsen, S.P., GjOrsvtk, O., Brtngaker, K.G. and Jacobsen, J., Local Scour Near Offshore Pipelines, Proc. Of 2nd Int. Conf. On Port and Ocean Engrg. Under Arctic Conditions, Univ. of Iceland, Iceland, 308-331, 1973.
22. Bijker, E.W., Leeuwestein, W., Interaction between Pipelines and the Seabed Under The Influence of Waves and Current, Seabed Mechanics, Proc. Symp. IUTAM/IUGG, Newcastle Upon Tyne, England, December, 235-242, 1984.
23. İbrahim, A. ve Nalluri, C., Scour Prediction around Marine Pipelines, Proc. 5th Int. Symp. on Offshore Mech. and Arctic Engrg., Tokyo, Japan., 679-684, 1986.
24. Maza, J.A., Introduction to River Engineering, Advanced Course on Water Resources Management, Universita Italiana per Stranieri, Prugia, Italy, 1987.
25. Kızılöz, B., Denizaltı Boru Hatları Altındaki Yerel Oyulmanın Düzensiz Dalga Etkisinde Modellenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013.
26. Mao, Y., Seabed Scour Under Pipelines, Proc. 7th Int. Conf. on Offshore and Arctic Engineering, Houston, Texas, 33-38, 1988.
27. Sümer, B.M., Jensen, H.R., Mao, Y. and Fredsoe, J., Effect of lee-wake on Scour Below Pipelines in Current, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 114(5), 599-614, 1988.
28. Chiew, Y.M., Mechanics of Local Scour around Submarine Pipelines, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(4), 515-529, 1990.
29. Bowles, J.E., Physical and Geotechnical Properties of Soils, McGraw-Hill Book Company, New York, N. Y, 1984.

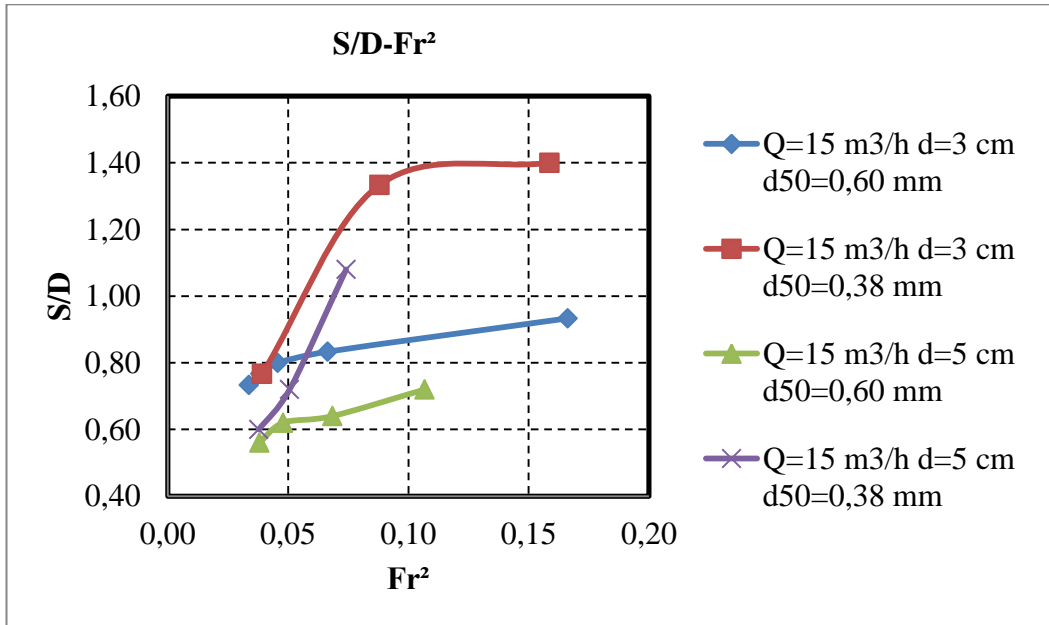
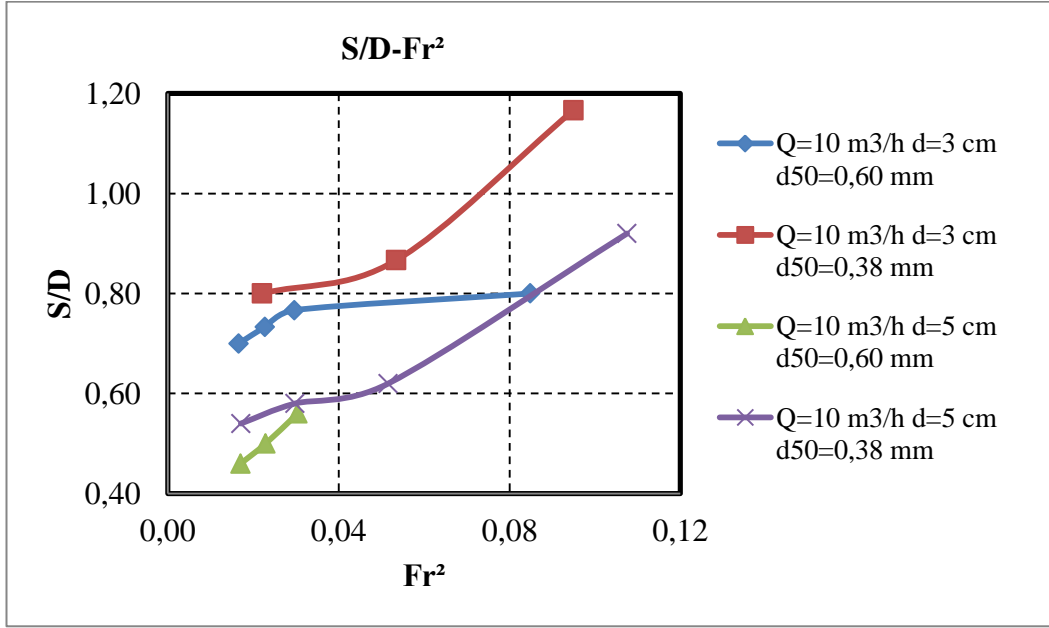
30. Chiew, Y.M., Prediction of Maximum Scour Depth at Submarine Pipelines, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(4), 452-466, 1991.
31. Moncada, M., Aguirre, J., Scour Below Pipeline in River Crossings, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125(9), 1999.
32. Sümer, B.M., Fredsoe, J., Scour below Pipelines in Waves, *J. Wtrwy., Port, Coast. And Oc. Engrg.*, ASCE, 116(3), 307-32, 1990.
33. Achenbach, E., Heinecke, E., On Vortex Shedding From Smooth and Rough Cylinders in the Range of Reynolds Numbers 6×10^3 to 5×10^6 , *J. Fluid Mech.*, 109, 239-251, 1981.
34. Sumer, B.M., Fredsoe, J., Wave Scour around a Large Vertical Circular Cylinder, *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 127 (3), 125–134, 2001.
35. Çevik, E., Yüksel, Y., Scour Under Submarine Pipelines in Waves in Shoaling Conditions, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, 125 (1) 9-19, 1999.
36. Lucassen, R.J., Scour underneath Submarine Pipelines, MATs Report PL-4 2A, Netherlands, 1984.
37. Sümer, B.M., Fredsoe, J.O., *The Mechanics of Scour in The Marine Environment*, World Scientific, Signapore, 2002.
38. Bearman, P.W., ve Zdravkovich, M.M., Flow around a Circular Cylinder near a Plane Boundary, *J. Fluid Mech.*, 89(1): 33-48, 1978.
39. Mao, Y., *The Interaction Between a Pipeline on Erodible Bed*, PHD, Tech. Univ., Denmark, Inst. of Hydrodyn. And Hydraulic Engrg., Denmark, 1986.
40. Çevik, E., *Dalga Etkisinde Denizaltı Boru Hatları ve Deniz Taban Etkileşiminin Modellenmesi*, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
41. Elmas, Ç., *Yapay Sinir Ağları*, Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş., Ankara, 2003.
42. Haykin, S., *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*, Macmillian College Publishing Company, New York, 1994.
43. Zurada, M.J., *Introduction to Artificial Neural Systems*, West Publishing Company, St. Paul, 1992.
44. McCulloch W.S., Pitts, W.H., A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, Vol. 5, 115-133, 1943.

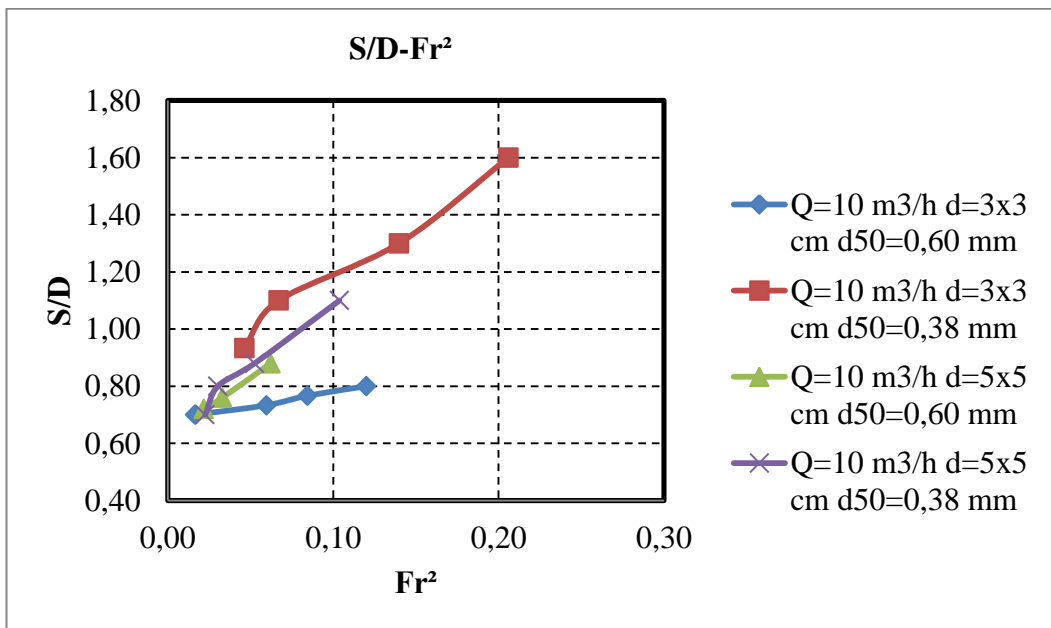
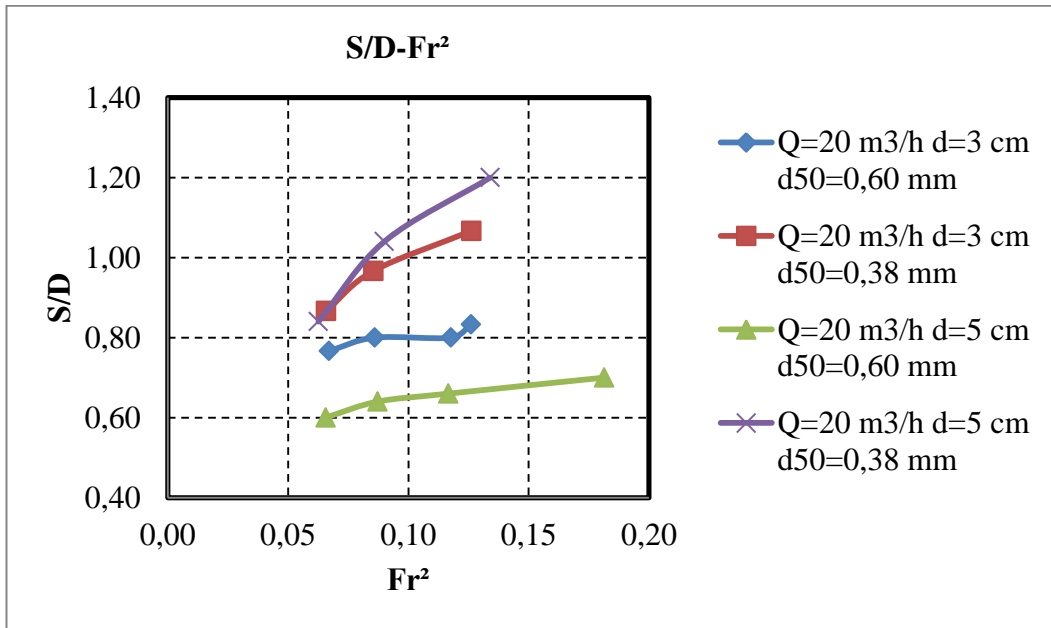
45. Uncuoğlu, E., Kaba Daneli Zeminlerde Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının Yapay Sinir Ağları ile Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2003.
46. Hagan, M.T., Menhaj, M.B., Training Feed Forward Networks with the Marquardt Algorithm, IEEE Transactions on Neural Networks, 5, 989–993, 1994.
47. Hagan, T.M., Demuth, B.H., Beale, M., Neural Network Design, PWS Publishing Company, Boston, 1996.
48. Beşdok, E., Raster Verilerin işlenmesinde YSA'ların kullanımı, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, 2005.
49. Rumelhard, D.E., Hinton, E.G., Williams, J.R., Learning Internal Representation by Error Propagation. Parallel Distributed Processing, Vol.1, MIT Press, Cambridge 1986.
50. Carling, A., Introducing Neural Networks, Sigma Press, United Kingdom, 1992.
51. Kişi, O., Uncuoğlu, E., Comparison of Three-Back-Propagation Training Algorithms for Two Case Studies. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 12, 434–442, 2005.
52. Gopalakrishnan, K., Effect of Training Algorithms on Neural Networks Aided Pavement Diagnosis, International Journal of Engineering, Science and Technology, 2, 83–92, 2010.
53. Cigizoğlu, H.K. and Kişi, O., Flow Prediction By Three Back Propagation Techniques Using K-Fold Partitioning Of Neural Network Training Data, Nordic Hydrology, 36, 49–64, 2005.
54. ASCE Task Committee, Artificial Neural Networks in Hydrology I: Preliminary Concepts, Journal of Hydrologic Engineering, 5(2), 115–123 2000.
55. ASCE Task Committee, Artificial Neural Networks in Hydrology II: Hydrologic Applications, Journal of Hydrologic Engineering, 5(2), 124–137 2000.
56. Babovic, V., Genetic Model Induction Based on Experimental Data, In: Proceedings of the IAHR Congress, Hydra 2000, London, 212–217, 1995.
57. Ervine, D.A., Macleod, A.B., Modelling a River Channel with Distant Floodbanks, Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Water Maritime and Energy, 136, 21–33, 1999.

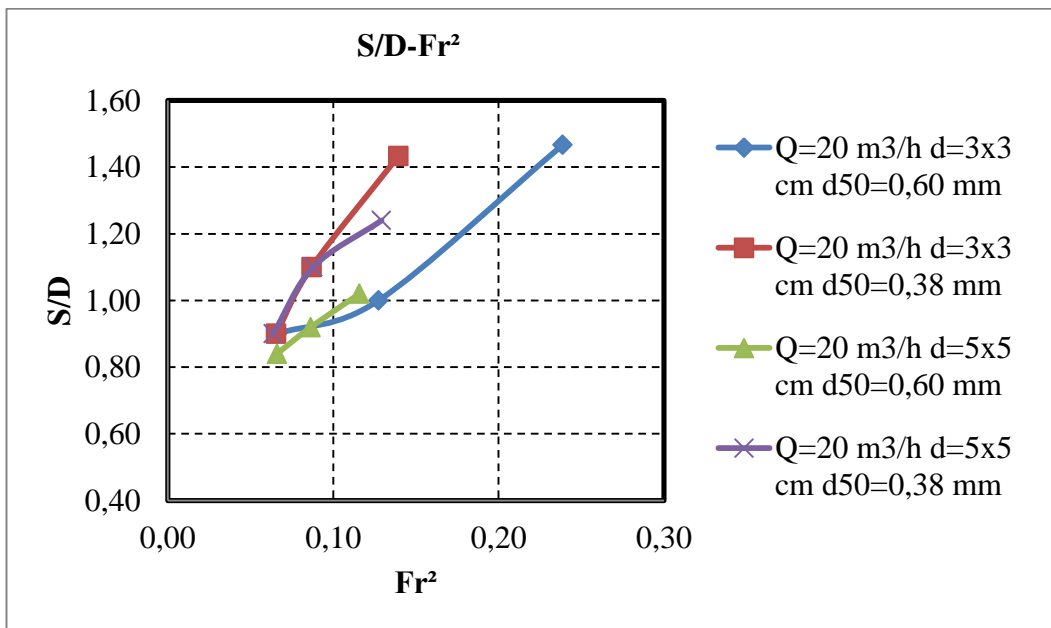
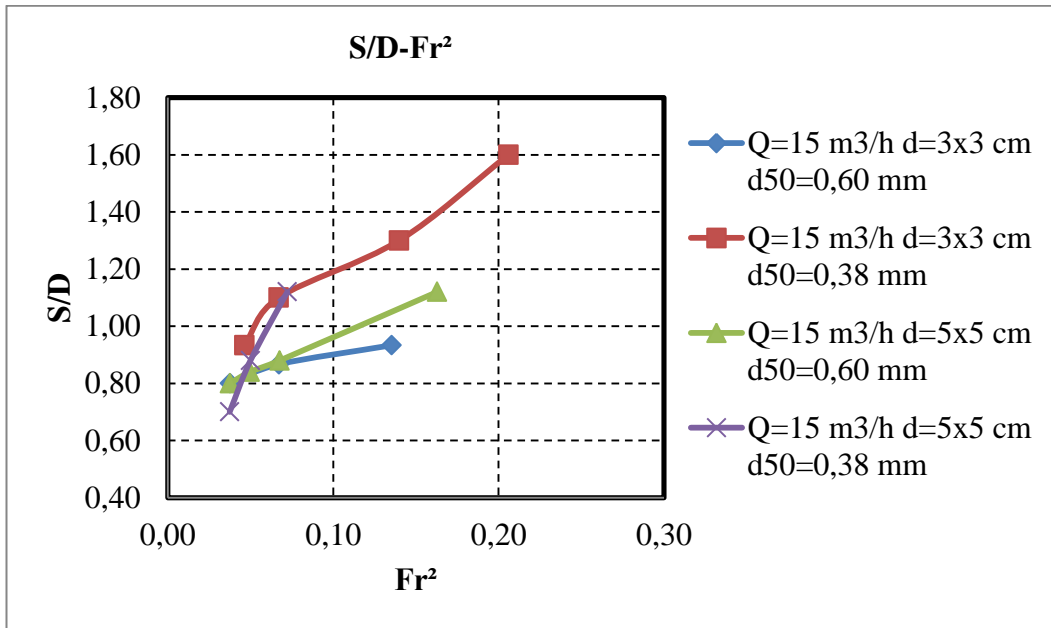
58. Minns, A.W., Analysis of Experimental Data Using Artificial Neural Networks, In: Proceedings of the IAHR Congress, Hydra 2000, London, 218–223, 1995.
59. Çobaner, M., Seçkin, G., Kişi, O., Initial Assessment of Bridge Backwater Using An Artificial Neural Network Approach, Canadian Journal of Civil Engineering, 35, 500–510, 2008.
60. Masters, T., Practical Neural Network Recipes in C++, San Diego, Academic Pres, 1993.
61. Goh, A.T.C., Backpropagation Neural Networks for Modeling Complex–Systems, Artificial Intelligence in Engineering, 9, 143–151, 1995.
62. Dawson, W.C., Wilby, R., An Artificial Neural Network Approach To Rainfall–Runoff Modeling, Hydrological Science Journal, 43(1), 47–66, 1998.
63. Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H., Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators, Neural Networks, 2, 359–366, 1989.
64. Kişi, O., Suspended Sediment Estimation Using Neuro–Fuzzy And Neural Network Approaches, Hydrological Sciences Journal–Journal Des Sciences Hydrologiques, 50, 683–696, 2005.

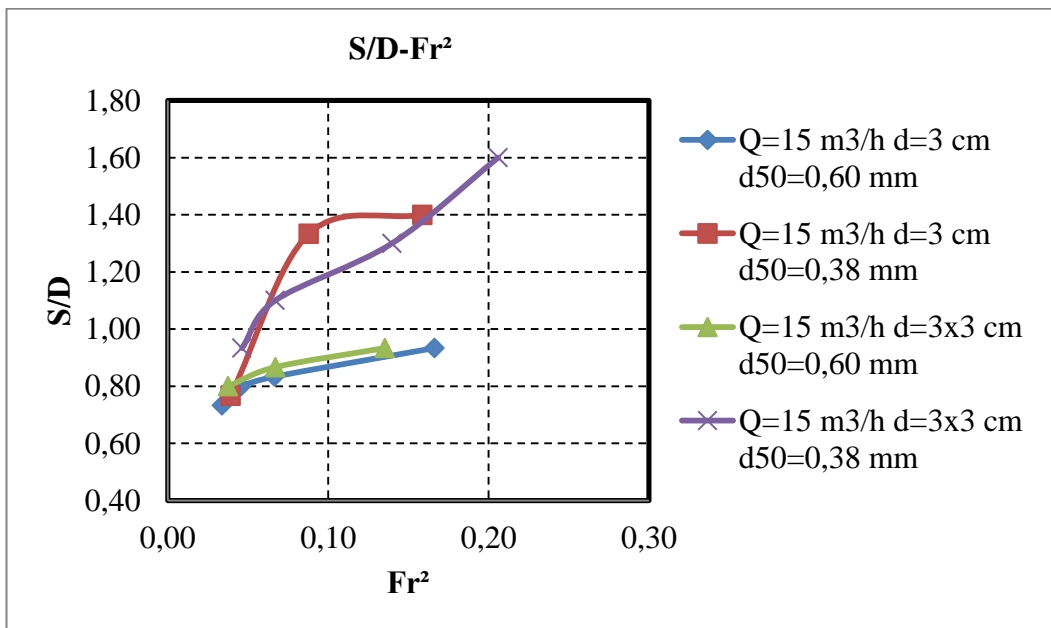
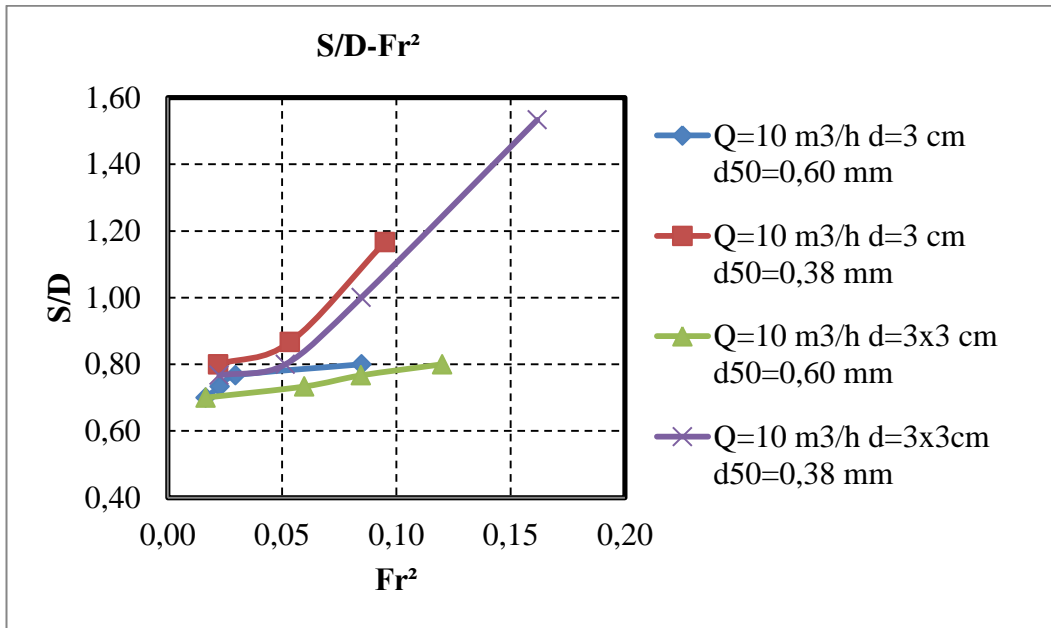
EKLER

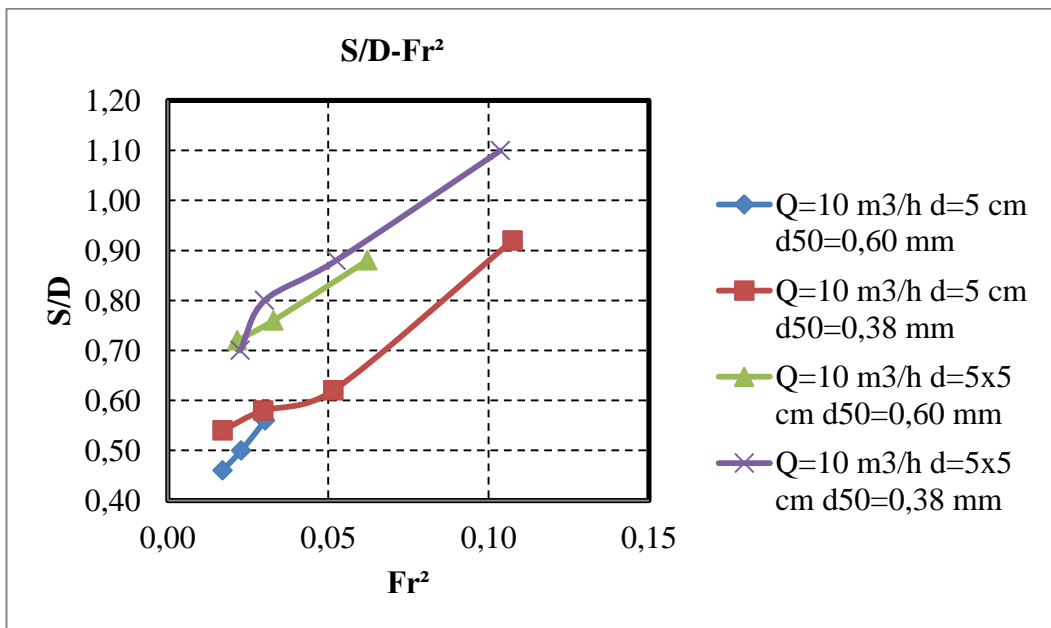
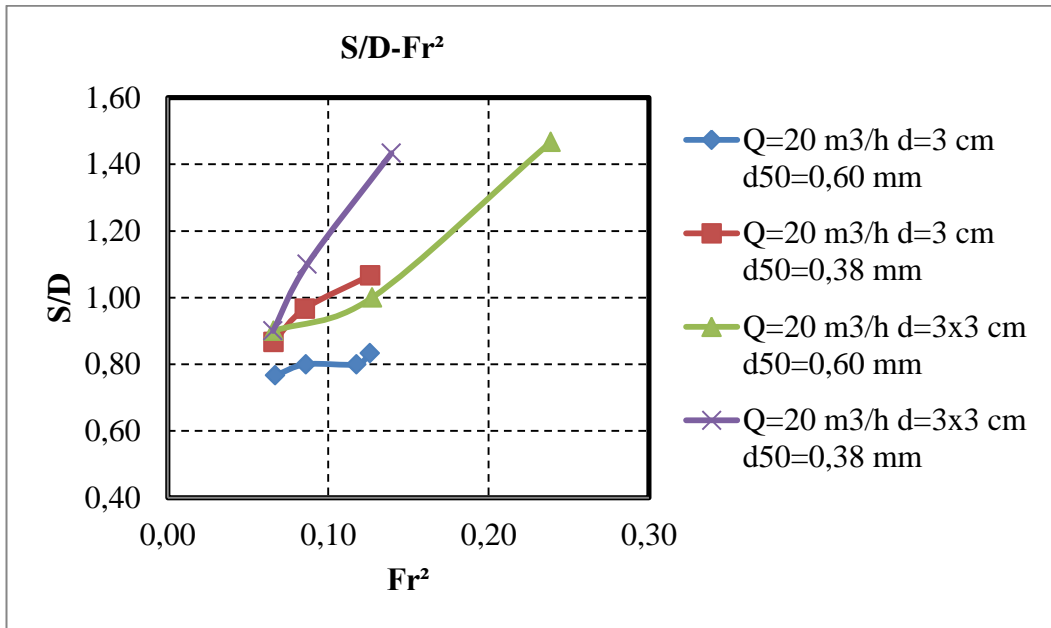
Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D) Froude Sayısının Karesi (Fr^2) İle Değişimini İfade Eden Grafikler

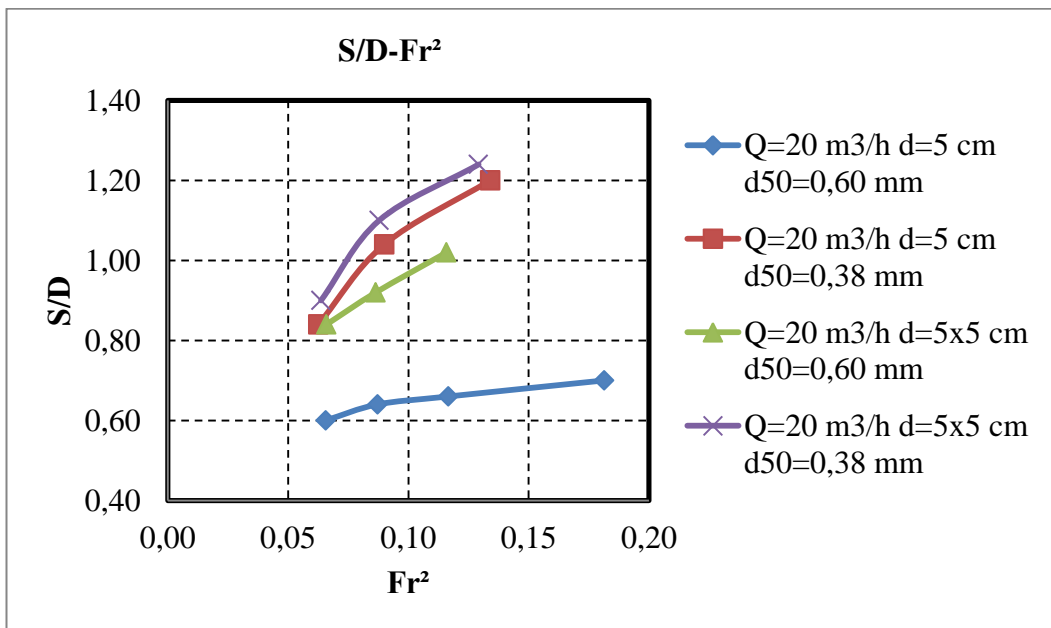
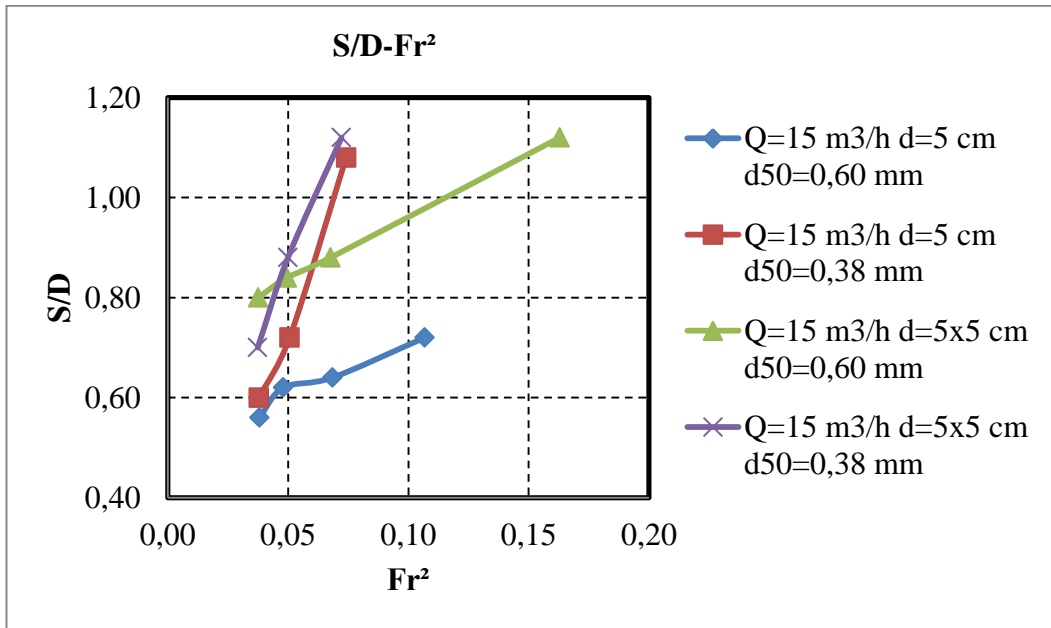




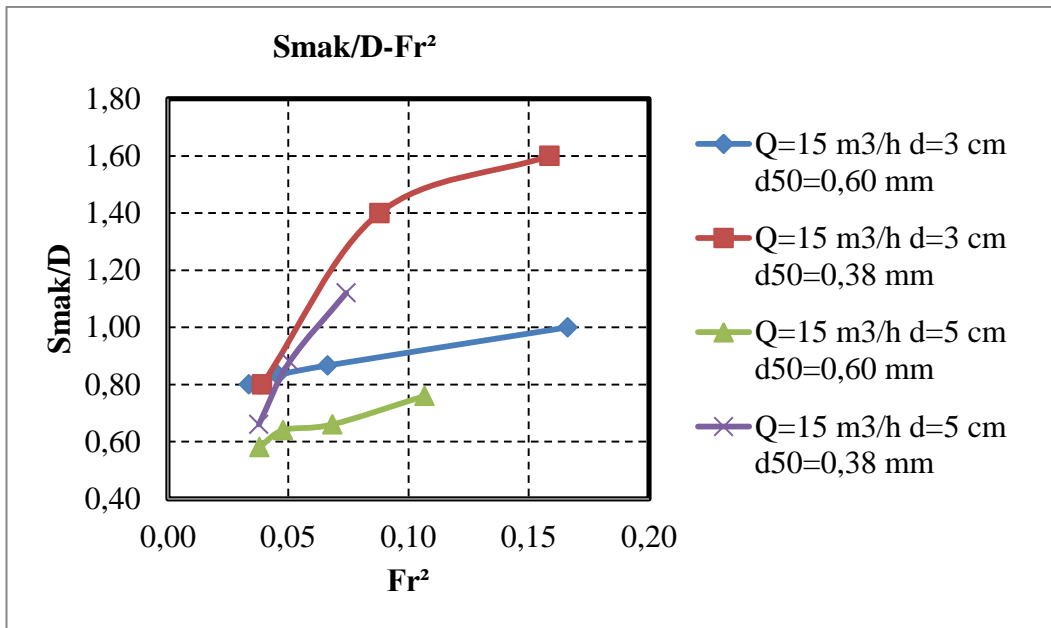
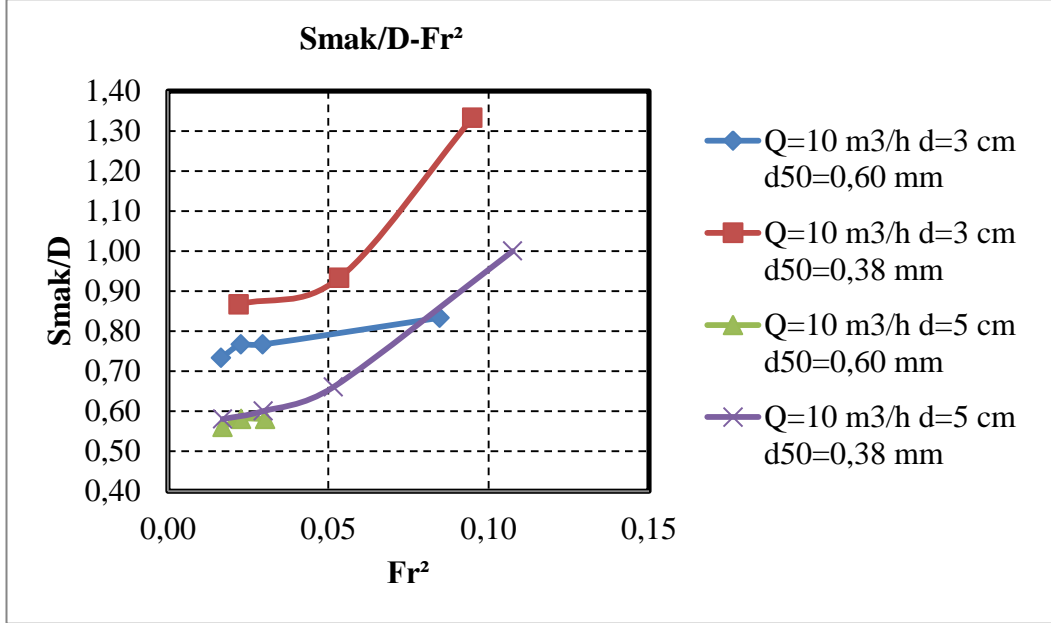


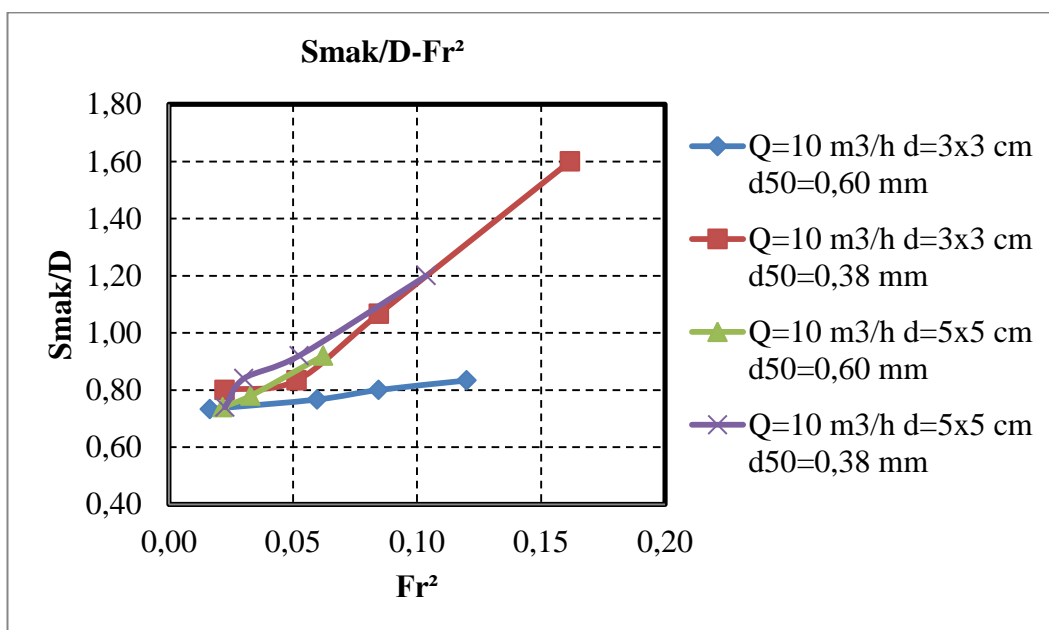
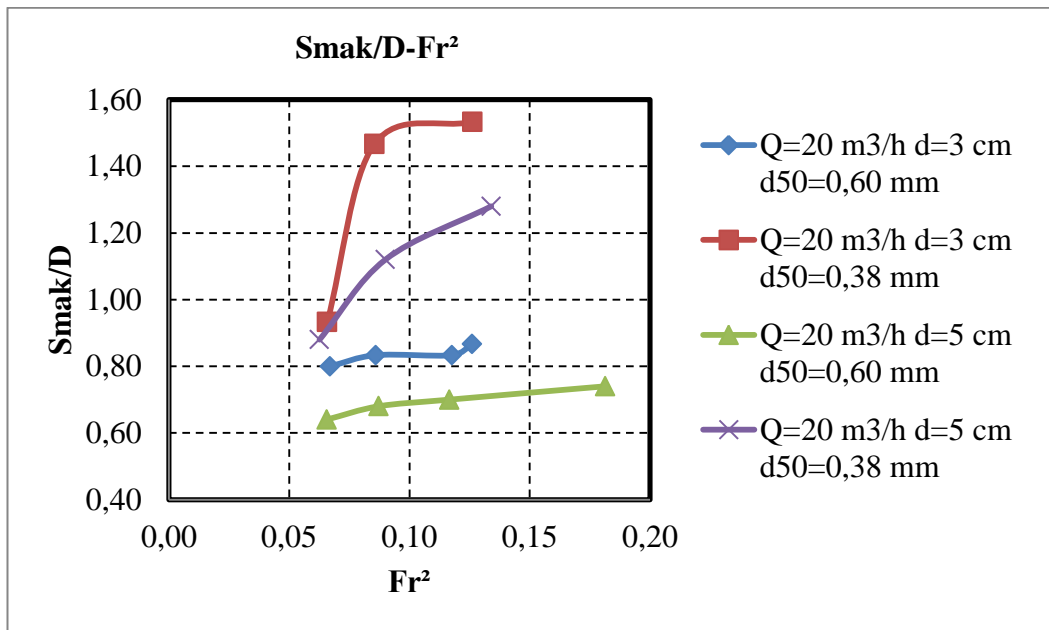


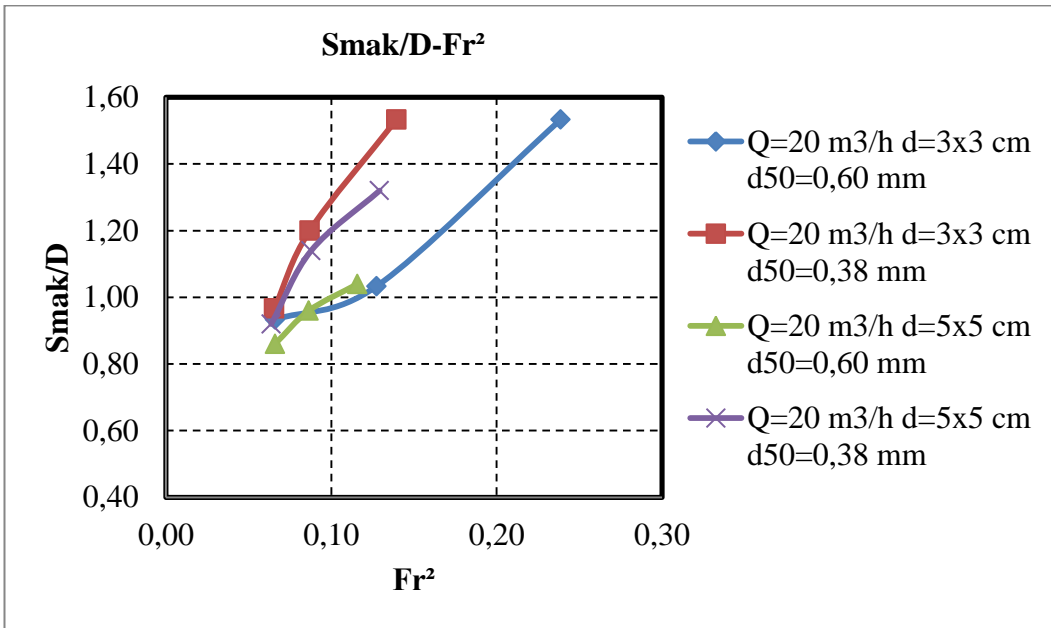
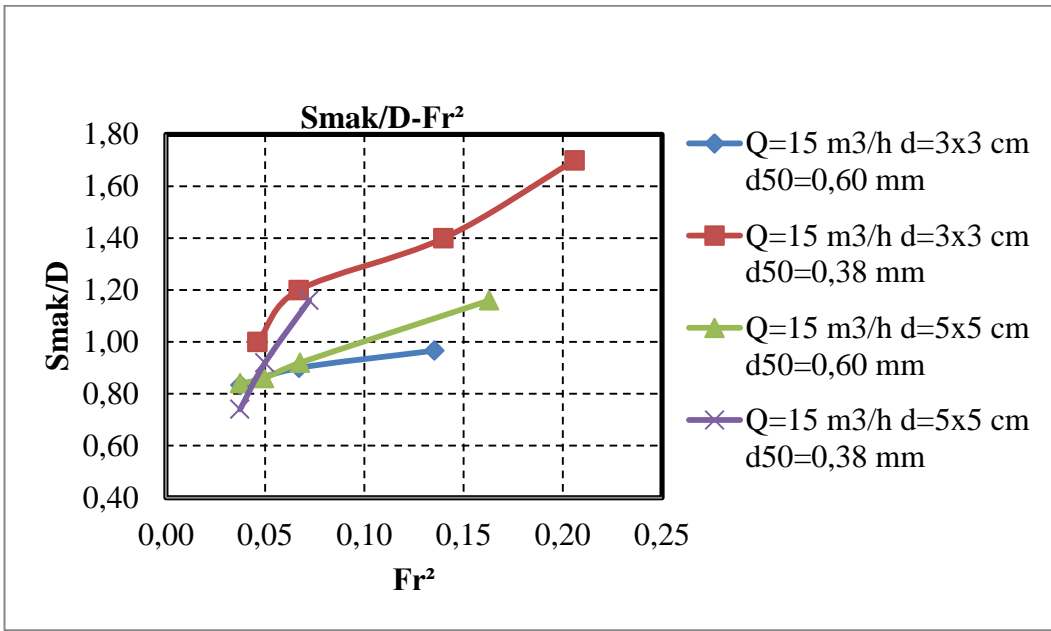


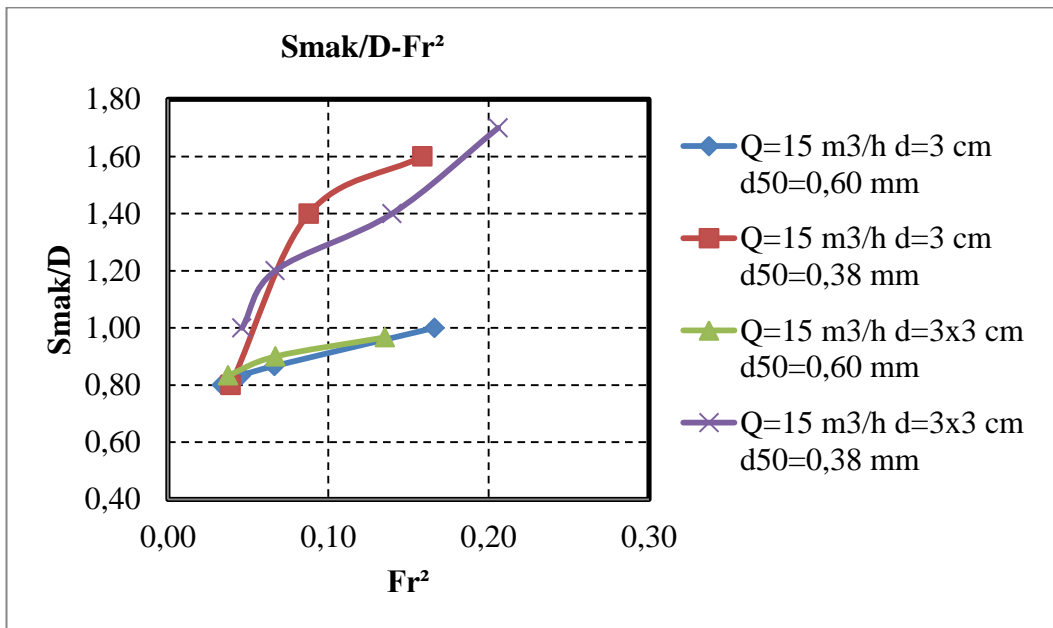
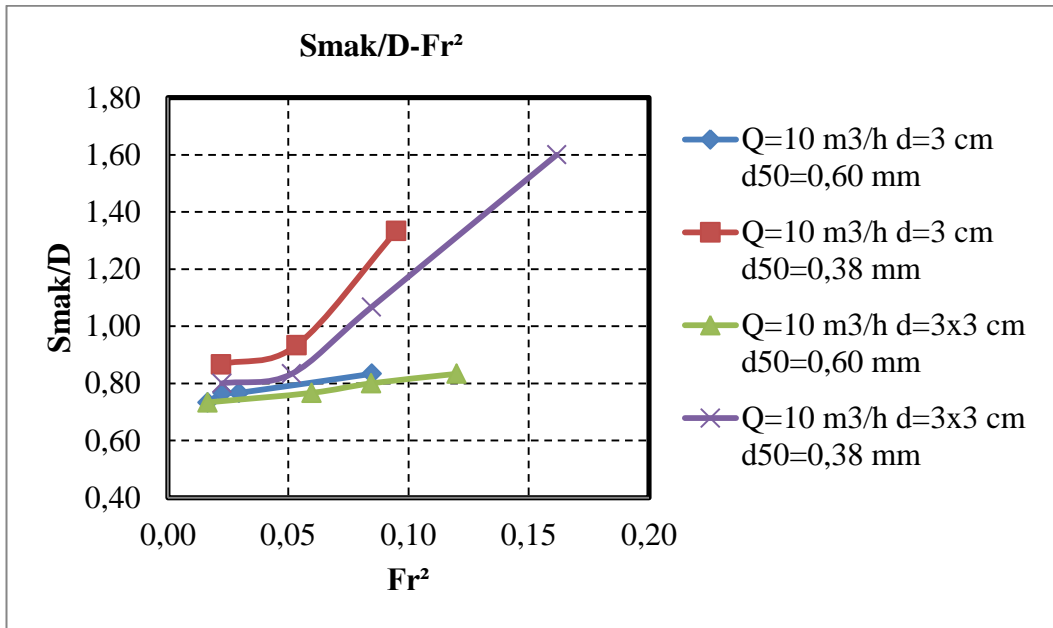


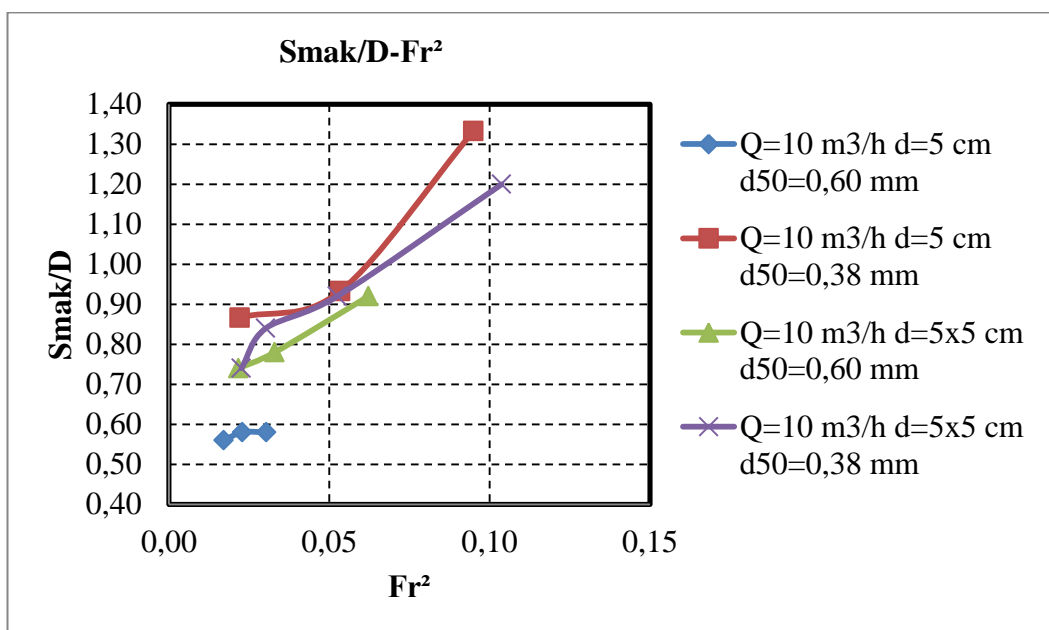
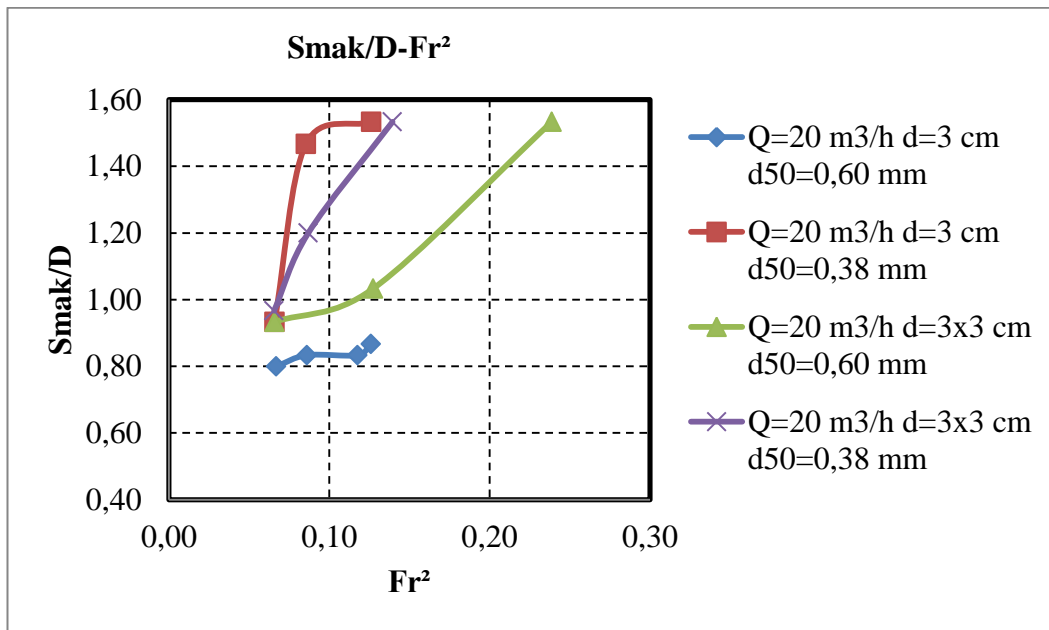
Maksimum Rölatif Oyulma Derinliğinin (S_{mak}/D) Froude Sayısının Karesi (Fr^2) İle Değişimini İfade Eden Grafikler

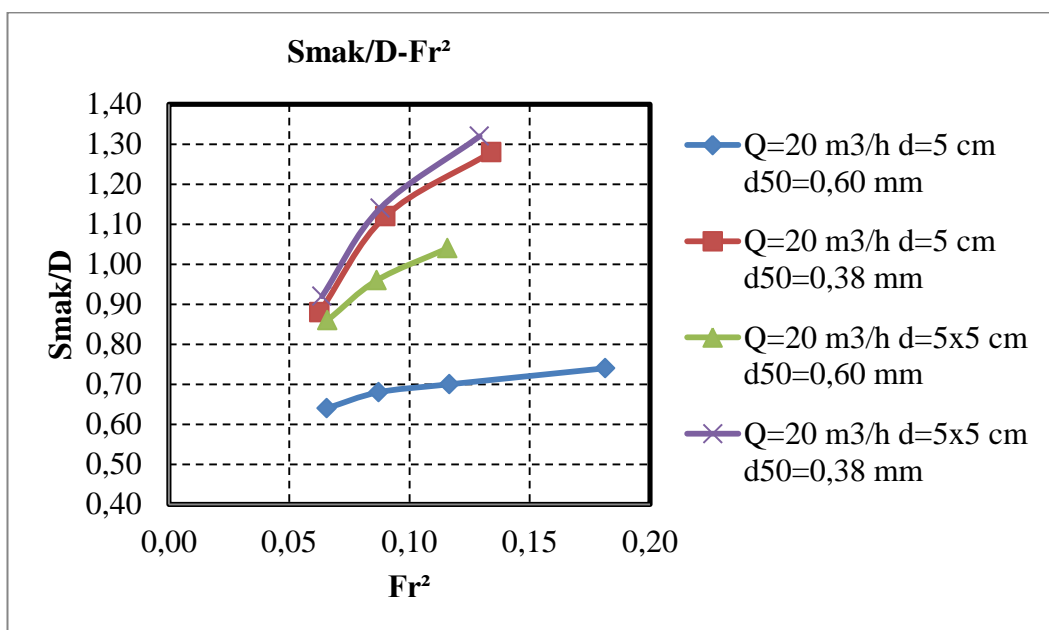
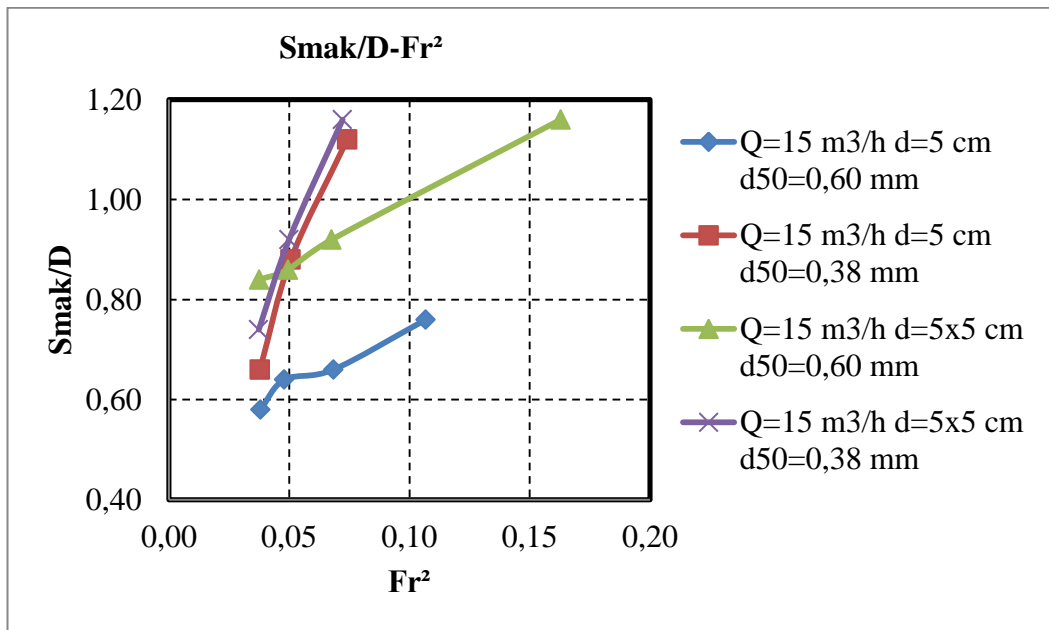




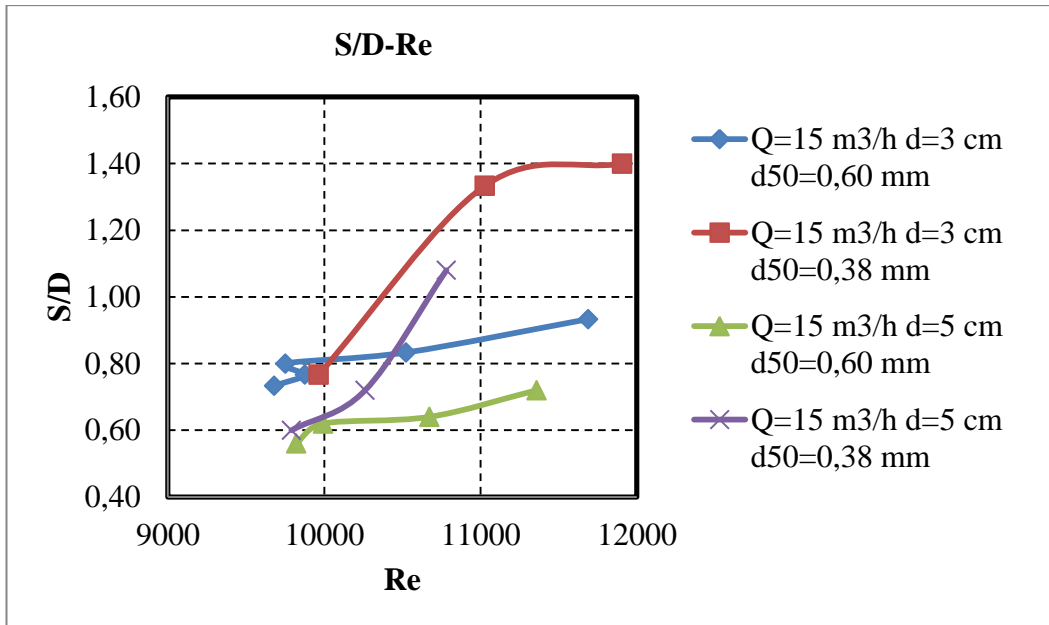
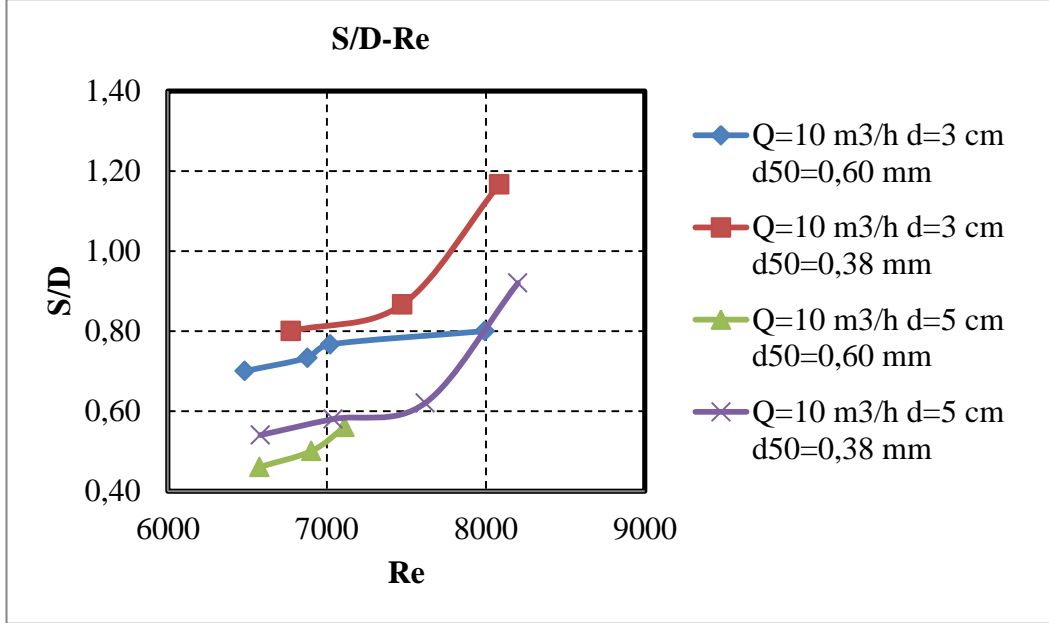


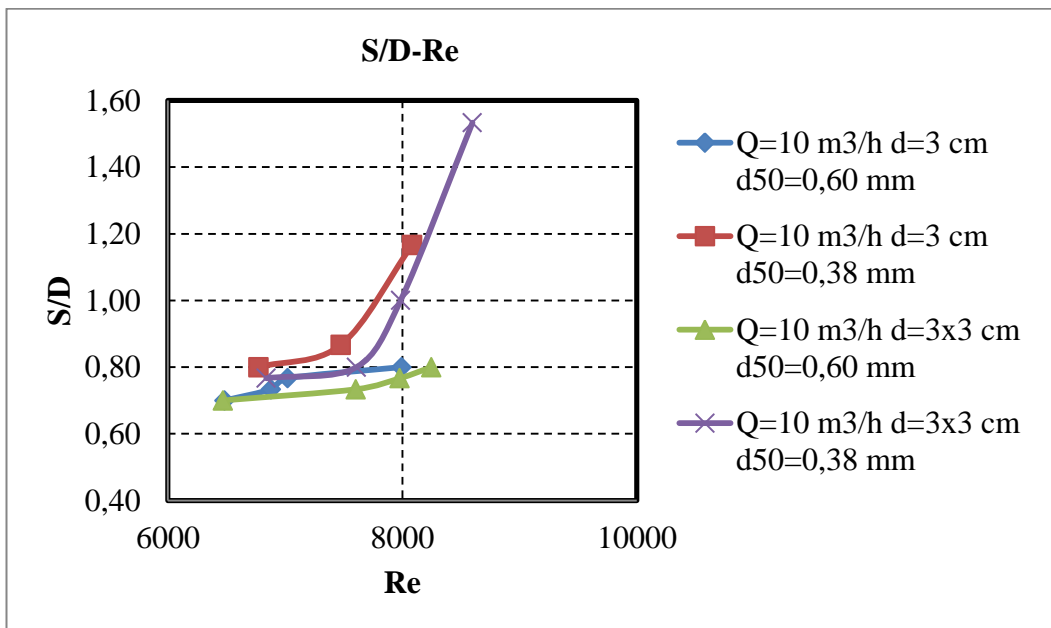
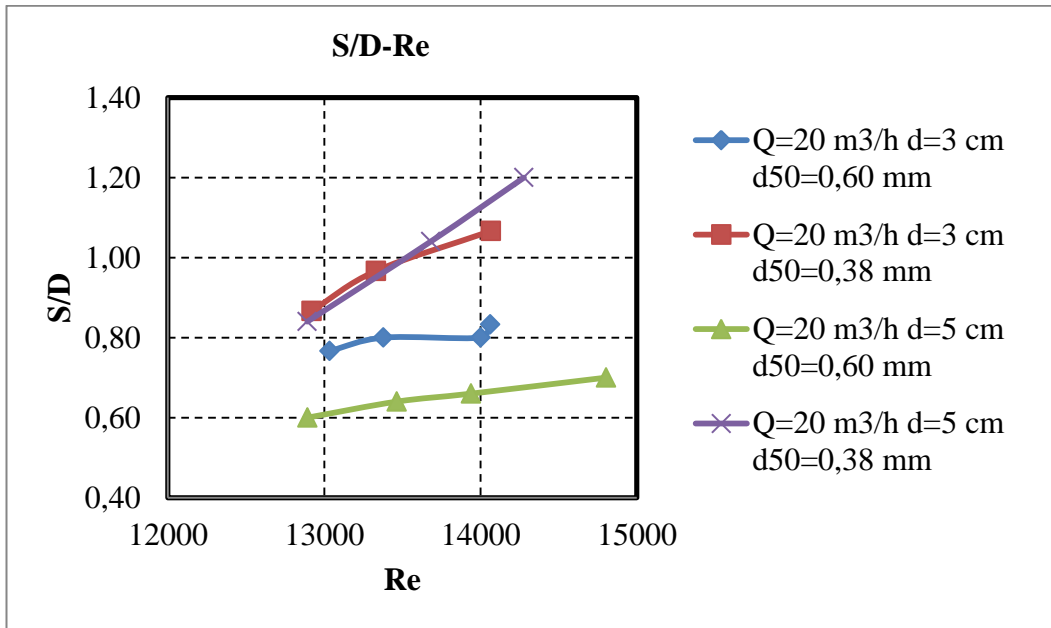


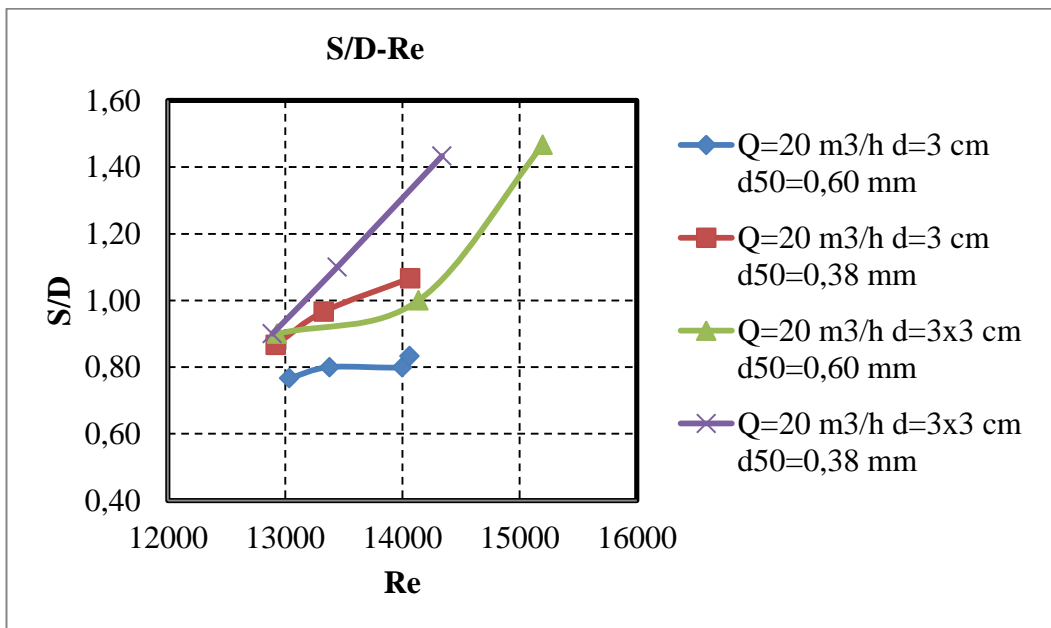
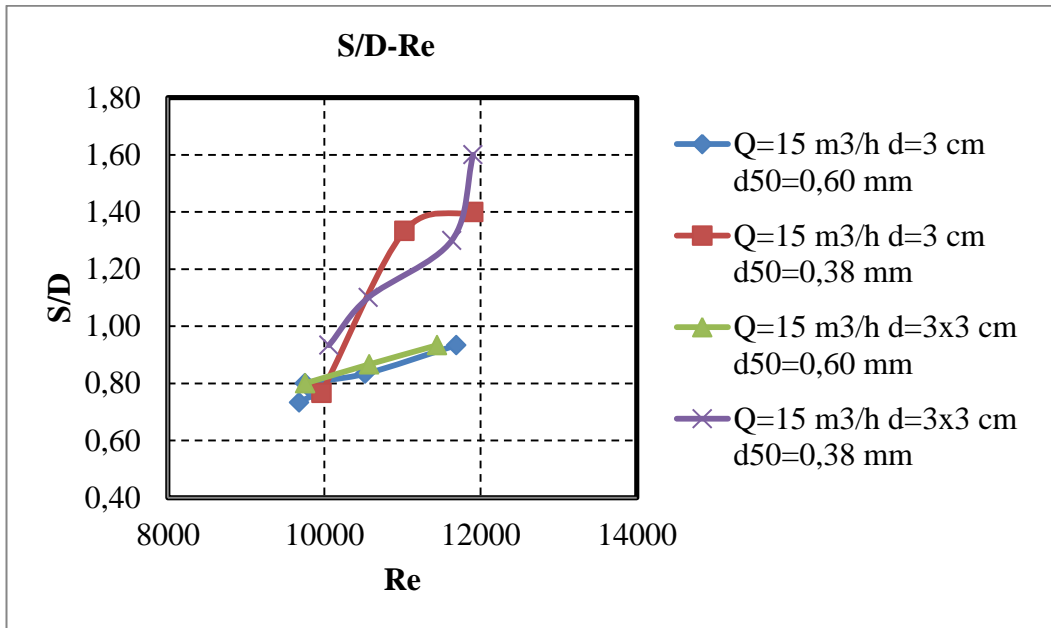


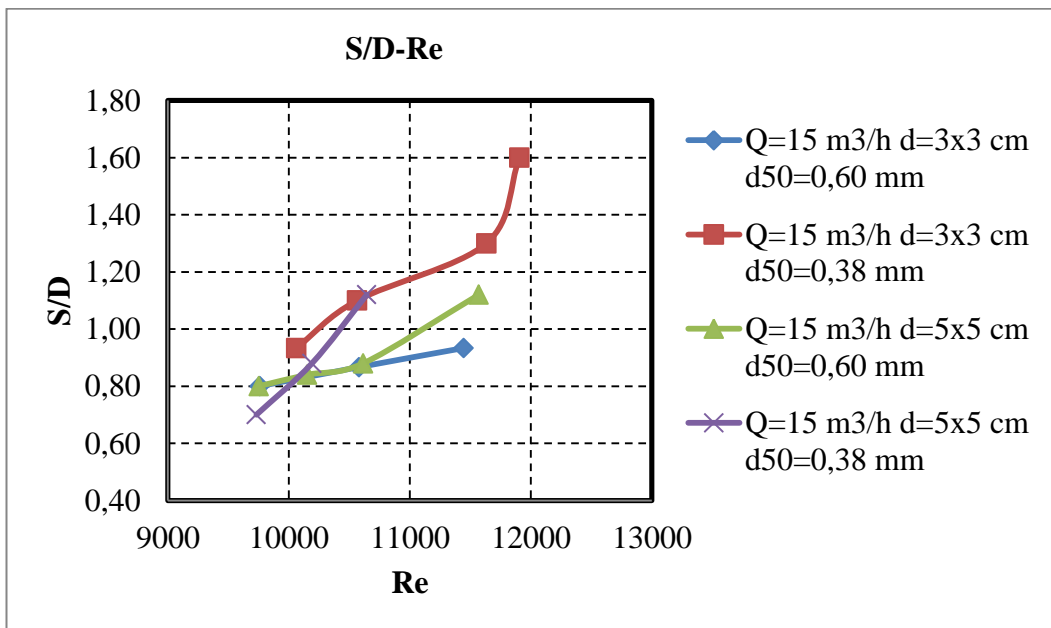
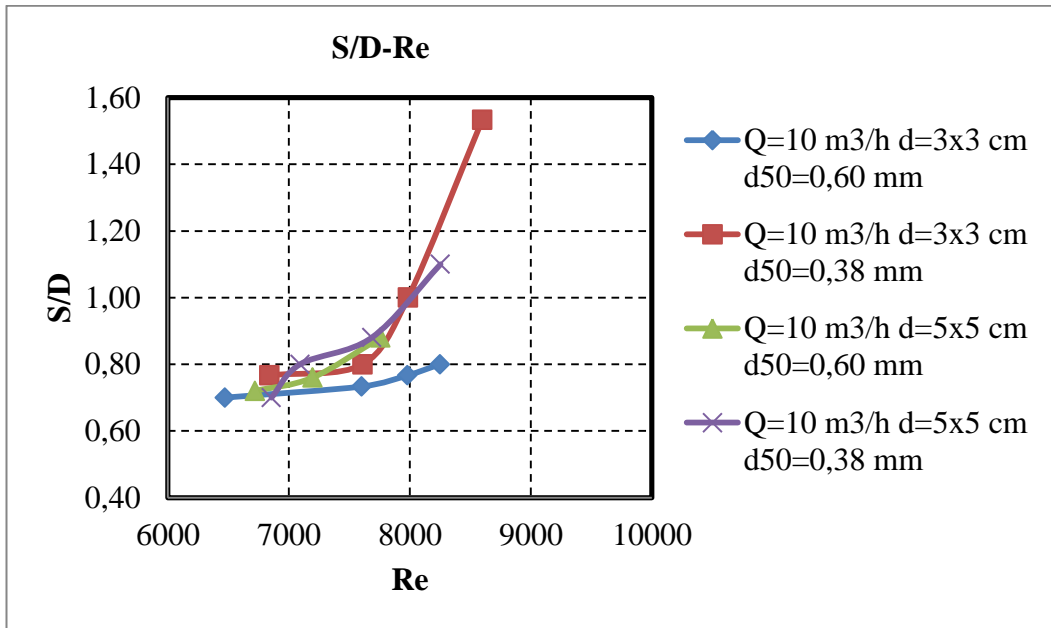


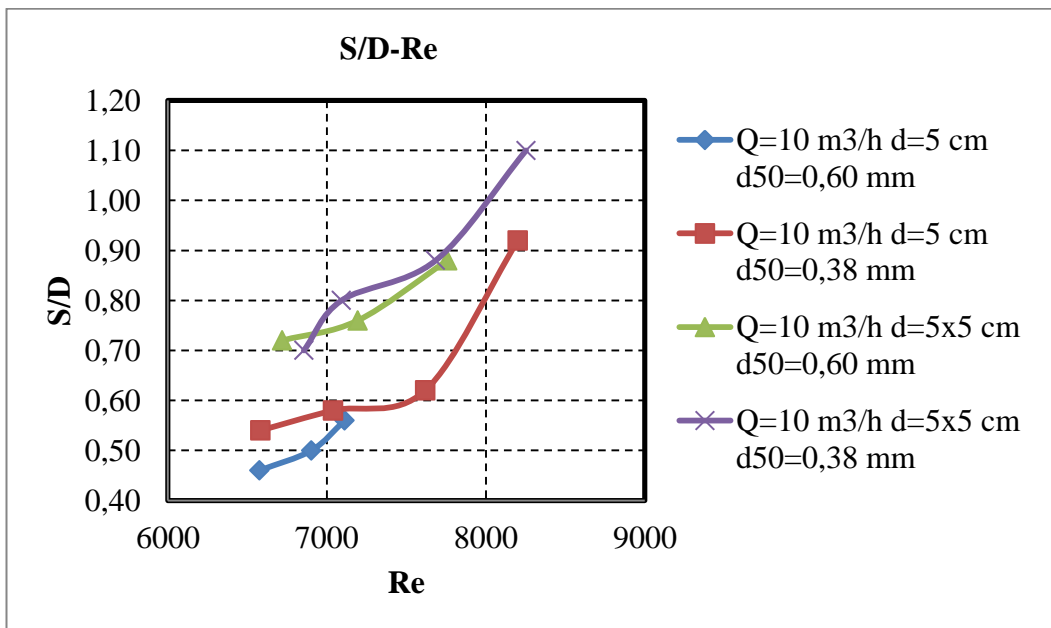
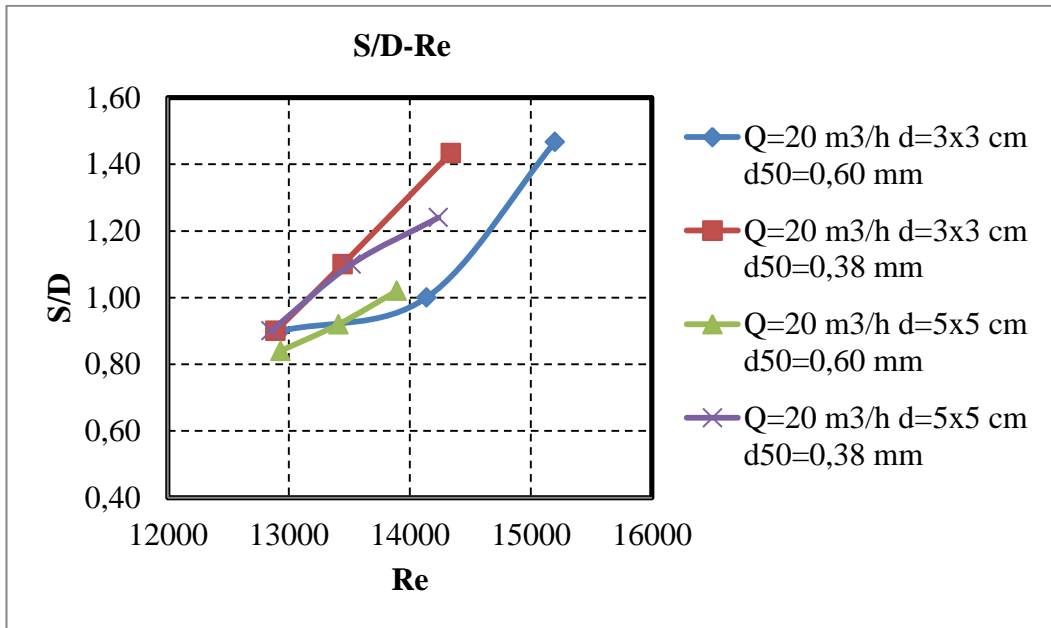
Rölatif Oyulma Derinliğinin (S/D) Reynolds Sayısı (Re) İle Değişimini İfade Eden Grafikler

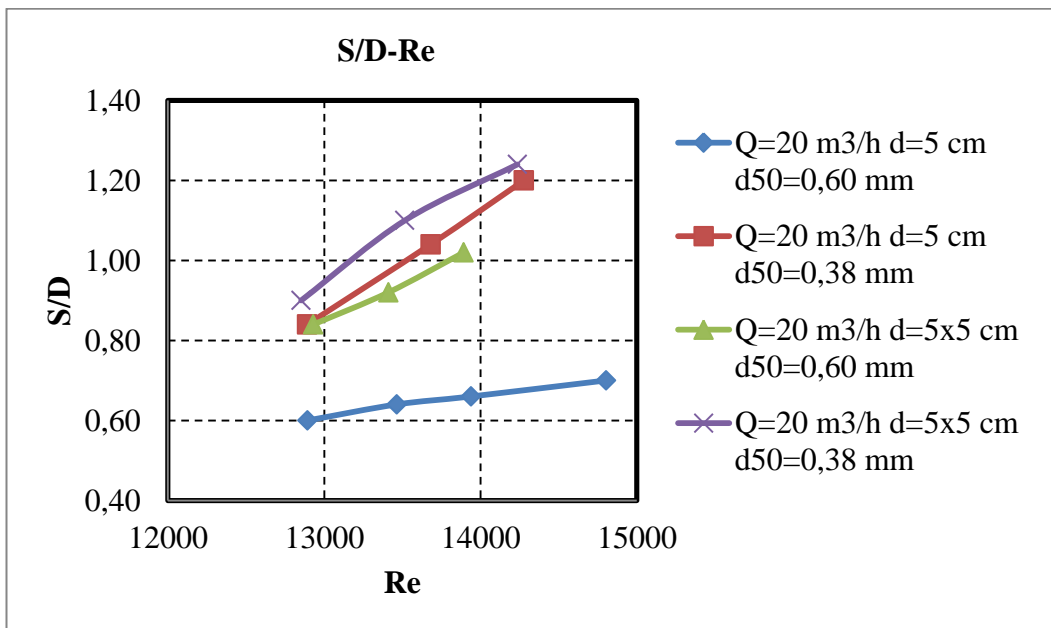
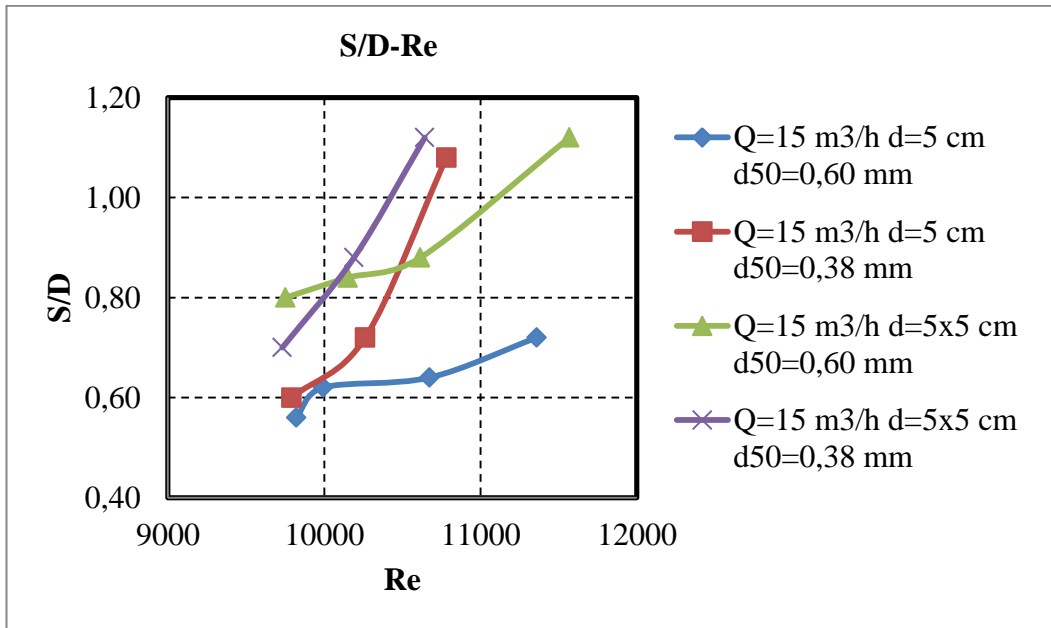




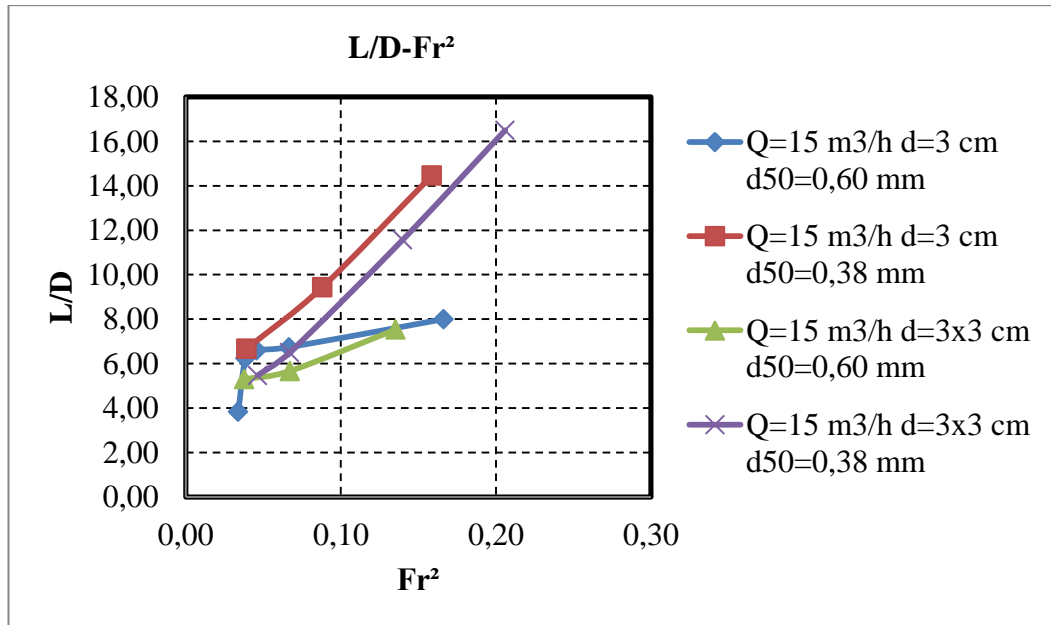
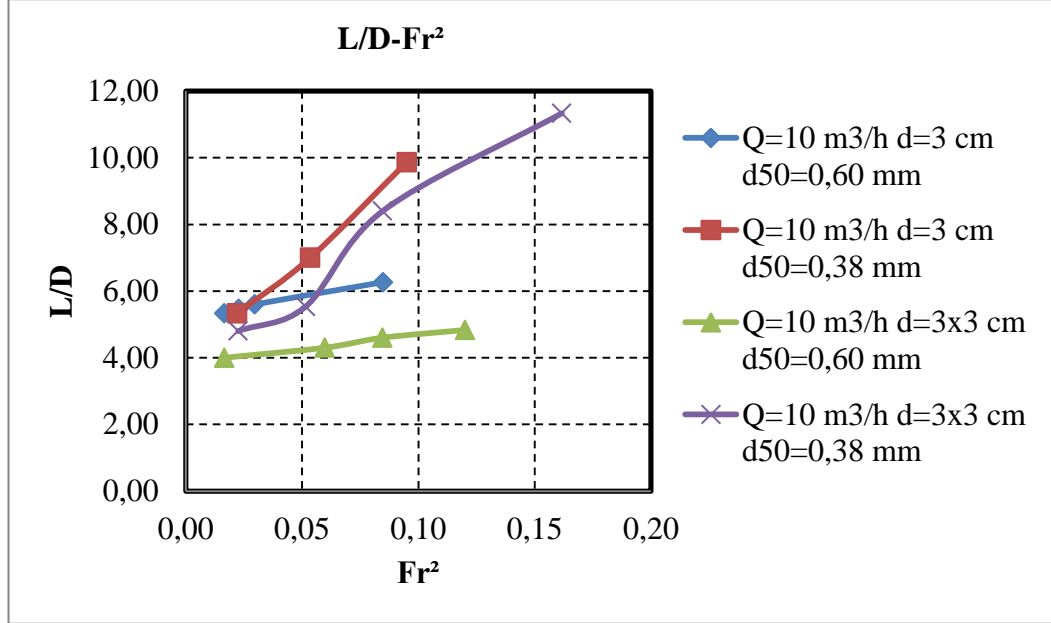


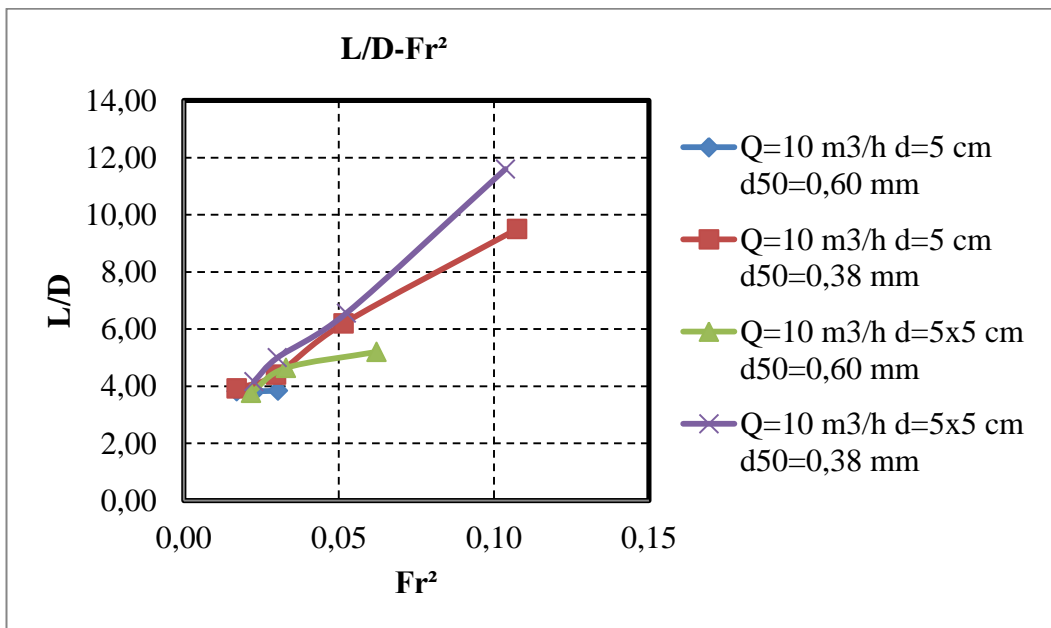
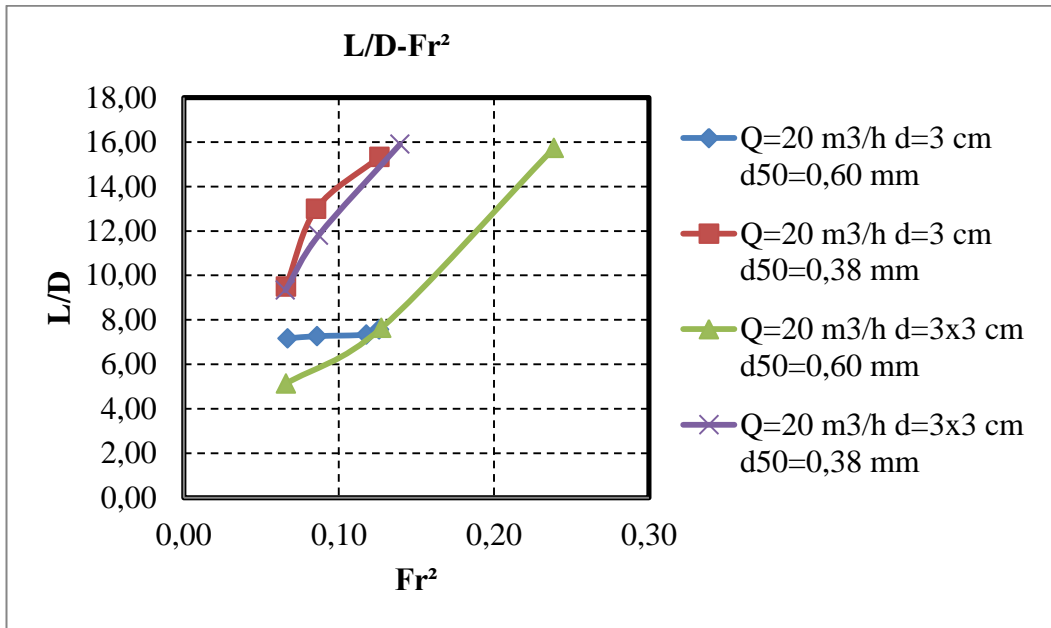


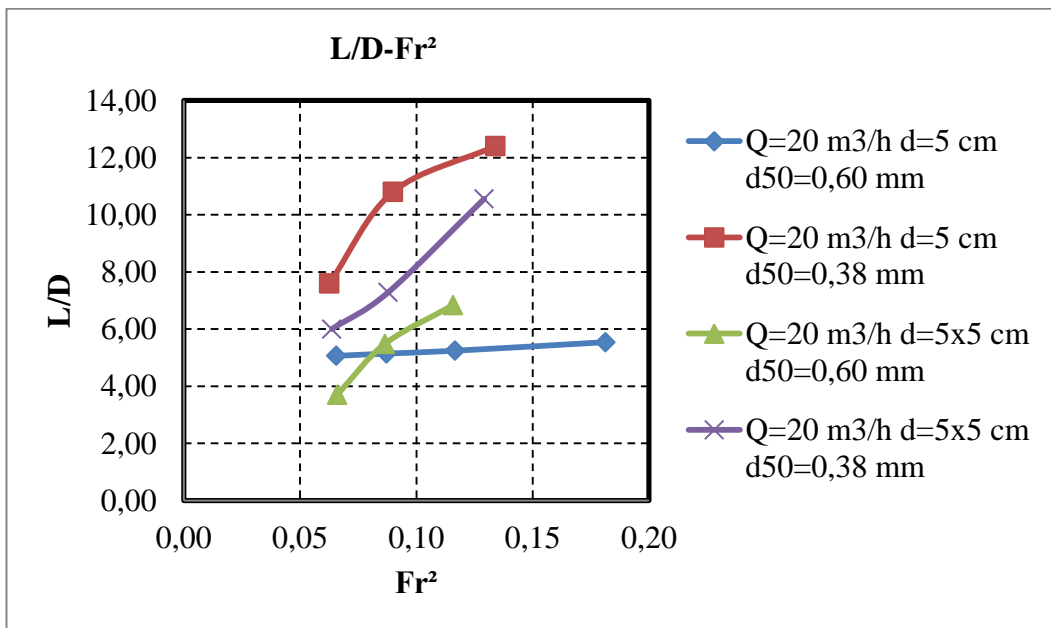
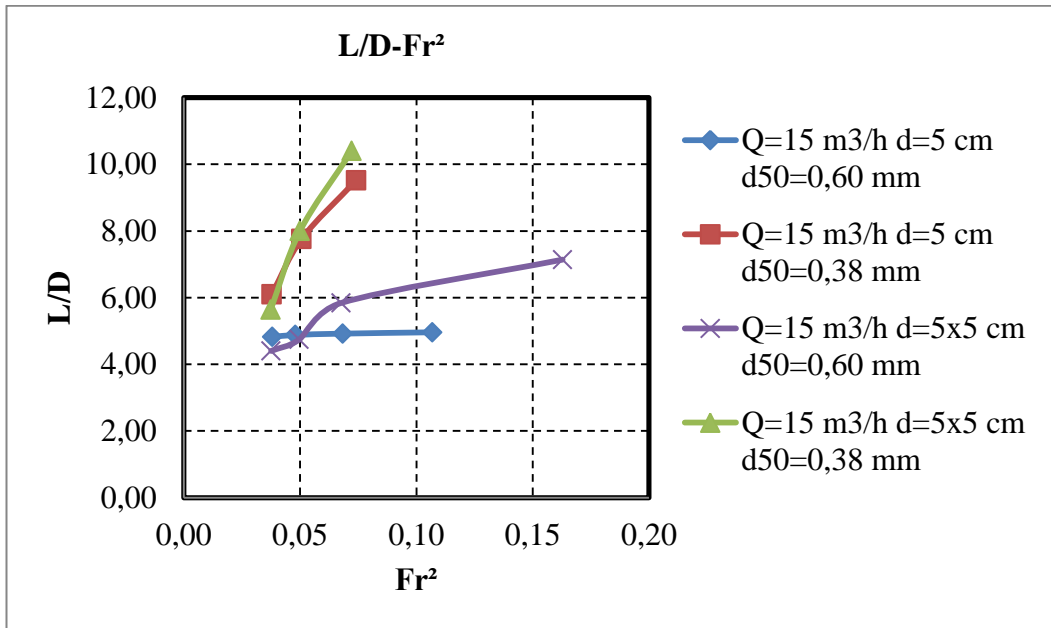


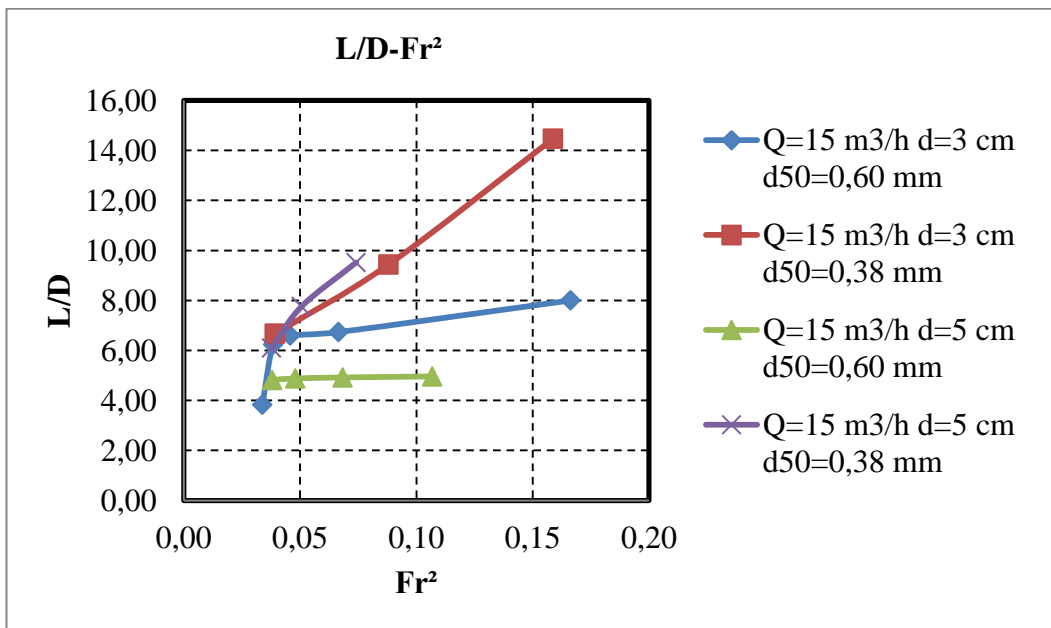
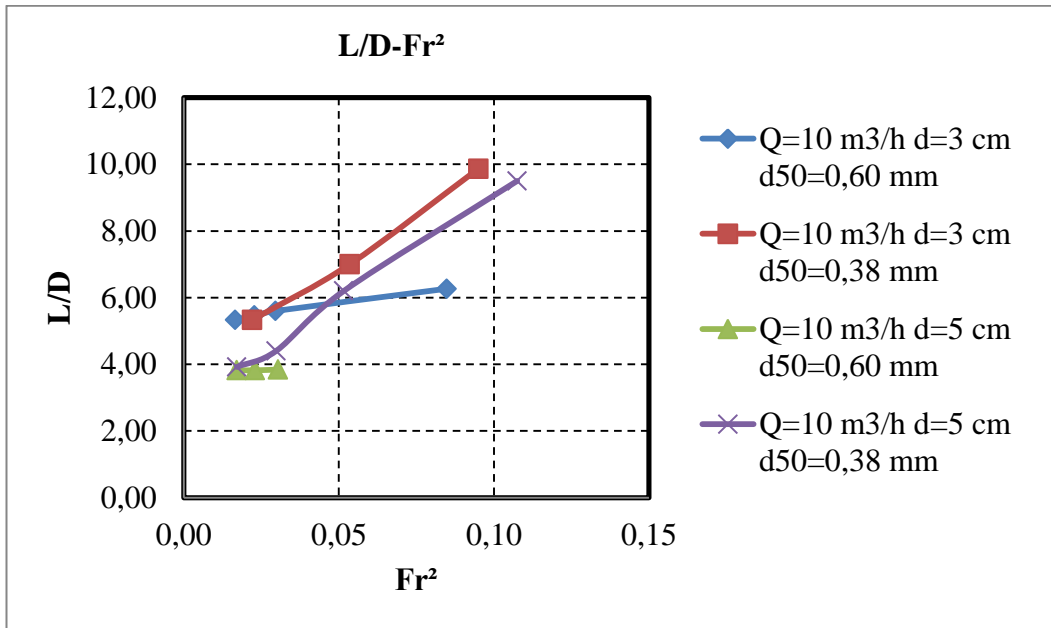


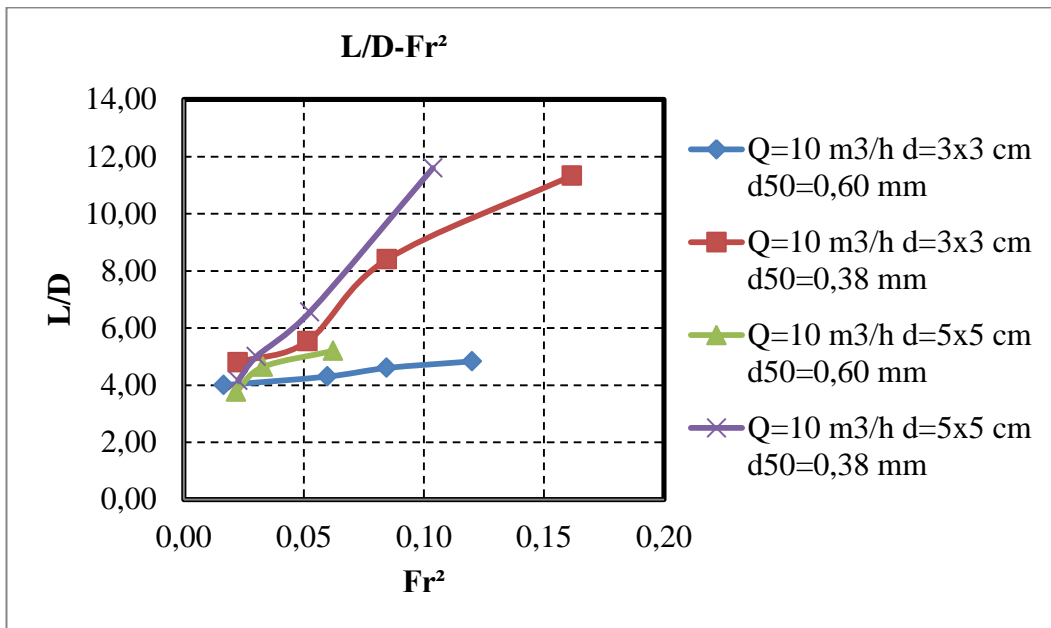
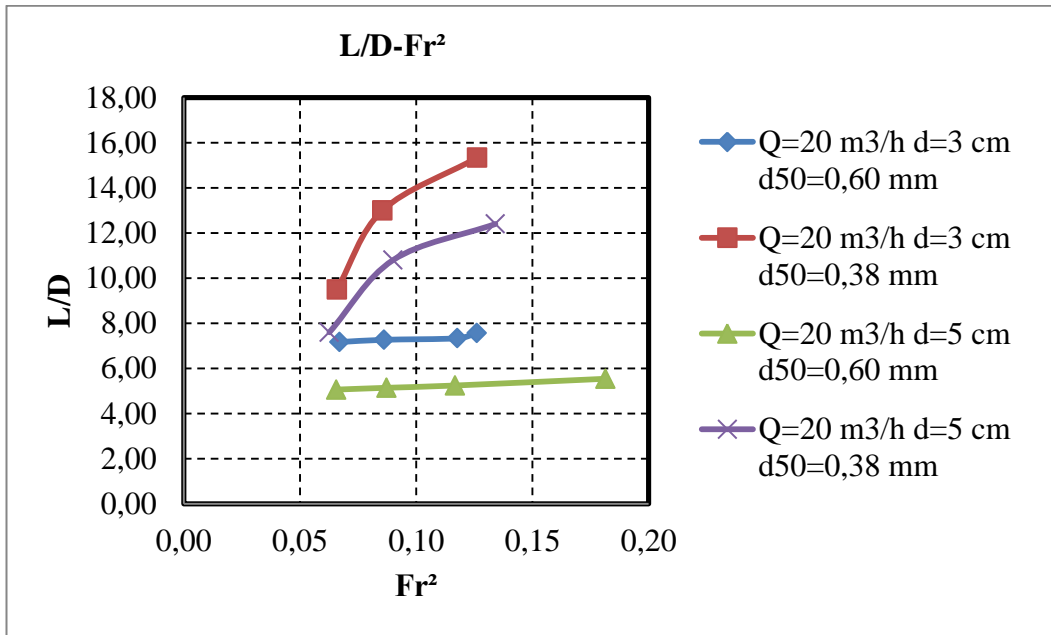
Rölatif Oyulma Çukuru Genişliğinin (L/D) Froude Sayısının Karesi (Fr^2) İle Değişimini İfade Eden Grafikler

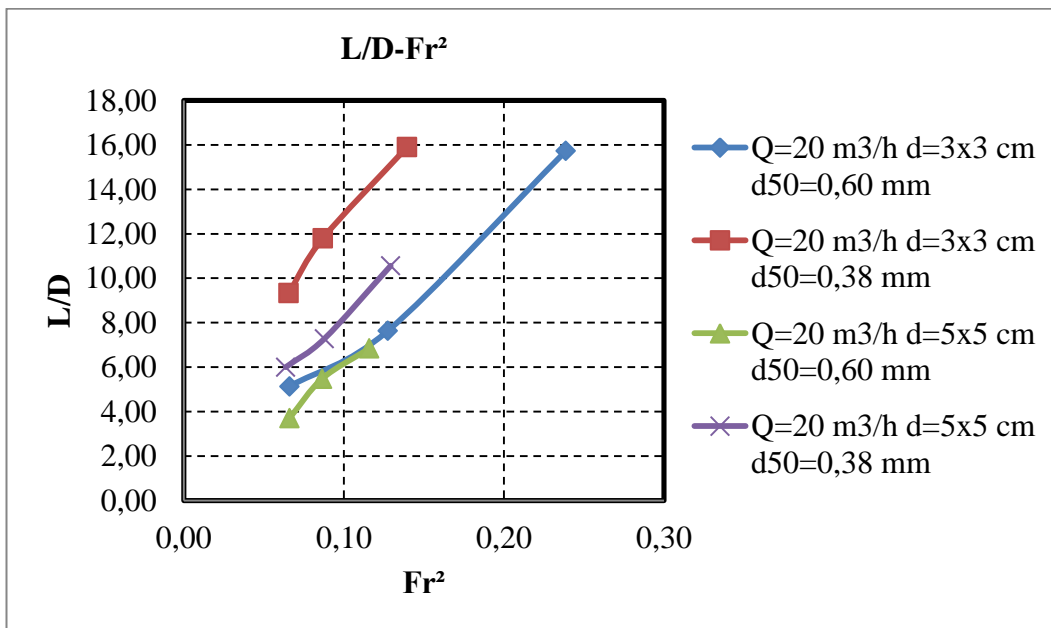
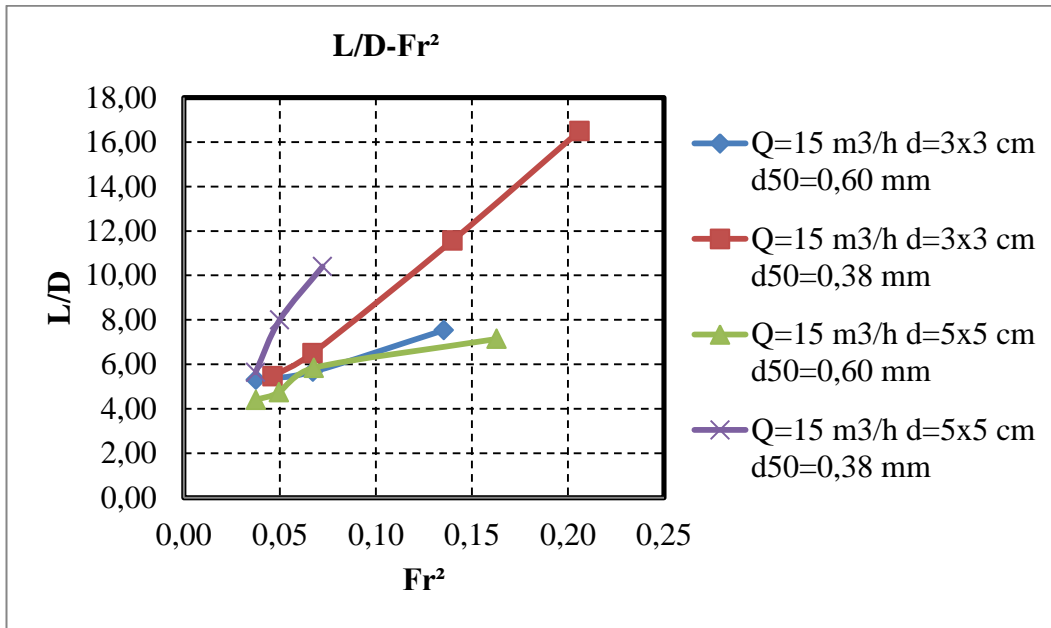




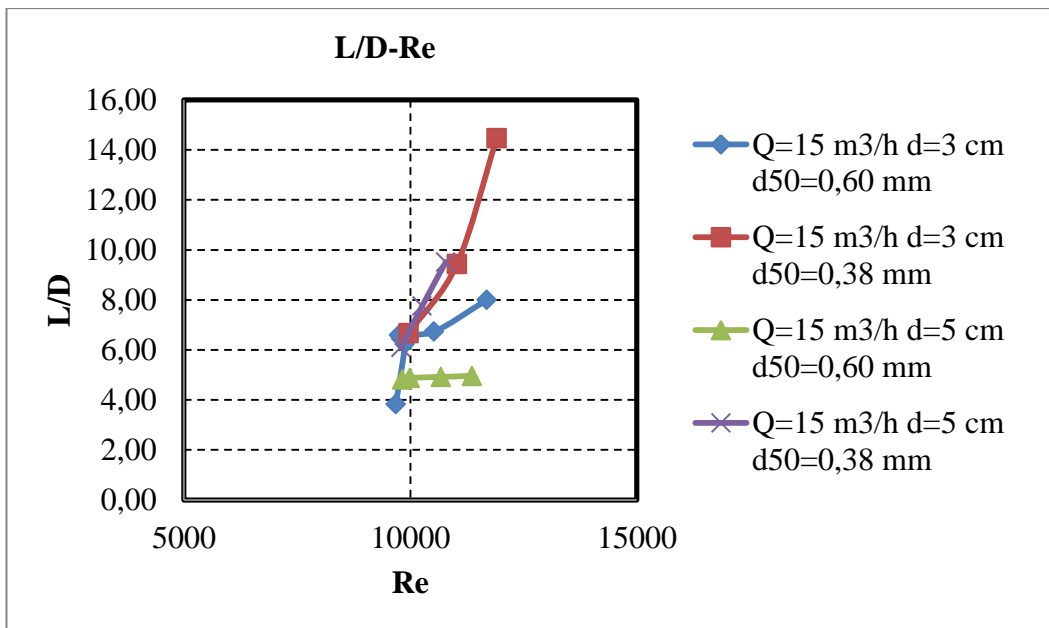
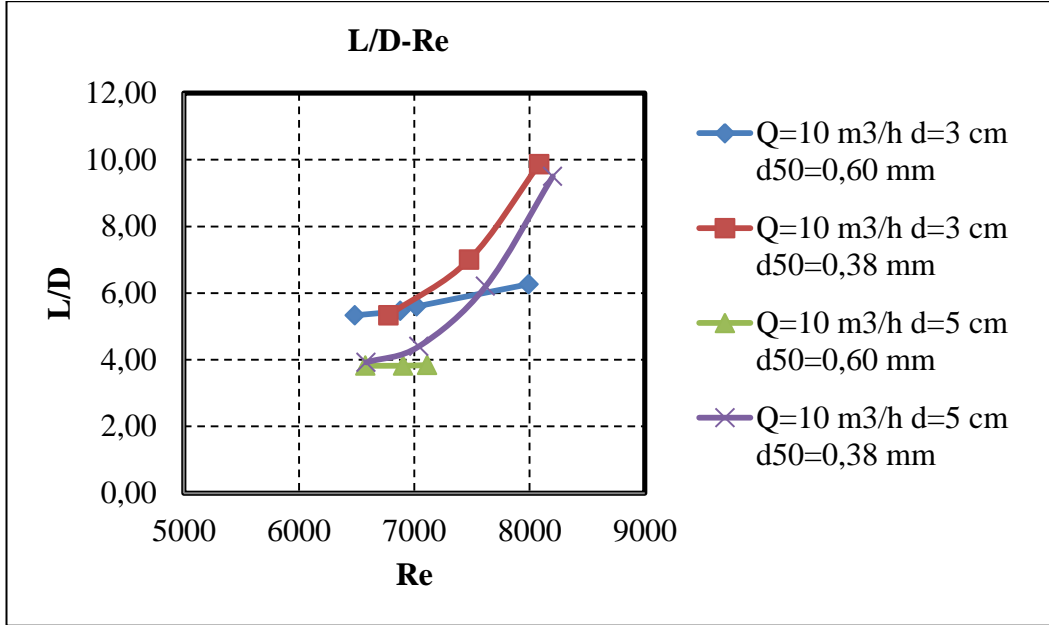


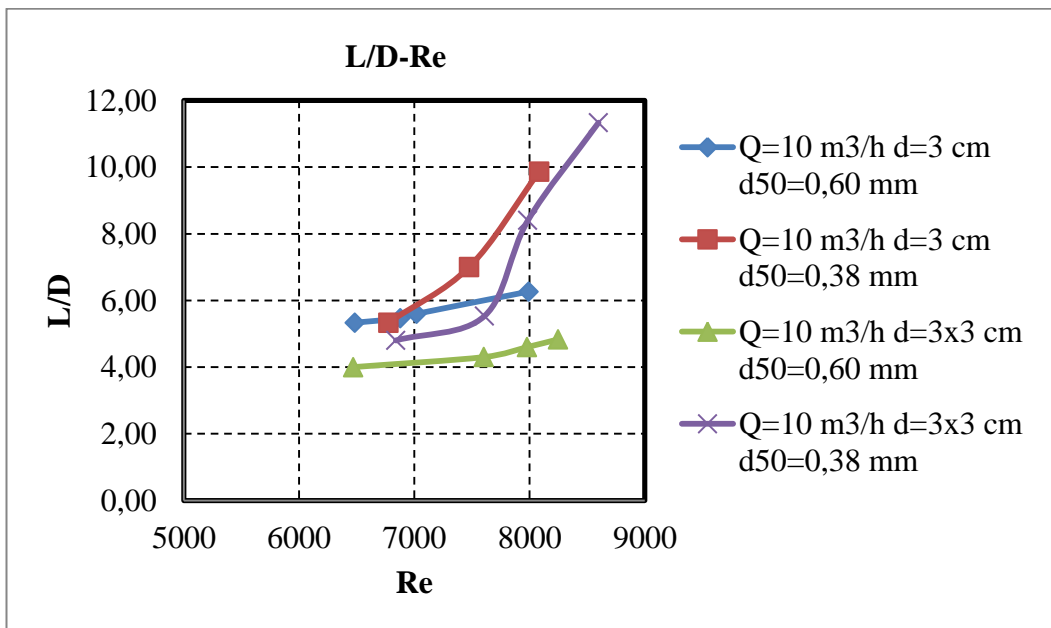
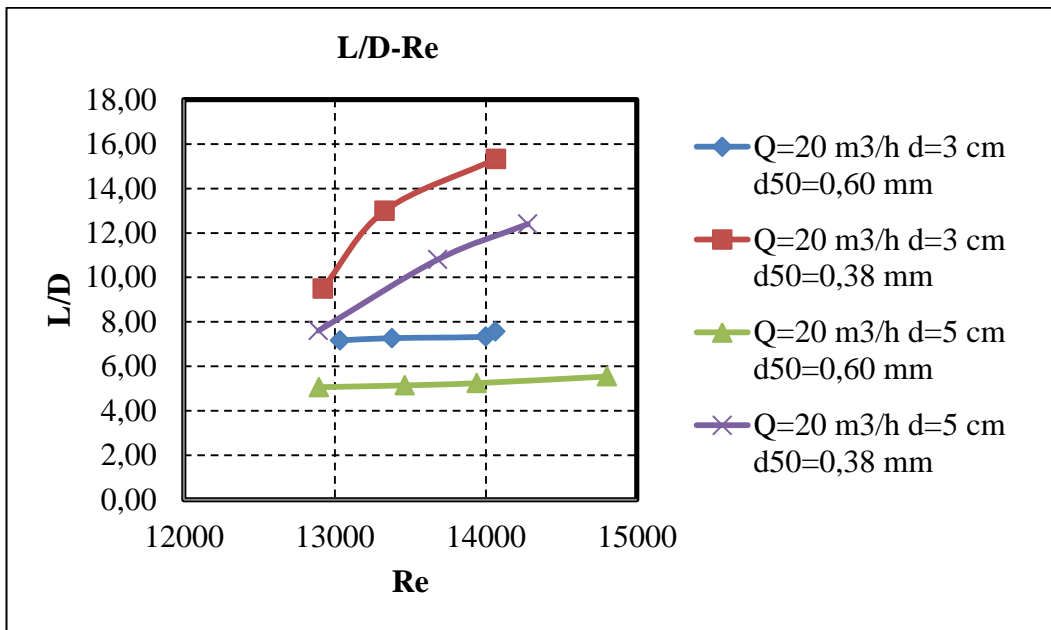


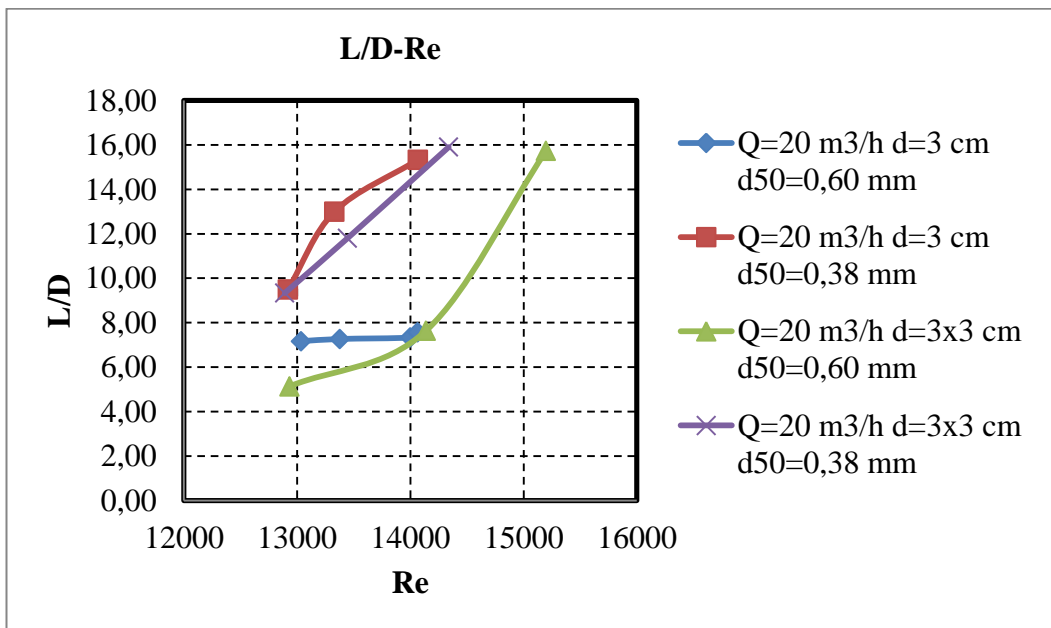
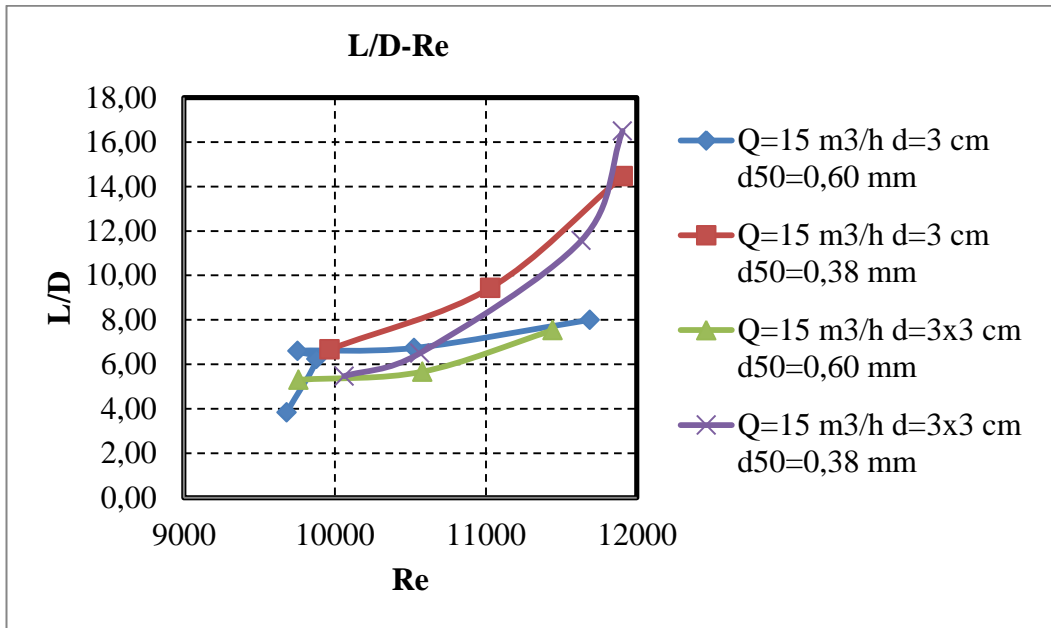


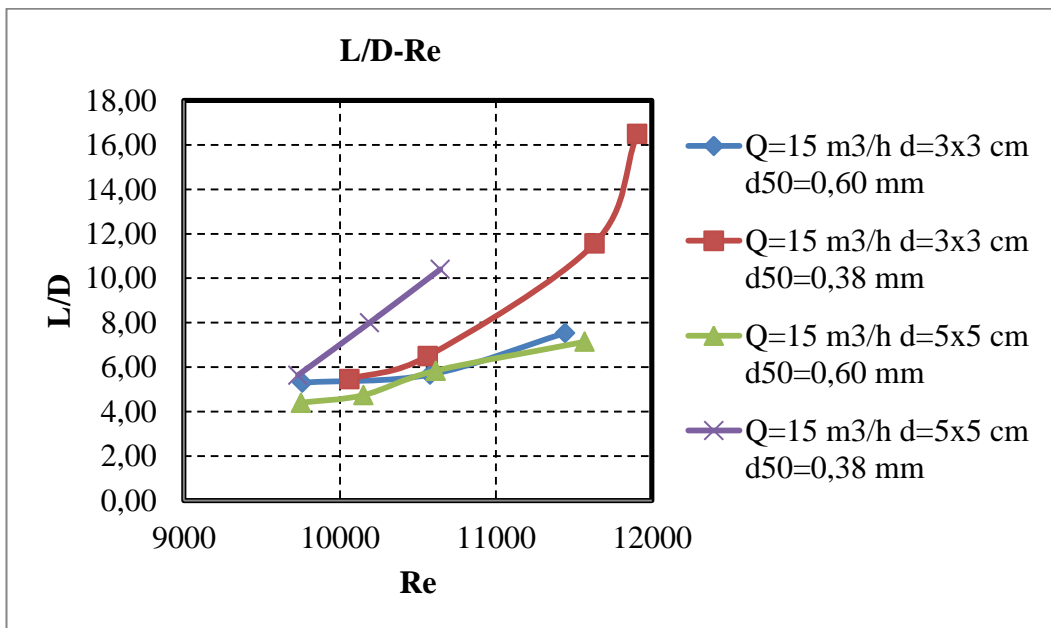
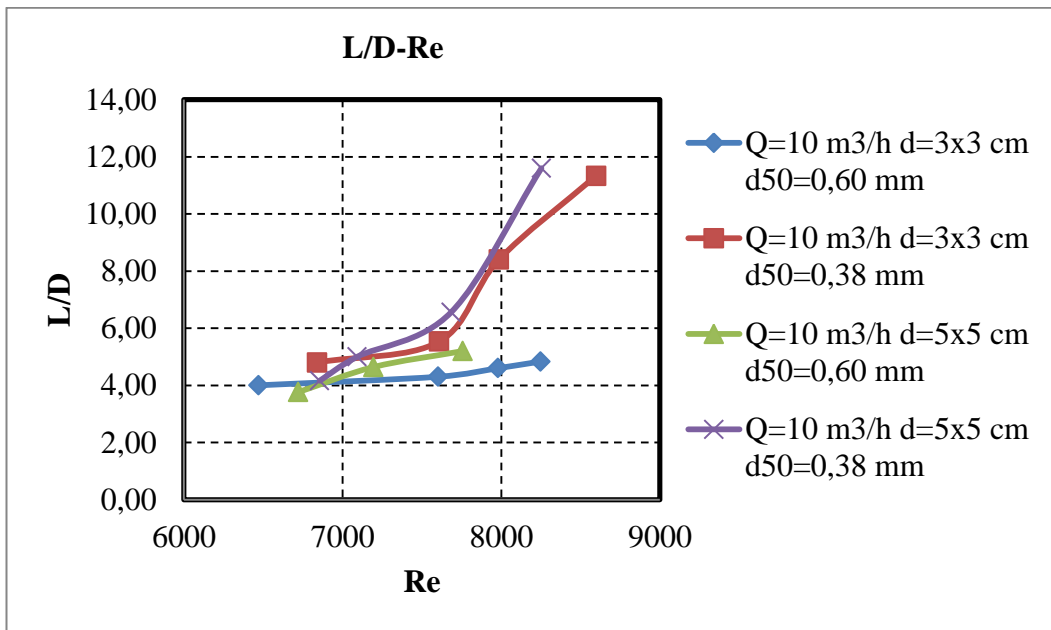


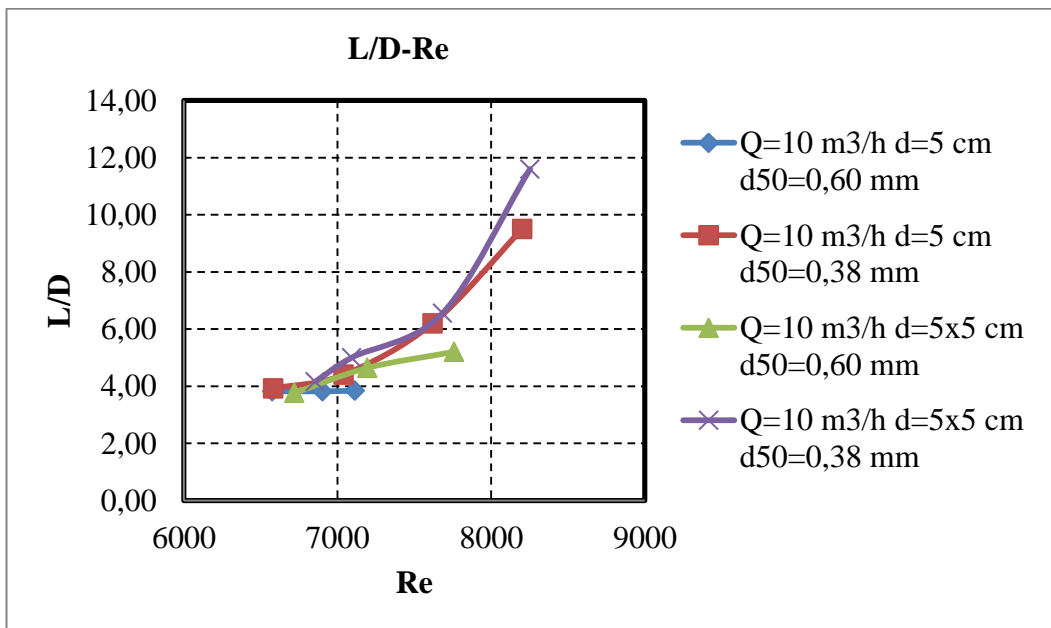
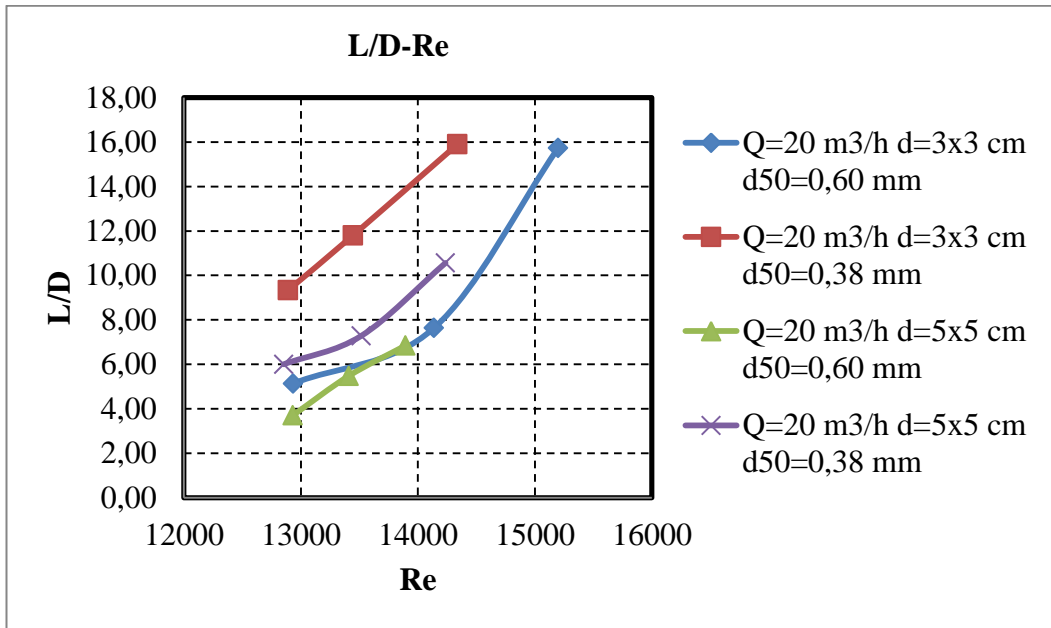
Rölatif Oyulma Çukuru Genişliğinin (L/D) Reynolds Sayısı (Re) İle Değişimini İfade Eden Grafikler

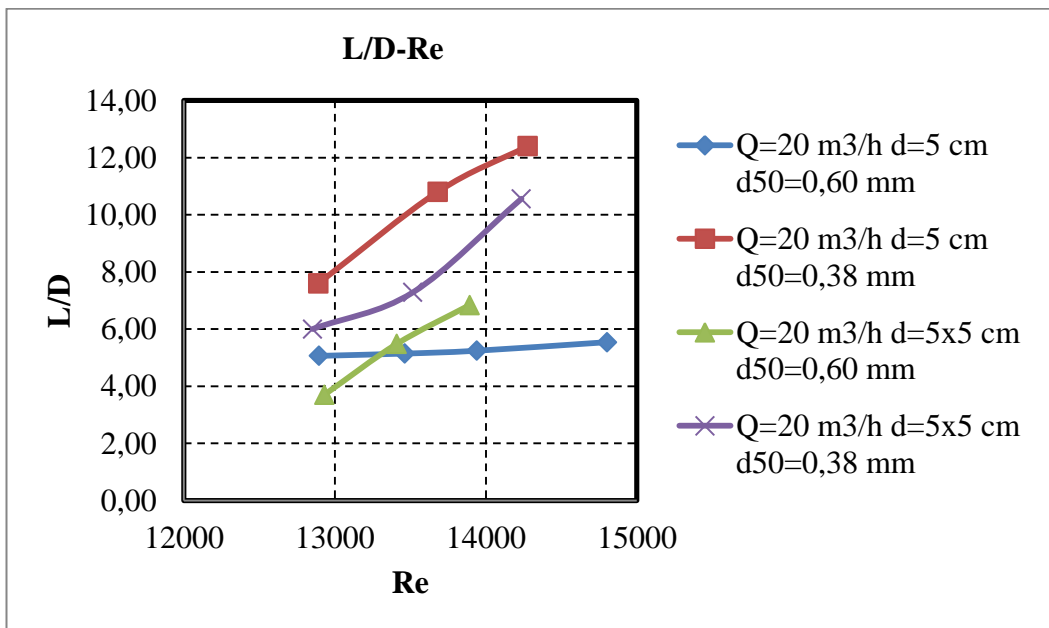
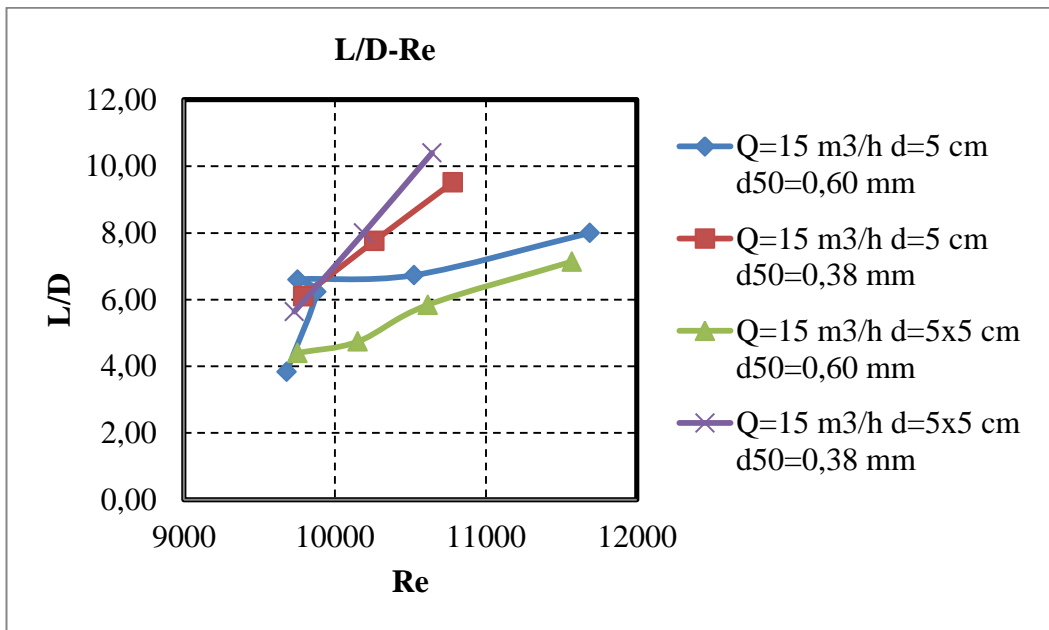












ÖZGEÇMİŞ

16.08.1984 yılında Ankara’da doğan Özer TEKEŞ, ilk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla İstiklal İlkokulu, Namık Kemal Ortaokulu ve Kırıkkale Lisesi’nde tamamlamıştır. 2002 yılında kazandığı Niğde Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2008 yılında tamamlamıştır. 2009 yılında Samsun ili Vezirköprü ilçesinde kısa dönem jandarma er olarak askerlik görevini tamamlamıştır. 2 yıl süreyle konut ve yol şantiyelerinde saha mühendisliği ve şantiye şefliği görevlerini üstlenmiştir. 2012 yılı itibariyle Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Uzman kadrosunda görev yapmaktadır.

İletişim Bilgileri

İş Adresi : Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Merkez/YOZGAT 66100

İş Telefonu : +90 (354) 242 1001-2118

E-Posta : ozer.tekes@bozok.edu.tr