T.C. YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DENİZALTI BORU HATLARI ALTINDAKİ YEREL OYULMANIN DÜZENSİZ DALGA ETKİSİNDE MODELLENMESİ

BURAK KIZILÖZ

DOKTORA TEZİ İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI KIYI ve LİMAN MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMAN PROF. DR. ESİN ÖZKAN ÇEVİK

T.C. YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜZENSİZ DALGA ETKİSİNDE DENİZALTI BORU HATLARI ALTINDAKİ YEREL OYULMA

Burak KIZILÖZ tarafından hazırlanan tez çalışması .../.../2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaatMühendisliği Anabilim Dalı Kıyı ve Liman Mühendisliği Programında **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Esin ÖZKAN ÇEVİK Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Esin ÖZKAN ÇEVİK Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sedat KABDAŞLI İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın başından sonuna kadar ilgi ve desteğini esirgemeyerek bu çalışmanın tamamlanmasında göstermiş olduğu katkılardan dolayı çok değerli danışmanım sayın Prof. Dr. Esin ÖZKAN ÇEVİK'e en derin saygılarımı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesinde bana her türlü bilimsel desteği vererek tezime katkıda bulunan sayın hocalarım Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL ve Prof. Dr. Sedat KABDAŞLI'YA teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunmamda bulunan sayın hocalarım Prof. Dr. Beyhan YEĞEN, Doç. Dr. Yeşim ÇELİKOĞLU ve Doç. Dr. OSMAN BÖREKÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Hidrolik ve Kıyı Liman Anabilimdalında her türlü desteklerini esirgemeyen hocalarıma ve özellikle Yrd. Doç. Dr. Burak AYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Labaratuvar çalışmasındaki yardımlarından dolayı teknisyen Gazi KURT'a teşekkür ederim.

Manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, varlıkları ile bana güç ve kuvvet katan sevgili aileme teşekkür ederim.

Mart, 2013

Burak KIZILÖZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxiii
ABSTRACT	XXV
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
 1.1 Literatür Özeti 1.2 Tezin Amacı 1.3 Hipotez 	
BÖLÜM 2	
BORU HATLARI ÇEVRESİNDE AKIM ALANI VE TABAN HAREKE	Tİ3
 2.1 Silindirik Yapılar Etrafında Akım Alanı 2.1.1 Kararlı Akım Durumu (Tek Yönlü) 2.1.2 Kararsız Akım Durumu 	
BÖLÜM 3	
OYULMA MEKANİZMASI	77
 3.1 Oyulmanın Başlangıcı 3.1.1 Oyulma başlangıcının mekanizması 3.1.2 Tünel Erozyonu 3.1.3 Art-iz Erozyonu 3.2 İki Boyutlu Oyulma 3.2 1 Kararlı akım (Akıntı) etkişinde oyulma derinliği 	
 3.2.1 Ratari akin (Akini) etkisinde oyulma derinliği	
3.2.4 Sığlaşma koşullarında oyulma derinliği	

3.2.4.1 Sığlaşmanın akım alanı üzerine etkileri	96
3.2.5 Zaman ölçeği	118
3.2.6 Oyulma çukurunun genişliği	127
3.2.7 Oyulma derinliğinin diğer etkileri	128
3.2.7.1 Boru pürüzlüğünün etkisi	129
3.2.7.2 Boru konumunun etkisi	129
3.2.7.3 Titreşim etkisi	130
3.2.7.4 Atak açısının etkisi	130
3.2.7.5 Çoklu boru hatlarının etkisi	131
3.2.7.6 Zırhlanma etkisi	131
3.2.7.7 Koheziv katı madde etkisi	131
3.2.7.8 Su derinliğinin etkisi	132
3.3 Üç boyutlu oyulma	132
3.4 Sayısal yöntem ile oyulmanın modellenmesi	136
3.5 YSA yöntemi ile oyulmanın modellenmesi	136
BOLUM 4	
DENEY SİSTEMİ	137
1.1 Donou sistemi	128
4.1 Delicy Sisteriii	130
4.1.1 Dalga Kallall	120
4.1.2 Kulli tabali üzellikleli	140
4.1.5 Kiyi pioini oiçunu	140
4.1.4 Deneylerde avulme derinliži äleümleri	141
4.1.5 Deneylerde byllanden älgäns derinlikteri	142
4.1.6 Deneylerde kultantian ölçüm derinlikteri	143
4.2 Dalga Orelimi	145
4.2.1 wave yazılımı	144
4.2.2 Ocean yazılımı	144
4.2.5 Duzenii dalga uretimi	144
4.2.4 Duzensiz daiga uretimi	144
4.2.4.1 Neumann Spektrumu	151
4.2.4.2 Pierson-Moskowitz Spektrumu (P-M)	151
4.2.4.3 JONSWAP Spektrumu	152
4.2.4.4 Scott Spektrumu	152
4.2.4.5 Bretschneider Spektrumu	153
4.3 Dalga Olçumleri	155
4.4 Boyut Analizi (Çevik [104])	157
BÖLÜM 5	
	1.00
DENEYSEL ÇALIŞMALAKIN DEGEKLENDIKILMESI	162
5.1 Sığlaşmanın Akım Alanı Üzerine Etkisi	163
5.2 Kıyı Profillerinin Belirlenmesi	167
5.3 Düzlem Taban Halinde Yerel Oyulma Derinliğinin İncelenmesi	170
5.3.1 Boyutlu parametrelerle oyulma derinliğinin incelenmesi	171
5.3.1.1 Boru çapı etkisinin incelenmesi	171
5.3.1.2 Dalga yüksekliği etkisinin incelenmesi	172
5.3.1.3 Dalga periyodu etkisinin incelenmesi	174
5.3.2 Boyutsuz parametrelerle rölatif oyulma derinliginin incelenmesi	176
5.3.2.1 Frekans parametresi etkisinin incelenmesi	176
*	

5.3.2.2 Dalga dikliği etkisinin incelenmesi	. 178
5.3.2.3 Derinlik parametresi etkisinin incelenmesi	. 178
5.3.2.4 Ursell sayısı etkisinin incelenmesi	. 179
5.3.2.5 Boru Ursell sayısının incelenmesi	. 180
5.4 1/10 Kıyı Eğiminde Yerel Oyulma Derinliğinin İncelenmesi	. 181
5.4.1 Boyutlu parametrelerle oyulma derinliğinin incelenmesi	. 181
5.4.1.1 Dalga yüksekliği etkisinin incelenmesi	. 182
5.4.2 Boyutsuz parametrelerle rölatif oyulma derinliğinin incelenmesi.	. 183
5.4.2.1 Frekans parametresinin incelenmesi	. 183
5.4.2.2 Dalga dikliğinin incelenmesi	. 184
5.4.2.3 Derinlik parametresinin incelenmesi	. 185
5.4.2.4 Ursell parametresinin incelenmesi	. 186
5.4.2.5 Boru Ursell parametresinin incelenmesi	. 188
5.5 Düzlem Taban ile 1/10 Şevin birlikte değerlendirilmesi	. 190
5.5.1 Boru Ursell parametresinin incelenmesi	. 190
5.6 Düzensiz ve Düzenli dalgaların birlikte incelenmesi	. 194
5.6.1 Dalga yüksekliği	. 195
5.6.2 Dalga periyodu	. 196
5.6.3 Boru Ursell sayısı	. 198
5.7 Beta Ursell parametresi (U _{R6})	. 206
5.7.1 Düzensiz dalga etkisinde Beta Ursell savısının incelenmesi	206
5.7.2 Düzenli dalga etkisinde Beta Ursell savısının incelenmesi	. 209
5.7.3 Düzensiz ve Düzenli dalgaların birlikte Beta Ursell savılarının	
incelenmesi	. 210
BOLUM 6	
YAPAY SİNİR AĞLARI	. 215
6.1 Vanay Sinir Ağlarının Ganal Özəllikləri	217
6.2 Vapay Sinir Ağlarının Ayantaiları	217
6.3 Vapay Sinir Ağlarının Dezayantaiları	210
6.4 Vapay Sinir Ağlarının Topolojisi	21)
6.5 Vapay Sinir Ağlarının Topolojisi	220
6.5.1 Girdiler	221
$6.5.2$ A $\check{\alpha}$ urbly lor	221
6.5.2 Agiilikidi	221
6.5.4 Aktivasyon (Transfer) Fonksiyonu	221
6.5.4.1 Besomak (Step Threshold) aktivesyon fonksiyonu	221
6.5.4.2 Sigmoid Aktivesyon Eenksivonu	, <u>222</u> 222
6.5.4.2 Dampa aktivasyon fonksiyonu	. 222
6.5.4.4 Dožrusel (İdantity) Aktiyasyon Fanksiyonu	. 223
6.5.4.5 Sabit (Constant) Aktivasyon Fonksiyonu	, 223 223
6546 Gauss Aktivasyon Fonksiyonu	223
6.5.4.7 Hiperbolik Aktivasyon Fonksiyonu	, 223 224
6.6 Takli Doğrusol Algulovici	, 224 224
6.7 XOR Problemi	. ムム4 つつち
6.8 Cak Tabakalı Vanay Sinir Ağları	, 223 225
6.0 Ağ tipləri	- 223 227
6.9.1 İleri Hesanlamalar (İleri hesleme)	· ムム / つつフ
6.9.2 Geri Hesanlamalar (Geri hesleme)	221
0.7.2 Our mesapiannana (Our bestenne)	[

BÖLÜM 7

OYULN	MAN	IN YAPAY SİNİR AĞALARI İLE MODELENMESİ	228
,	7.1	Düzenli Dalga Modelleri	230
,	7.2	Düzensiz Dalga Modelleri	235
,	7.3	Düzenli ve Düzensiz Dalga Modelleri	240
	7.4	Yapay Sinir Ağları ile Kurulan Modellerin Genel Değerlendirilmesi	245
BÖLÜM	8		
SONUÇ	ÇVE	ÖNERİLER	247
KAYN	AKL	AR	252
ÖZGEC	CMİS		265

SIMGE LISTESI

- A Hızın maksimum olduğu nokta
- a Hareketin genliği
- B Gömülme derinliği
- C_p Basınç katsayısı
- C_{pt} Taban basınç katsayısı
- C_L Kaldırma katsayısı
- d su derinliği
- D Silindir çapı
- d₅₀ Katı tanenin karakteristik bir boyutu
- d_b Kırılma derinliği
- D_p Kazık çapı
- e/D Açıklık oranı
- e Cidar ile silindir arasındaki açıklık
- f_v Vorteks saçılım frekansı
- f_L Kaldırma kuvveti frekansı
- F_L Kaldırma kuvveti
- f_w Salınımlı akım frekansı
- f Coriolis parametresi
- f_p Spektrumun pik frekansı
- f Frekans
- f_e Dalga genliğinden hesaplanan frekans
- g Yerçekim ivmesi
- G Girdap bölgesi boyu
- h₀ Deniz tarafi su derinliği
- H_b Kırılma noktasındaki dalga yüksekliği
- H_s Belirgin dalga yüksekliği
- H_{s0} Derin su belirgin dalga yüksekliği
- H₀ Derin su dalga yüksekliği
- H Boyutuz dalga yüksekliği
- H Dalga yüksekliği
- H_{1/10} Dalga kaydındaki dalga yüksekliklerinin en yüksek 1/10'nun ortalaması
- H_{1/10.0} Derin su dalga yüksekliklerinin en yüksek 1/10'nun ortalaması
- H_{max} Maksimum dalga yüksekliği
- H_{m0} Spektral belirgin dalga yüksekliği
- H_{rms} Dalga yüksekliklerinin karelerinin ortalamasının karekökü
- H_{rms0} Derin su dalga yüksekliklerinin karelerinin ortalamasının karekökü
- H_{xo} Farklı dalga yükseklikleri ile ifade edilebilen derin su dalga yükseklikleri

H _x	Farklı karakteristik dalga yükseklikleri
Iu	Türbülans şiddeti
ks	Nikuradse kum pürüzlüğü
KC	Keulegan-Carpenter sayısı (U _m T/D)
K1	Kazık burun şekli için düzeltme katsayısı
K_2	Akımın geliş açısı için düzeltme katsayısı
K ₃	Taban durumu için düzeltme katsayısı
K_4	Taban malzemesinin boyutu için düzeltme katsayı
L_{v}	Vorteks sokağı uzunluğu
L _{sm}	H _s ve T _m kullanılarak elde edilen dalga boyu
$L_{1/10m}$	$H_{1/10}$ ve T_m kullanılarak elde edilen dalga boyu
L _{rms,m}	H _{rms} ve T _m kullanılarak elde edilen dalga boyu
L _{sp}	H _s ve T _p kullanılarak elde edilen dalga boyu
L _{1/10p}	H _{1/10} ve T _p kullanılarak elde edilen dalga boyu
L _{rms,p}	H _{rms} ve T _p kullanılarak elde edilen dalga boyu
L _x	Farklı karakteristik dalga parametreleri ile elde edilen dalga boyu
ΔL	Akımın bir yarım periyodunda art-iz bölgesinin etkilediği alan
L ₀	Derin su dalga boyu
L _m	Ortalama dalga periyoduna bağlı dalga boyu
Lp	Pik dalga periyoduna bağlı dalga boyu
m	Taban eğimi
m_0	Serbest yüzey değişiminin varyansı
N_L	Normalleştirilmiş ana kaldırma frekansı
n	Porozite
0	Oran
Р	Sızma kuvveti
p	basınç
p(H)	Olasilik yoğunluk fonksiyonu
r	Aşılma olasılığı
Re	Reynolds sayisi
Re _D	Silindir çapına bağlı Reynolds sayısı
R	Korelasyon katsayısı
K _ü	Dalga uretecinin frekansi
S Ct	Kayma dikliginin ortalama degeri
St	Strounal sayisi
S/D	Koaltii oyulma derinligi Varal ayulma darinliži
5	Pere oyulma derinligi
30 S	Vererlı akım etkişinde denge ayalma derinliği
SC S	Dalga anarii yačunluk gnaktrumu
Տ _f Տ	Öleek
S _ö t	Zaman
ι Τ*	Vorteks sacılım periyodu
	Salınımlı akımın periyodu
	Dalga periyodu
T	Pik dalga periyodu
T _p	Derin su nik dalga periyodu
	Normallestirilmis zaman ölceði
T _*	Boyutsuz zaman ölceği
* "	20 Januar 2011an 019051

T _m	Ortalama dalga periyodu
T_{m0}	Derin su ortalama dalga periyodu
Ts	Belirgin dalga periyodu
T _{maks}	Dalga kaydındaki en büyük dalga periyodu
T_E	Ortalama enerji periyodu
$T_{m-1.0}$	Ortalama enerji periyodu
T-10	Ortalama energi periyodu
Tx	Karakteristik dalga perivotları
U	Akım hızı
u	Ortalama hız
$\overline{u'}$	Çalkantı hızının ortalaması
u_0	Serbest akım hızı
Um	Tabandaki su partiküllerinin rahatsız edilmemiş yörüngesel maksimum hızı
U_{w}	Dalga hızı
U*	Taban kayma hızı
U_R	Ursell savisi
U _{RP}	Boru Ursell Sayısı
U _{RP1/n}	Modifive Ursell Savısı
U_{a}	Gelgit elipsinin büyük capı
U _b	Gelgit elipsinin kücük capı
U_0	Rahatsız edilmemiş akım hızı
Uc	Akıntı hızı
UL	Boyuna hızlar
V_h	Oyulma ilerleme hızı
W	Tanelerin batık ağırlığı
\mathbf{W}_1	Memba oyulma çukuru genişliği
W_2	Mansap oyulam çukuru genişliği
\mathbf{W}_{t}	Enine hızlar
Y _d	Düşey derinlik
ν	Kinematik viskozite
δ	Sınır tabakası kalınlığı
θ_{a}	Sınır tabakası ayrılma açısı
α	Vorteks ayrılma açısı
αs	Atal acisi
Γ/ν	Boyutsuz sirkülasyon
Γ^*	Horseshoe vorteksinin yatay kesiti
Γ	Horseshoe vorteksinin düsev kesitleri
ω	Hareketin acısal frekansı
φι	Kaldırma kuyyetinin güç spektrumu
σ^2	Kaldırma kuyyetinin yaryansı
с С	Tahan malzemesinin geometrik standart sanması
Og G	Sakil parametraci
O _s	Spektral ganislik parametrogi
ъ v	
л V	Doru çovre uzulluğu Vətəv məsəfə
$\Lambda_{\rm m}$	i alay mesale Tananin özgül ağırlığı
γs	ranonni uzgur agiringi Suurun özgül ağırlığı
ү Эт /Эт	Degine gradvani dožicimi
<i>op/ox</i>	Dasniç grauyanı üçgişinn

- τ Taban kayma gerilmesi
- θ Shields parametresi
- ρ_s Katı maddenin özgül kütlesi
- ρ Akışkanın özgül kütlesi
- q Sürüntü katı madde yükü
- Q_s Birim zamanda yerel oyulma hacminde meydana gelen değişiklik
- q_s Oyulma çukurunda taşınan katı madde debisi
- q_{s0} Rahatsız edilmemiş akımın oyulma çukuruna taşıdığı katı madde debisi
- qt Birim genişlikten geçen toplam katı madde debisi
- ξ Surf parametresi
- β Frekans parametresi
- β_s Oyulma derinliğinin ortalama eğimi
- $U_{R\beta}$ Beta Ursell parametresi
- к Şekil parametresi
- σ Gelgit hareketinin açısal frekansı
- $\overline{\lambda}$ Dalga boyu
- η Serbest yüzey değişimi

KISALTMA LİSTESİ

- ANNs Artificial Neural Networks
- Cdf Kümülatif dağılım fonksiyonu
- FIS Fuzzy Inference Systems
- Genetik Programlama GP
- Laser Dopler hız ölçümü tekniği Pierson-Moskowitz Spektrumu LDV
- PM
- Parçacık görüntülümeli hız ölçüm tekniği PIV
- Saçılım indeksi SI
- Yapay Sinir Ağları YSA

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Bir silindir etrafında sınır tabakasından ayrılma (Yüksel [3])4
Şekil 2.2	Şekil 2.2 Karalı akım durumunda cilalı, dairesel bir silindir etrafındaki akım rejimi (Sümer [7])
Sekil 2 3	Vortesklerin olusumu (Sümer [7])
Şekil 2.3	Farklı Reynolds sayılarında silindir etrafındaki akım (Hudges ve Brighton
Şunn 2. i	[10])
Şekil 2.5	Pürüzsüz bir silindir için Strouhal sayısının Re sayısı ile değişimi (Sümer [7])
Sekil 2.6	Değisik rejimlerde avrılma noktalarının gösterilisi (Sümer [7])
, Sekil 2.7	Kaldırma salınımlarının güç spektrumu (Schewe [9])
Şekil 2.8	Dairesel silindirlerde pürüzlülüğün değişik değerleri için St sayısının Re sayısına göre değisimi (Achenbach ve Heinecke [12])
Sekil 2.9	Vorteks sacılım frekansı üzerinde sekil kesitinin etkisi
Şekil 2.10	Farklı türbülans değerleri için St sayısının değişimi (Cheung ve Melbourne [13])
Sekil 2.11	Yaklasan akımda kayma etkisi (Griffin, [16], [17])
Şekil 2.12	Hücreli yapıların uzunluğu boyunca vorteks saçılımının zamanla değişimi (Sümer [7])
Şekil 2.13	Yaklaşan akım içindeki kaymanın vorteks saçılımı üzerindeki etkisi (Maull ve Young [19])
Şekil 2.14	Kayma dikliğinin üç farklı değeri için Re sayısına karşın St sayısının değisimi (Kiya vd. [18])
Sekil 2.15	Ayrılma noktası etrafında akım alanı (Sümer [7])
Şekil 2.16	Boşluk oranı e/D'nin bir fonksiyonu olarak cidar yakınında bir silindir üzerindeki basınç dağılımları (Bearman ve Zdravkovich [20])
Şekil 2.17	Boşluk oranının fonksiyonu olarak ayrılma açısı (Jensen ve Sumer [21]) 18
Şekil 2.18	Art-iz bölgesinde sıcak tel sinyallerinden alınan güç spektrumu (Bearman ve Zdravkovich [20])
Şekil 2.19	Cidara yakın yerleştirilmiş silindirin art-iz bölgesinin e/D'ye bağlı olarak değisimleri (Grass vd. [22])
Şekil 2.20	Vorteks saçılımı üzerinde cidar yakınlığının etkisi. e/D' nin fonksiyonu olarak St sayısının normalleştirilmiş değerleri. (Daireler; Raven vd. [23], Eğri; Grass vd. [22])
Şekil 2.21	Yaklaşık durgunluk noktası, S, konumunda ortalama hız vektörleri (Jensen vd. [25])
Şekil 2.22	Boru hattı altında oyulma süresince Strouhal sayısının zamanla gelişimi (Jensen vd. [25])

Şekil 2.23	Silindirin çevresi ve cidar boyunca basınç dağılımı, a) $e/D = 0$, b) $e/D = 0.1$
	(Bearman ve Zdravkovich [20])
Şekil 2.24	Silindir çevresi ve cidar boyunca basınç dağılımı, a) $e/D = 0.4$; b) $e/D = 0.8$, (Bearman ve Zdravkovich [20])
Sabil 2 25	(Dearman ve Zaravkovici [20])
ŞCKII 2.23	(Bearman ve Zdravkovich [20])
Şekil 2.26	Cidar üzerindeki minimum basınç katsayısı, o, C _{pmin} ; x, C _{pmin} 'un yeri
~	(Bearman ve Zdravkovich [20])
Şek1l 2.27	Kararlı akım durumunda ıkı farklı Re sayısı için side-view streak
	fotoğrafları. Akım sağdan sola doğrudur. Deney parametreleri $D = 3$ cm, a)
	$U = 5 \text{ cm s}^{-1}$, $Re = 1500 \text{ (dny 5)}$, b) 15, 4500 (dny 11). Beyaz kesikli çızgı
	vorteks ayrılma açısını ($\alpha = 0.49$ rad) göstermektedir (Testik vd. [33])29
Şekil 2.28	Kararlı akımda Re sayısının α 'ya bağlı değişimi. Olçüm hataları çubuk
	hataları ile gösterilmektedir (Testik vd. [33])
Şekil 2.29	Kararlı akım durumunda iz fotoğrafinin üstten görünüşü ve akım çizgileri.
	Akım yönü soldan sağa doğrudur. Ayrıca silindirin art-iz bölgesinin
	yakınında birbirlerine ters yönde dönen iki vorteks görülmektedir. Deneysel
	parametreleri; a) $U = 8 \text{ cm s}^{-1}$, $D = 3 \text{ cm}$, $Re = 2400 \text{ (dny 6) ve b) 5, 3, 1500}$
	(dny 5) (Testik vd. [33])
Şekil 2.30	Farklı Re sayılarında girdap bölgesine bitişik boyutsuz G/L uzunluğu.
a 1 1 a a 1	Kesikli çizgiler $G/L = 2/3$ değerini göstermektedir (Testik vd. [33])30
Şekil 2.31	Kararlı akım durumunda sılındır çevresinde üç farklı vorteks oluşumunun
G 1 1 0 00	üstten ve profilden görünümü (Testik vd. [33])
Şekil 2.32	Başlangıçta geniş atnalı vorteksi üzerinde boyun oluşum mekanizmasının
G -1-:1 0 22	açıklanması (Testik Vd. [33])
Şekii 2.55	Piv olçumleri profili a) Athali vorteksinin düşey en kesitini b) ve c) yüzük
	biçininde volteks yapısının yenden bağlanmasını göstermektedir. Aktin yönü soğdan sola doğrudur. $U=2$ om s^{-1} D=2 om Ba=600 va rasimlar
	yonu saguan sola dogludul. $U-2 \text{ cm s}$, $D=3 \text{ cm}$, $Re=000 \text{ ve resinner}$
Salvil 2 24	Ataali vortaksinin vatav an kasitlarinda sal sütun DIV älaümlarindan alda
ŞEKII 2.54	dilan hız alanlarını sağ sütun isə vortisitiləri göstərməktədir. a) silindirdən
	uren niz diamanni sag sutur ise vortistinen göstermekteun, aj sinnunden uzağa saçılım b) kararlı akım durumudur. Akım yönü soldan sağa doğrudur.
	Düz cizgiler pozitif vortisitilerin cevre cizgilerini, kesikli cizgiler ise negatif
	vortisitilerin cevre cizgilerini belirtmektedir (Testik vd. [33])
Sekil 2 35	Sirkülasvon oranna karsılık Re sayısının değisimi (Testik vd. [33]) 34
Şekil 2.35 Sekil 2.36	Re sayısının bir fonksiyonu olarak boyutsuz sirkülasyon Keşikli cizgiler
Şenn 2.50	vaklasımı göstermektedir (Testik vd [33])
Sekil 2.37	Re sayısı ile St sayısının değisimi Keşikli cizgiler Re sayısının küçük
Şenn 2.5 (değerleri icin beklenilen St değerleri (Testik vd [33])
Sekil 2 38	Hareketin genliği
Sekil 2.39	Pürüzsüz dairesel bir silindir etrafında salınımlı akım etkisindeki akım
· · · · · ·	rejimleri (Sümer ve Fredsøe [51])
Sekil 2.40	Mantar seklinde vorteks formunda avrılma (Honii [48])
Şekil 2.41	Mantar seklinde vorteks avrilmasi (Honii [48])
Sekil 2.42	$1.6 < \text{KC} < 4$ akım rejiminde (Re = 10^3) kamera ile görüntülenen vorteks
, <u>-</u>	hareketlerinin gelişimi (Williamson [47])
Şekil 2.43	Silindirden bir çift simetrik vorteks taşınımı (Williamson [47])
Şekil 2.44	KC=12 için art-iz bölgesinde akıma dik vorteks sokağı oluşumu
-	(Williamson [47])

Şekil 2.45	15 <kc<24 n+m="" p+q="" silindirden="" taşınımı<="" th="" ve="" vorteks="" çiftlerinin=""></kc<24>
a 1 1 a 1 a	(Williamson [47])
Şekil 2.46	24 <kc<32 n+r="" p+q,="" s+t="" silindirden="" taşınımı<br="" ve="" vorteks="" çiftlerinin="">(Williamson [47]) 42</kc<32>
Sekil 2 47	KC=12 icin kaldırma kuvvetinin zaman ile değisimi (Williamson [47]) 43
Sekil 2.48	15 < KC < 24 aralığın da kaldırma kuyvetinin zaman ile değişimi (Williamson
Şekii 2.40	[47]
Sabil 2 10	[77]
Şekli 2.49 Səlail 2.50	$Re = 5 \times 10^5$ dečerinde $VC = 16$ jejn güe grektrumune benzer keldirme
Şekli 2.30	kuvvetinin zamanla doğisimi (Justasan [41])
Saleil 2 51	Kuvvetiinii Zainania degişiinii (Justesen [41])
ŞEKII 2.31	Sammin akini etkisinde KC-5 için puluzsuz danesel bil sinndi ettamidaki
	akim rejimieri (daireier (Sarpkaya [49]) çarpilar Re<1000 için (Honji [48])
G 1 1 2 52	Ve Re > 1000 icm (Sarpkaya [49]))40
Şekil 2.52	Salinimii akim durumunda puruzsuz dairesel bir silindir etrafindaki vorteks
	saçılım rejimleri (Çizgiler (Sarpkaya [36]) ve (Williamson [4/]), kareler
a 1.1 a sa	(Justesen [41]))
Şekil 2.53	KC=4 için a) $e/D=2$, b) $e/D=0.1$, c) $e/D=0$ farklı açık oranlarında vorteks
~	hareketleri (Sümer vd. [7])
Şek1l 2.54	KC = 4 ıçın kaldırma kuvveti değişimleri (Sümer vd. [7])49
Şekil 2.55	KC=10 için vorteks hareketlerinin değişik rejimleri a) $e/D=3.5$, b) $e/D=1$, c)
	e/D=0.1, d) e/D=0 (Sümer vd. [7])
Şekil 2.56	7 < KC < 15 aralığında vorteks hareketlerinin gelişimi, a) e/D=1, b) e/D= 0.1,
	c) e/D=0, (Sümer vd. [7])51
Şekil 2.57	7 <kc<15 (sümer="" [7])<="" aralığında="" izleri="" kaldırma="" kuvveti="" td="" vd.=""></kc<15>
Şekil 2.58	15 < KC < 24 aralığında vorteks hareketlerinin gelişimi a) e/D=1, b) e/D =
	0.1, c) e/D=0 (Sümer vd. [7])53
Şekil 2.59	15 < KC < 24 aralığında kaldırma kuvveti izleri (Sümer vd. [7])
Şekil 2.60	15 <kc<24 (sümer<="" 0.05≤kc≤="" 0.4="" aralıklarındaki="" izleri="" kaldırma="" kuvveti="" td="" ve=""></kc<24>
	vd. [7])55
Şekil 2.61	Vorteks saçılımının sönümlendirildiği bölgeyi gösteren diyagram. Açık
	semboller: Vorteks saçılımları bastırılıyor, dolu semboller: Vorteks
	saçılımları mevcut (Sümer vd. [7])55
Şekil 2.62	Açıklık oranına karşı Strouhal sayısı (St). 0, KC=20; △, KC=30; □, KC=55;
	∇, KC=65 (Sümer vd. [7])
Sekil 2.63	Açıklık oranının fonksiyonu olarak normalleştirilmiş Strouhal sayışı, O, KC
,	=20: \land KC=20: \Box KC=55: ∇ KC=65: x, kararlı akım (Raven vd.[55]):
	- kararlı akım (Grass vd. [22]) (Sümer vd. [7]) 57
Sekil 2 64	Salınımlı akımı cevrek bir periyodunda iz fotoğrafları a) akım sağdan sola
Şekli 2.04	doğru maksimum hızla hareket etmekte h) akım yayaslamakta c) akım
	vönü değişmeden önce akım durmakta görülmektedir. Oklar vortişleri işaret
	atmaktedir. Danay parametralari: D-2cm Ba-4500 KC-28 dir (Tastik yd
	[23]
Salvil 2 65	[JJ]
Şekli 2.03	Saminin yann penyod dulumunda vorusti (al.) ve mz (us.) golunumen $(T-1/f-5 \text{ s})$ Düz ve keşikli eizgiler pezitif ve peşetif vertişitileri
	(1-1/1-5 S). Duz ve kesikii çizgiler poziti ve negati voltisitien göstermektedir a) akım (selden sağa) azalmakta ve durmakta b) akım tara
	gostermekteun. a) akim (soluan saga) azalmakta ve durmakta, b) akim ters
	yonue nareket etneye vaşıamakta, c) akım solua maksimum niza ulaşmakta, d) alum azalmalıtadır. Görüntüler eregindelti zemen farlır. O (a dir. O -1-11)
	u) akim azamakiaun. Gorunturer arasindaki zaman farki 0.0 s dir. Şekil b
	deki niz dagiliminda kesikil çizgiler vorteks çift yapısını göstermektedir.
	Deney parametreleri: D=3 cm, Re=1560, KC=8.4 dür (Testik vd. [33]) 60

Şekil 2.66	Salınımlı akım etkisinde atnalı vorteksinin silindirin bir kenarından diğer
	kenarına süpürülmesinin şematik gösterimi. Akım sağdan sola doğru hareket
	ederken vorteks LF silindirin sol kenarından meydana gelmektedir. Akım
	yönünün değişmesiyle vorteks RI silindirin sağ kenarında oluşurken vorteks
	LF de (kesikli çizgi ve eğrisel yörünge hareketi) silindirin üzerinden
	süpürülmekte ve vorteks RI yakınında yeni konumunu, LF, almaktadır
	(Testik vd. [33])61
Şekil 2.67	Salınımlı akım etkisinde vortekslerin silindirin üzerinden süpürülmesi ve
	vorteks çifti oluşmasının şematik gösterimi (her bir parça 1/8 periyod). I,
	ilk, F, süpürülen, R, sağ, F, sol vorteksleri temsil etmektedir. Siyah oklar
	akım yönünü ve şiddetini göstermektedir. Siyah oklar (içi dolu) vorteks çift
	yapısını ve ilerleme yönlerini vermektedir (Testik vd. [33])
Şekil 2.68	Silindir çevresindeki açıklığın 20° lik radyallara bölünmüş dört çeyrek
	bölümü (Mouaze ve Belorgey [66])64
Şekil 2.69	D=4 cm, e/D=3.0 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])65
Şekil 2.70	D=4 cm, e/D=0.5 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])65
Şekil 2.71	D=4 cm, e/D=0.1için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])66
Şekil 2.72	D=4 cm, e/D~0 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])67
Şekil 2.73	D=4 cm, e/D~0 için silindir çevresindeki vorteks hareketleri (Mouaze ve
	Belorgey [66])
Şekil 2.74	D=10 cm, e/D=0.5 için silindir çevresindeki vorteks hareketleri (Mouaze ve
	Belorgey [66])
Şekil 2.75	D=10 cm, e/D=0.5 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])
Şekil 2.76	D=10 cm, e/D=0.1 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])69
Şekil 2.77	D=10 cm, e/D~0 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])
Şekil 2.78	KC sayısının bir fonksiyonu olarak enine ve boyuna hızlar arasındaki oran
	(Mouaze ve Belorgey [66])70
Şekil 2.79	Akım görünürlüğü ve ayrık vorteks metodu kullanılarak elde edilmiş
-	oyulma profilleri (Sümer ve Fredsøe [73])72
Şekil 2.80	Salınımlı akımın bir yarım periyodu esnasındaki akım rejimleri. t=9.4
	dakikadaki oyulma profili. Soldaki: ayrık vorteks modeli, ortadaki:
	deneylerden, sağdaki: bunlara karşılık gelen şemalar. Yatay oklar silindire
	göre akım yönünü göstermektedir (Jensen vd. [59])
Şekil 2.81	Salınımlı akımın bir yarım periyodu için oyulmanın erken ve denge
	safhasını göstermektedir. Yatay oklar akım yönünü silindire rölatif olarak
	göstermektedir (Jensen vd. [59])
Şekil 2.82	Serbest bir silindir için akıma dik vorteks sokağı 7 <kc<13 (jensen="" [59])<="" td="" vd.=""></kc<13>
,	74
Şekil 2.83	Salınımlı akımın yarım periyodu esnasındaki akım resimleri, t=0.65 dak. da
3	oyulma profili. Soldaki: Ayrık vorteks modeli. Sağdaki: Şemalar. Yatay
	oklar silindire göre akım yönünü göstermektedir. Ortadaki: Deneyler,
	KC=20 (Jensen vd. [59])
Sekil 2.84	Cidardan uzak bir silindir için yarım periyottaki akım resimleri. Yatay oklar
,	silindire göre akım vönünü gösterir (Jensen vd. [59])
Sekil 3.1	Ovulma baslangıcının sematik olarak izahı (Mao [78])
Şekil 3.2	Tabana yerleştirilmiş bir boru için basın dağılımı (Bearman ve Zdravkovich
,	[20])
Şekil 3.3	Borunun altında sızma akımı (Sümer ve Fredsøe [80])
Şekil 3.4	Borulanma (Sümer vd. [79])
,	х с 3/

Şekil 3.5	Dalga durumunda boru altında basınç gradyanının zaman serisi (Sümer vd. [79])
Şekil 3.6	Yaklasan akım seması (Sümer vd. [80])
Şekil 3.7	Boru altındaki tünel erozyonu (Sümer vd. [80])
Şekil 3.8	Akıntı durumunda oyulmanın zamanla değişimi. Noktalı çizgiler: Denge oyulma profili (Mao [74])
Sekil 3.9	Vorteks sacılımı nedeniyle katı madde tasınımı (Sümer vd. [82])
, Şekil 3.10	Kayma gerilmesinin zaman serileri a) Borusuz, b) Borulu. e/D=0.95,
,	x/D=1.6 (Sümer vd. [80])
Şekil 3.11	Boru yakınındaki hızın spektral dağılımı. $\theta = 0.05$. (Sümer vd. [82])
, Şekil 3.12	Art-iz etkisi (Sümer vd. [80])
Şekil 3.13	Akımın bir yarım periyoduna karşılık gelen art-iz'in akım yönündeki
,	gelişimi (Sümer ve Fredsøe [81])
Şekil 3.14	Kararlı akım durumunda denge oyulma derinliği için veriler. Hareketli taban
,	$(\theta > \theta_{kr})$ (Sümer ve Fredsøe [81])
Şekil 3.15	KC sayısının S/D ile değişimi (Yasa [95])91
Şekil 3.16	S/D'nin e/D ile değişimi (Yasa [95])
Şekil 3.17	Sadece dalga etkisinde denge oyulma derinliği. Hareketli taban ($\theta > \theta_{kr}$).
,	(Sümer ve Fredsøe [81])
Şekil 3.18	Dalga ve akıntı birleşiminde denge oyulma derinliği. Hareketli taban ($\theta > \theta_{kr}$)
,	(Sümer ve Fredsøe [103])
Şekil 3.19	Oyulmanın zaman göre değişimi (Çevik [104])96
Şekil 3.20	a) 1/5 ve b) 1/10 eğimli tabanda sığlaşma (Çevik [104])98
Şekil 3.21	s=1/10 için deneylerden elde edilen sığlaşma katsayılarının Cnoidal teori ile
	karşılaştırılması (Çevik [104])
Şekil 3.22	Rölatif kırılma yüksekliğinin derin su dalga dikliği ile değişimi (Çevik
	[104])
Şekil 3.23	Düzlem tabanda (d=35 cm) yörüngesel hızlar (Çevik [104])103
Şekil 3.24	Kıyı boyunca taban yakınında yörüngesel hızın değişimi (Çevik, [104]). 103
Şekil 3.25	a) 1/5 ve b) 1/10 kıyı şev eğimlerinde oluşan taban profilleri (Çevik [104]) 105
Şekil 3.26	Rölatif oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi (Çevik [104])106
Şekil 3.27	Sabit periyodda farklı dalga yükseklikleri dikkate alınarak S/D- β değişimi (Cevik [104])
Sekil 3 28	a) 1/5 ve b) 1/10 kıvı sev eğimlerinde rölatif oyulma derinliğinin derinlik
Şekii 5.20	narametresi ile değisimi (Cevik [104])
Sekil 3.29	Tüm dalga sartlarında ve boru caplarında normallestirilmiş oyulma
çenn 2.2	derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi (Cevik [104])
Sekil 3.30	a) $1/5$ ve b) $1/10$ kıvı sev eğiminde rölatif ovulma derinliğinin KC savısı ile
3	değisimi (Cevik [104])
Sekil 3.31	1/10 kıyı sev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile
,	değişimi (Çevik [104])110
Şekil 3.32	1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresi ile
	değişimi (Çevik [104])111
Şekil 3.33	1/5 ve $1/10$ kıyı şev eğimi için S/D'nin U _{RP} ile değişimi (Çevik ve Yüksel
	[114])
Şekil 3.34	Geçiş ve sığ su şartlarında S/D'nin URB ile değişimi (Çevik ve Yüksel [
	114])

Şekil 3.35	Sığlaşma durumunda oyulma derinliği ile U _{RPrms} değişimi (sol n=3, sa n=10) (Myraugh vd. [119])11	ığ 17
Şekil 3.36	O ile κ'nın değişimi (Myraugh vd. [119])11	17
Şekil 3.37	Shields parametresine karşı boyutsuz zaman ölçeği, dalga+akıntı	d
,	urumunda. Taban orijinal düzlem ve taban ile boru arasındaki açıklık yoktı	ur
	(Fredsøe vd. [127])	9
Şekil 3.38	Deneysel denge oyulma ifadelerinin laboratuar verileri ile karşılaştırılma	S1
	(Harris vd. [128])	24
Şekil 3.39	Sığ su bölgesinde oyulma tahmini (Harris vd. [128])12	25
Şekil 3.40	Orta su derinliği bölgesinde oyulma tahmini (Harris vd. [128]) 12	25
Şekil 3.41	Derin su derinliği bölgesinde oyulma tahmini (Harris vd. [128]) 12	26
Şekil 3.42	Denge oyulma profilleri (Sümer ve Fredsøe [81])12	27
Şekil 3.43	Denge oyulma genişliği. Dalga ve akıntı kombinasyonu (Sümer ve Fredsøe) (
	81])	28
Şekil 3.44	Boru konumunun etkisi. a) KC=11, θ =0.19. b) KC=27, θ =0.035.	c)
,	KC=900, θ=02.4. (Sümer ve Fredsøe [81])	29
Sekil 3.45	Atak açsının etkisi. Düz çizgi: Sayısal (Hansen [102]). Kesikli çizgi: Dene	ev
,	(Mao [78])	30
Sekil 3.46	Kum icinde kabuk parcalarının etkisi (Sidek ve İbrahim [144])	31
, Sekil 3.47	Su derinliğinin etkişi (Sümer ve Fredsøe [80])	32
Šekil 4.1	Genel görünüm	37
Sekil 4.2	Dalga kanalı	38
Sekil 4.3	Kanalın sematik gösterimi	39
Sekil 4.4	Kumun granülometre eğrisi	39
Sekil 4 5	Profil Kaydedici 14	10
Sekil 4 6	Dalga üretilmeden önce düzeltilmis taban profili ölcümü 14	10
Sekil 4 7	Dalga üretildikten sonra olusan taban profili ölçümü	11
Sekil 4.8	Denevlerde farklı konumlarda kullanılan boru hattı capları (D=3.23 cm. D)=
Ş e llir 1.0	4.90 cm D=7.70 cm ve 11.40 cm olmak üzere secilmistir.) 14	11
Sekil 4 9	Limnimetre ile ovuma derinliği ölcümü (1/10 sev eğimi d=?3 cm D=11.4	10
Şenn 1.9	$m H_{-}=9.35 \text{ cm} T_{-}=2.00 \text{ sn} T_{-}=1.31 \text{ cm} S=1.60 \text{ cm}$	13
Sekil 4 10	$\ddot{\Pi}_{p}$ Γ_{p} Γ	13
Sekil 4 11	Dalga üreticisi 14	15
Sekil 4 12	Düzensiz deniz durumunun tinik kaydı ve şıfırı asağı kesme yönten	ni
Şekii 1.12	nrensibi	16
Sekil 4 13	Ölcülen dalga vüksekliğinin girilen dalga vüksekliği ile değişimi (d=60 cm	5
Şekii 1.15	15 Içûrên durgu yûksekirginin girhên durgu yûksekirgi nê degişinin (d. 60 em	55
Sekil 4 14	Dalga monitörü ve Hr Wavedata veri tonlama sistemi	56
Sekil 5.1	Denevsel verilerin değerlendirilmesinde izlenen adımlar	52
Şekil 5.1	1/10 sev eğimli tahanda sığlaşma	54
Sekil 5.2	Dalga kırılması ($d=23$ cm D=11.40 cm Hs=13.96 cm Tn=2.67) 16	55
Sekil 5.4	Düzenli ve düzensiz dalgalar için 1/10 sev eğimli tahanda sığlaşma	,5 56
Şekil 5.4	Düzensiz dalga durumunda 1/10 kıvı sev eğiminde oluşan tahan profilleri	,0
ŞUKII J.J	16 16 17 10 Kiyi şev egininde oluşan taban promien	58
Sekil 5.6	Boru canının oyulma derinliği üzerine etkişi (H –4 75 cm)	70 77
Sekil 5.7	Düzlem tahanda oyulma derinliğinin dalga yüksekliği ile değişimi 17	73
Sekil 5.7	Düzlem tahan ve 1/10 sev eğiminde oyulma derinliğinin dalga yüksekliği i	Je
ŞUKII J.U	değişimi	1Ο 7Δ
Sekil 5 9	Düzlem tahanda ovulma derinliğinin dalga perivodu ile değişimi 17	75
şenii 5.5	2 azterni albanda oʻjanna derninginin darga periyota ne degişinin	5

Şekil 5.10	Tüm düzensiz veriler kullanılarak oyulma derinliğinin pik periyot, 'değisimi	Г _р , ile 175
Şekil 5.11	Tüm düzensiz veriler kullanılarak oyulma derinliğinin ortalama periyo	ot, T_m ,
Şekil 5.12	Düzlem tabanda frekans parametresinin rölatif oyulma derinliği ile değ	170 ģişimi
Şekil 5.13	Düzlem tabanda rölatif oyulma derinliğinin dalga dikliği ile değişimi	177 178
Şekil 5.14	Düzlem tabanda rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile de	ğişimi 179
Şekil 5.15	Düzlem taban durumunda S/D'nin Ursell parametresi ile değişimi (H _s -	T _p) 179
Şekil 5.16	Düzlem tabanda S/D'nin U _R ile değişimi (H _s -T _p)	180
Şekil 5.17	Düzlem tabanda S/D'nin U _{RB} ile değişimi (H _s -T _p)	181
Sekil 5.18	1/10 kıvı eğiminde oyulma derinliğinin dalga yüksekliği ile değişimi	182
Şekil 5.19	1/10 eğimli tabanda sabit boru çapında, D=11.40 cm, oyulma derinl dalga yüksekliği ye su derinliği ile değişimi	liğinin 183
Şekil 5.20	1/10 eğimli tabanda rölatif oyulma derinliğinin frekans parametro	esi ile
Şekil 5.21	Rölatif oyulma derinliğinin 1/10 eğimli şevde farklı su derinlikl	184 erinde
Qal:1 5 22	trekans parametresi ile degişimi	184
Şekii 5.22	1/10 şev egiminde farklı su definikterinde folatlı öyülma definiginin dikliği ile değiçimi	105 uaiga
Sakil 5 23	1/10 say ağımında farklı su derinliklerinde rölatif oyulma derinliğinin	105 dalga
Şekii 5.25	dikliči ile dečisimi	185
Sekil 5 24	1/10 sev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişin	105 ni (H
ŞCKII J.24	T)	186 1
Sekil 5 25	Rölatif oyulma derinliğinin Ursell şayışı ile değişimi	100
Sekil 5 26	Rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi	187
Sekil 5 27	Rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi	187
Sekil 5.27	1/10 kıvı eğiminde S/D'nin U _{PP} ile değişimi	189
Sekil 5 29	1/10 kiyi eğiminde S/D'nin UPP ile değişimi	189
Sekil 5 30	$1/10 \text{ kiyi eğiminde S/D'nin U_{PP}}$ ile değişimi	189
Sekil 5 31	Düzlem ve eğimli tabanda S/D'nin U_{BB} ile değişimi (H _{1/10} -T ₂)	191
Sekil 5 32	Düzlem ve eğimli tabanda S/D'nin URB ile değişimi ($H_{c}T_{a}$)	192
Sekil 5 33	Düzlem ve eğimli tabanda S/D'nin URB ile değişimi (H_{rm}, T_{r})	193
Sekil 5.34	Ovulma derinliğinin dalga vüksekliği parametresi. H _{1/10} , ile değişimi	195
Sekil 5 35	Ovulma derinliğinin dalga yüksekliği parametresi H _e ile değişimi	195
Sekil 5 36	Ovulma derinliğinin dalga yüksekliği parametresi H _{ma} ile değişimi	196
Sekil 5 37	Ovulma derinliğinin dalga perivot parametresi T _m ile değişimi	197
Sekil 5 38	Ovulma derinliğinin dalga periyot parametresi, T _m , ne değişimi	197
Sekil 5 39	S/D'nin Boru Ursell savısı ile değişimi (H. T)	197 199
Sekil 5 40	S/D'nin Boru Ursell sayısı ile değişimi (H _s , T _m)	200
Sekil 5.10	S/D'nin Boru Ursell sayısı ile değişimi (H1/10, Tm)	201
Sekil 5.47	S/D nin Boru Ursell sayısı ile değişimi ($H_{1/10}$, T_m)	201
Sekil 5 43	Düzensiz denklem ile Düzenli denklem değişimi (H _{rms} , T _p)	202 204
Sekil 5 44	Düzensiz denklem ile Düzenli denklem değişimi $(H_{1,0})$	204 204
Sekil 5 45	Düzensiz denklem ile Düzenli denklem değişimi (H _{1/10})	20 4 205
Sekil 5 16	S/D'nin U _{po} ile değişimi (H _{ms} , T)	205 707
Solvil 5 17	S/D'nin $U_{R\beta}$ ile dečisimi ($\Pi_{1/10}, \Pi_{p}$).	207 200
ŞUKII J.4/	S/D IIII $\cup R\beta$ IIC UCZIŞIIII (II _s , I _p)	200

Şekil 5.48	S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H_{rms} , T_p)	209
Şekil 5.49	S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H _i , T _i)	210
Şekil 5.50	S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H _{1/10} , T _m)	
Şekil 5.51	S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H _s , T _m)	
Şekil 5.52	S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H _{rms} , T _m)	
Şekil 5.53	Düzensiz denklem ile Düzenli denklem değişimi (H _s)	
Şekil 6.1	Biyolojik sinir sisteminin blok gösterimi (Fırat vd. [184])	
Şekil 6.2	Sinir hücresi (Takçı [185])	
Şekil 6.3	YSA topolojisi (Uğur ve Kıncı [187])	220
Şekil 6.4	Basamak işlemcisi	222
Şekil 6.5	Sigmoid işlemcisi	222
Şekil 6.6	Rampa işlemcisi	223
Şekil 6.7	Gauss fonksiyonu	223
Şekil 6.8	Bir Yapay Sinir Ağı hücresinin çalışma örneği	224
Şekil 6.9	XOR problemi (ikinci girdi kümesi için hatalı)	225
Şekil 6.10	YSA topolojisi (Şen [191])	226
Şekil 7.1	Modelleme akış şeması	228
Şekil 7.2	YSA topolojisinin şematik gösterimi	230
Şekil 7.3	Model alanı ve oyulma üzerinde etkili parametreler	
Şekil 7.4	R.4.1 (H_0 - L_0 - d - D)	
Şekil 7.5	$R.4.5 (H_i-L_i-T-D)$	
Şekil 7.6	Model alanı ve oyulma üzerinde etkili parametreler	
Şekil 7.7	IR4.1 ($H_{rms,0}$ - T_p -d-D)	
Şekil 7.8	IR.4.10 (H_{rms} - T_p -d-D)	
Şekil 7.9	RIR.4.1 (H_{s0} - T_{m0} - d - D)	
Şekil 7.10	RIR.4.10 (H_s - T_m -d-D)	

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	(Willamson [47])'ın deneysel çalışmalarında elde edilen ana kaldırma
C ¹ 1 2 1	frekansları
Çızelge 3.1	Korelasyon katsayıları (Yasa [95])91
Çizelge 3.2	Farkli modellerin istatiksel değerleri
Çızelge 3.3	Labaratuvar verilerine karşılık ampirik denge oyulma ifadelerinin
	Kaişinaştırınması (S&F, (Sumer&Freusøe [/9]), K&B, (Rudoipin&Bos [127]) $IEC18$ (Dichardson and Davis [126]) (Dravaara vd. [121])
	$[157]$), $\Pi E C 18$, (Richardson and Davis [150]), (Dieusers vu. [151])
Circles 2.4	123 Farklı hölgələrdəki fizikası norometrelər (Matasson yari UK) 125
Cizalge 3.4	Takil dalgalarin kullanilmagi ila daniz durumunun karaktaristik dalga
Çizeige 4.1	rekii daigalarin kullaniimasi ne deniz durumunun karakteristik daiga
Circles 4.2	Substrum analizindan alda adilan karaktariatik dalaa naramatralari
Çizeige 4.2	(CIDIA [160]) 150
Cizalaa 4.2	(CIRIA [109])
Çizeige 4.5	delge perometre değerleri
Cizelge A A	Etkili parametreler Cevik [10/]
Cizelge 4.5	Ovalma derinliğine etki eden narametreler için boyat analizi
Cizelge 4.5	Oyulma derinliğine etki eden boyutsuz parametreler
Cizelge 5.1	Denevlerden elde edilen dalga kırılma tinleri
Cizelge 5.1	Kıvı profil değişimi ve katşavıları
Cizelge 5.2	Dalga narametrelerine ait korelasvon katsavıları
Cizelge 5.4	1/10 kivi eğiminde farklı karakteristik dalga narametrelerinin
çızeige s. i	kombinasyonu ile elde edilen $U_{\rm p}$ sayıları ile rölatif oyulma derinliği
	değişiminin korelaşyon katşayıları (\mathbf{R}) 188
Cizelge 5.5	1/10 kivi eğiminde farklı karakteristik dalga parametrelerinin
ç12 0 18 0 0.0	kombinasyonu ile elde edilen U_{BB} savıları ile rölatif oyulma derinliği
	değisiminin korelasyon katsayıları (R).
Cizelge 5.6	Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı karakteristik dalga parametrelerinin
, <i>O</i>	kombinasyonu ile elde edilen U_{RB} savıları ile rölatif oyulma derinliği
	değisiminin korelasyon katsayıları (R)
Cizelge 5.7	Farklı dalga vüksekliklerinin kombinasyonu ile elde edilen oyulma ile
, <i>O</i>	dalga vüksekliklerinin korelasvon katsavıları
Cizelge 5.8	Farklı dalga periyodlarının kombinasyonu ile elde edilen oyulma/dalga
,	periyot korelasyon katsayıları
Çizelge 5.9	Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı karakteristik dalga parametrelerinin
- U	kombinasyonu ile elde edilen U _{RB} sayıları ile rölatif oyulma derinliği
	değişiminin korelasyon katsayıları (R)

0 Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı karakteristik dalga parametrelerin		
kombinasyonu ile elde edilen $U_{R\beta}$ sayıları ile S/D değişiminin k	orelasyon	
katsayıları (R)		
BSS ve YSS karşılaştırılması	217	
Seçilen model fonksiyonları	229	
elge 7.2 Sinir hücre sayısının belirlenmesi		
elge 7.3 Tek girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri		
Lizelge 7.4 İki girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri		
Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri	233	
R ,OKH, SI ve OH değerleri	233	
Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri		
Sinir hücre sayısının belirlenmesi		
Tek girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri	237	
Çizelge 7.10 İki girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri		
Çizelge 7.11 Üç girdili modeller için R ve OKH değerleri		
Çizelge 7.12 Dört girdili modeller için R, OKH, SI ve OH değerleri		
Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri		
Sinir hücre sayısının belirlenmesi		
Tek girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri	242	
İki girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri		
Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri	243	
Dört girdili modeller için R, OKH, SI ve OH değerleri	243	
Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri		
Farklı koşullar için modellerin karşılaştırılması	246	
	Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı karakteristik dalga paramı kombinasyonu ile elde edilen $U_{R\beta}$ sayıları ile S/D değişiminin k katsayıları (R). BSS ve YSS karşılaştırılması. Seçilen model fonksiyonları. Sinir hücre sayısının belirlenmesi. Tek girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. İki girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. R,OKH, SI ve OH değerleri. Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri. Sinir hücre sayısının belirlenmesi. Tek girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Dört girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Dört girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri. Dört girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tek girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tiş girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tiş girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tiş girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tiş girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri. Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri.	

DENİZALTI BORU HATLARI ALTINDAKİ YEREL OYULMANIN DÜZENSİZ DALGA ETKİSİNDE MODELLENMESİ

Burak KIZILÖZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Esin ÖZKAN ÇEVİK

Son yıllarda petrol, doğalgaz ve farklı akışkanların taşınmasını sağlayan deniz altı boru hatları kıyı mühendisliğinin uygulama ve araştırma konularından birisidir. Ancak boru hattı, taban, dalga ve/veya akıntı arasındaki üçlü etkileşim boru hattı altında oyulmaya neden olmaktadır. Boru hatları altındaki oyulma denizaltı boru hatlarının inşaası ve işletmesi açısından oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle boru hatları altındaki oyulma derinliği halen araştırmacıların üzerinde çalıştıkları güncel bir konu olma özelliğini sürdürmektedir. Bu çalışmada düzensiz fırtına dalgaları etkisinde sığlaşma bölgesinde düzlem taban ve 1/10 eğimli taban üzerine farklı su derinliklerinde yerleştirilmiş değişik çaplardaki rijit boru hatları altında meydana gelen yerel oyulma derinliği deneysel olarak araştırılmıştır. Oyulma deneylerinden önce seçilen fırtına sartları icin kıvı profillerinin gelisimi incelenmistir. Düzensiz dalga sartlarında oyulmaya neden olan etkili tüm parametreler ile çeşitli boyutsuz parametreler kullanılarak oyulma derinliği ile değişimleri incelenmiştir. Düzensiz dalga şartlarında yapılan deney sonuçları Çevik [104]'in düzenli dalga şartlarında yapmış olduğu deney sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Buradaki en önemli husus düzenli dalga şartları altında meydana gelen oyulma derinliği ile aynı oyulma derinliğine neden olan düzensiz dalga etkisindeki bir firtinayı temsil edecek karakteristik dalga parametrelerinin neler olması gerektiğinin belirlenmesidir. Ayrıca yerel oyulma derinliğini belirlemek için bu calısmada düzensiz dalga sartlarında yapılan denevlerden elde edilen veriler ve düzenli dalga şartlarında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak, derin su dalga şartları ile yerel dalga şartlarının ayrı ayrı girdi verileri olarak dikkate alınması ile Yapay Sinir Ağları yöntemi kullanılarak alternatif modeller geliştirilmiştir. Böylece bu çalışmada mühendislik uygulamalarına çözüm getirecek modeller önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Oyulma derinliği, düzensiz dalgalar, boru hatları, yapay sinir ağları, model

ABSTRACT

MODELING OF SCOUR UNDER SUBMARINE PIPELINES EXPOSED TO IRREGULAR WAVE ATTACK

Burak KIZILÖZ

Department of Civil Engineering

Ph.D. Thesis

Adviser: Prof. Dr.Esin Özkan ÇEVİK

In the recent years, transport of oil, natural gas and various fluids are transported by submarine pipelines which are the practices of coastal engineering and one of the research topics. The triple interaction between submarine pipeline, bed and flow (wave, currents) causes scour around submarine pipelines. Scour under submarine pipelines plays an important role in terms of construction and operation of submarine pipelines. In this study, local scour depth around rigid different diameter submarine pipelines placed at different depths on horizontal and (1/10) sloping beaches exposed to normalincidence irregular wave attack was experimentally investigated. Before the scour experiments were started, the shore-normal evolution of the beach profiles were examined, because the study area is in a shoaling region. All the parameters affective on local scour depth under irregular wave conditions and various non-dimensional parameters have been investigated separately. The results of the irregular wave tests were evaluated together with the results of tests with regular waves conducted by Çevik [104]. Here, the key issue is to choose the wave parameters to characterize the sea state of irregular wave attack which causes the same scour depth as that caused by regular wave attack. To predict the local scour depth considering both the data obtained in this study from irregular wave experiments and the regular wave experiment by Cevik [104] and using the deep water wave parameters and local wave parameters separately as input data, the alternative models with the method of ANNs were developed. So, in this study, models were proposed for solving the engineering applications.

Keywords: Scour depth, irregular waves, pipelines, Anns, models

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kıyı mühendisliğinde denizaltı boru hatları deniz tabanına değişik konumlarda yerleştirilebilen yatay silindirik yapılar olarak dikkate alınarak incelenir. Bu yapılar deniz deşarjları, soğutma suyu boru hatları, petrol nakil hatları, doğal gaz boru hatları, enerji nakil hatları ve haberleşme amaçlı kablolar olarak inşa edilmektedirler. Boru hatları etrafında yapının geometrisinden dolayı oluşan akım yapısı yerel oyulmaya neden olmakta ve bu oyulma yapının stabilitesini etkilemektedir. Kararlı akım ve dalga etkisinde deniz altı boru hatları çevresindeki akım alanı kararlı ve kararsız akımlar için geçmiş yıllarda detaylı şekilde araştırılmıştır. Kararlı akım şartları [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35] tarafından ve kararsız akım sartlari ise [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [77] tarafından araştırılmıştır. Deniz altı boru hatları çevresindeki oyulma derinliği [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117],[118], [119], [120] tarafından araştırılmıştır. Ayrıca oyulma derinliği sayısal modeller ve belirsizlik yöntemleri kullanılarakda [155], [156], [157], [158], [159], [160], [161], [162], [163], [164], [155], tarafından çalışılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Denizel ortamda sığlaşma bölgesinde farklı konumlarda tabana yerleştirilmiş boru hatlarına dik yaklaşan düzensiz fırtına dalgaları etkisindeki boru hatları altındaki yerel oyulma derinliğinin deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmalar ile ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak düzensiz dalga etkisinde yerel oyulma derinliği için ifadeler ile düzenli, düzensiz ve düzenli/düzensiz dalga şartlarında elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesi ile yerel oyulma derinliğini yapay sinir ağları yöntemiyle hesaplayan modeller bu çalışmanın kapsamını oluşturmaktadır.

1.3 Hipotez

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile üretilen denklem ve modellerle boru hatları altındaki oyulma derinliği belirlenmeye çalışılmıştır.

BÖLÜM 2

BORU HATLARI ÇEVRESİNDE AKIM ALANI VE TABAN HAREKETİ

2.1 Silindirik Yapılar Etrafında Akım Alanı

Boru hatları etrafında yapının geometrisinden dolayı değişen akım yapısı yerel oyulmaya sebep olmaktadır. Hareketli bir taban üzerine boru hattının yerleştirilmesi ile akım alanında yaratılan rahatsızlıktan dolayı sırasıyla; boru hattı etrafında sınır tabakası oluşumu, sınır tabakasından ayrılma ve çeşitli büyüklüklerde vorteks oluşumları sonucunda yerel akım alanındaki hız ile taban kayma gerilmesinin şiddetlerinde artma bunun neticesinde ise yerel oyulma olayı meydana gelmektedir. Yerel taban hareketi nedeninin, yapıların akım alanını etkilemesiyle meydana gelen basınç ve kayma gerilmeleri değişiminden oluştuğuda bilinmektedir. Yapıdan dolayı rahatsız edilmemiş akım bölgesine göre türbülans şiddetinin iki kat, kayma gerilmesinin dört kat, katı madde taşınımının sekiz kat arttığı belirlenmiştir (Yüksel ve Üç [1]).

Boru hatları çevresindeki akım alanının değişmesinden kaynaklanan yerel oyulma işleminin anlaşılabilmesi için araştırmacılar özellikle bu bölgedeki akım yapısını açıklamaya çalışmışlardır. Problemin daha iyi anlaşılabilmesi için boru hatları çevresindeki kararlı ve kararsız akım alanları kısaca açıklanacaktır.

2.1.1 Kararlı Akım Durumu (Tek Yönlü)

Bir cisim etrafındaki akım alanı iki bölgeye ayrılmıştır [2]. Bunlar cisme yakın sürtünme etkilerinin önemli olduğu ince bir bölge ile sürtünme etkilerinin ihmal edilecek mertebede olduğu dış bölgedir. Sürtünme etkilerinin dikkate alındığı bölge "sınır tabakası teorisi" ile, sürtünme tesirlerinin ihmal edildiği bölge ise "potansiyel akım teorisi" ile açıklanmaktadır.

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi sınır tabakası içinde akışkan partiküllerinin hızı S'den A'ya kadar artar ve bunun neticesi olarak 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.

$$Re = \frac{DU}{v}$$
(2.1)

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



Şekil 2.1 Bir silindir etrafında sınır tabakasından ayrılma (Yüksel [3])

Reynolds sayısı sıfırdan itibaren arttığında akım büyük değişimlere uğramaktadır. Artan Reynolds sayısına bağlı akım rejimlerinin değişimleri, art-iz ve sınır tabakası oluşumları Şekil 2.2'de görülmektedir. Reynolds sayısının çok küçük değerlerinde ayrılma meydana gelmez iken 5 değerini aldığında ilk ayrılma görülmektedir (Şekil 2.2a).

Reynolds sayısının 5<Re<40 aralığında silindirin art-iz bölgesinde sabit bir vorteks çifti oluşmaktadır (Şekil 2.2b). Re sayısı ile bu vorteksin uzunluğu artmaktadır (Batchelar [4]).

Re sayısının daha da artması ile art-iz bölgesinin stabilitesi bozulmaktadır. Bu olay vorteks saçılımı olarak isimlendirilmektedir. Şekil 2.2d-f' de silindirin her iki tarafında saçılan vortekslerin art-iz bölgesinde oluşturduğu vorteks sokağı görülmektedir.

Re sayısının 40<Re<200 aralığında vorteks sokağı laminerdir (Şekil 2.2c). Saçılım iki boyutlu yani silindirin düşey ekseni boyunca değişim yoktur (Williamson [5]).

Re sayısının artması ile art-iz bölgesinde türbülansa geçiş başlamaktadır (Şekil 2.2d). Re sayısının 200<Re<300 aralığında türbülansa geçiş bölgesi silindire doğru ilerlemektedir (Bloor,1964). Re sayısı 400' e eşit olduğunda vorteksler türbülanslıdır (Bloor [6]).

a		Ayrılma yok Viskoz akım	Re < 5
b		Sabit bir çift simetrik vorteks	5 < Re< 40
c	-0.00	Laminer vorteks sokağı	40 < Re < 200
d	-033	Artz-iz bölgesinde türbülansa geçiş	200 < Re <300
e		Art-iz tamamen türbülanslı A : Laminer sınır tabakasından ayrılma	300 < Re < 3x10 ⁵ Kritik altı
f		A : Laminer sınır tabakadan B : Türbülasnlı sınır tabakadan ayrılma	3x10 ⁵ < Re < 3.5x10 ⁵ Kritik
g	- B	Türbülanslı sınır tabakadan ayrılma. Sınır tabakası bazen laminer bazen türbülanslı	3.5x10 ⁵ < Re < 1.5x10 ⁵ Kritik üstü
h	- Coro	C : Sınır tabakası bir kenarda Tamamen türbülanslı	1.5x10 ⁶ < Re < 4x10 ⁶ Geçiş üstü
i		C : Sınır tabakası iki kenarda tamamen türbülanslı	4x10 ⁶ < Re Kritik geçiş

Şekil 2.2 Şekil 2.2 Kararlı akım durumunda cilalı, dairesel bir silindir etrafındaki akım rejimi (Sümer [7])

Gözlemler, Re sayısının 40<Re<200 değerleri arasında vorteks saçılımının iki boyutlu, fakat daha büyük değerleri için üç boyutlu olduğunu göstermiştir (Gerrard [8], Williamson [5]).

Re>300 iken art-iz bölgesi tamamen türbülanslıdır. Re sayısının çok geniş bir aralığında, $300 < \text{Re} < 3 \times 10^5$, silindir yüzeyinde sınır tabakası laminer kalmaktadır. Bu ise, kritik altı akım rejimi olarak bilinmektedir (Şekil 2.2e).

Re sayısının daha da artması ile sınır tabaka içinde türbülansa geçiş başlamaktadır. İlk geçiş sınır tabakasının ayrıldığı noktada oluşmakta ve Re sayısının artması ile türbülansa geçiş bölgesi silindirin memba yüzeyi boyunca durgunluk noktasına doğru ilerlemektedir (Şekil 2.2f - 2.2i).

Reynolds sayısının $3x10^5 < \text{Re} < 3.5x10^5$ gibi dar bir aralığında silindirin bir kenarındaki ayrılma noktasında sınır tabakası türbülanslı diğer kenarında ise laminerdir. Bu akım rejimi kritik akım rejimi olarak bilinmektedir.

Silindirin bir kenarındaki türbülanslı ayrılma bölgesi, bazen bir kenardan diğerine değişmektedir (Schewe [9]).

Re sayısının $3.5 \times 10^5 < \text{Re} < 1.5 \times 10^6$ aralığındaki akım kritik üstü akım rejimi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.2g). Bu rejimde silindirin her iki kenarında sınır tabakasından ayrılma türbülanslıdır. Ancak sınır tabaka içinde türbülansa geçiş tamamen sağlanamadığından durgunluk noktası ve ayrılma noktası arasında bir yerde türbülansa geçiş bölgesi bulunmaktadır.

Re sayısı 1.5x10⁶ değerine ulaştığında silindirin bir kenarında sınır tabakası tamamen türbülanslıdır.

Re sayısının $1.5 \times 10^6 < \text{Re} < 4.5 \times 10^6$ aralığında sınır tabakasının silindirin bir kenarında tamamen türbülanslı ve diğer kenarında bazen laminer bazen de türbülanslı olduğu akım rejimine geçiş üstü akım rejimi denmektedir (Şekil 2.2h).

Re sayısının 4.5x10⁶, dan daha büyük olduğu değerlerde silindir yüzeyi üzerinde sınır tabaka hemen hemen her yerde türbülanslıdır. Bu akım rejimi, kritik geçiş akım rejimi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.2i).

Bilindiği gibi Reynolds sayısı 40 değerini aştığında vorteks saçılımı meydana gelmektedir. Ters basınç gradyanı nedeniyle silindir yüzeyinde sınır tabakasından ayrılma oluşmaktadır. Ayrılma noktasının mansabında cidardan ayrılan tabaka, bir

vorteksi kendi içine alarak bükülmekte ve bu işlem silindirin diğer kenarında ters yönde olmaktadır.

Şekil 2.3a' da görüldüğü gibi daha güçlü olan A vorteksi, B vorteksini içine doğru çekerek vortisiteleri ile beslenmeye başlamakta ve beslenme kesildiği zaman A vorteksi sınır tabakasından koparak akımla birlikte mansaba doğru hareket etmektedir.



Şekil 2.3 Vortesklerin oluşumu (Sümer [7])

Re sayısı arttıkça iz akımı oluşur. Büyük Re sayılarında cismin gerisinde Von Karman Vorteks sokağını şekillendiren vorteksler bir taraftan diğerine saçılmaya başlar. Ayrılmanın gerçek konumunu analitik olarak belirlemek çok zordur çünkü iz akımıyla potansiyel akım arasında girişim meydana gelmektedir. Ayrılma noktası yüzey boyunca basınç gradyanına ve sınır tabakası içindeki türbülans düzeyine bağımlıdır. Ayrılma noktası türbülans düzeyinin artmasıyla cismin daha gerisine kayar.

Şekil 2.4 de farklı Reynolds sayılarında dairesel bir silindir etrafında akımın cidardan koparak ayrılması ile oluşan iz akımları görülmektedir.

Vorteks saçılım frekansı f_v, Reynolds sayısının bir fonksiyonudur.

$$f_v = f(Re) \tag{2.2}$$

Normalleştirilmiş vorteks saçılım frekansı ise Strouhal sayısı, St, olarak adlandırılmaktadır. Burada D silindir çapı ve U akım hızıdır.

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



Şekil 2.4 Farklı Reynolds sayılarında silindir etrafındaki akım (Hudges ve Brighton [10])

Şekil 2.5' de vorteks saçılımının başladığı Re sayısının 40 değerine karşılık gelen St sayısının 0.1 olduğu görülmektedir. Re sayısı yaklaşık olarak 300'e ulaştığında kritik altı akım rejiminin alt ucunda St sayısı 0.2 değerini almakta ve Re sayısının artmasına rağmen kritik altı akım boyunca St sayısı 0.2'de sabit kalmaktadır.

Kritik Re sayısı aralığında, $3x10^5 < \text{Re} < 3.5x10^5$, St sayısı ani bir sıçrayış göstererek 0.2'den 0.45 değerine çıkmaktadır. Kritik üstü Re sayısı aralığında St sayısının yüksek değeri devam etmekte ve Re sayısının artmasıyla St sayısı yavaşça azalmaktadır.



Şekil 2.5 Pürüzsüz bir silindir için Strouhal sayısının Re sayısı ile değişimi (Sümer [7]) Kritik üstü akım aralığında St sayısındaki büyük artış şu şekilde açıklanmaktadır. Kritik üstü akım rejiminde silindirin her iki kenarındaki ayrılma noktalarında sınır tabaka

türbülanslıdır. Şekil 2.6'dan da görüldüğü gibi ayrılma noktalarının mansaba doğru ilerlemesi ile sınır tabakadan ayrılma gecikmektedir. Bunun anlamı ise; vortekslerin kritik altı akım rejiminden daha hızlı bir oranda etkileşmeleri nedeniyle St sayısının daha yüksek değerlere ulaşmasıdır.



Şekil 2.6 Değişik rejimlerde ayrılma noktalarının gösterilişi (Sümer [7])

Re sayısı yaklaşık olarak 1.5×10^6 değerine ulaştığında St sayısında düzensizliklerle karşılaşılmaktadır. Şekil 2.2h'de silindirin bir kenarında türbülansa geçişin tamamlandığı görülmektedir. Art-iz vortekslerinin oluşumu içindeki asimetri nedeniyle vortekslerin birbiriyle etkileşmesi engellendiğinden düzensiz ve karmaşık vorteks saçılımı meydana gelmektedir (Şekil 2.7c-d).

Şekil 2.5'de kritik üstü akım rejiminde St sayısının 0.2-0.3 değerini alabilmesi için Re sayısının yaklaşık olarak 4.5x10⁶'ya ulaşması gerekmektedir. Bu durumda düzenli vorteks saçılımı yeniden oluşmaktadır (Şekil 2.7e-f).

Pürüzlü silindirler için St sayısı, Re sayısı ve rölatif pürüzlülüğün bir fonksiyonudur.

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

Burada k_s , Nikuradse'nin eş değer kum pürüzlülüğüdür. Şekil 2.8'de pürüzlü silindirler için $k_s/D>3x10^{-3}$, kritik, kritik üstü, geçiş üstü akım rejimleri St-Re grafiğinin dar bir bölgesinde oluştuğu ve Re sayısının daha düşük değerlerinde akım rejiminin kritik geçişe doğru değiştiği görülmektedir. Pürüzlü yüzeyler üzerinde türbülans geçişinin daha hızlı olduğu bilindiğinden bu sonuç tahmin edilmektedir.

Blevins [11] çeşitli dairesel olmayan kesitler için St sayısı verilerini toplayarak Şekil 2.9'da vorteks saçılım frekansı üzerinde şekil kesitinin etkisini göstermiştir (Re sayısının büyük değerlerinde, Re>10⁵, dikdörtgen silindirler gibi sabit ayrılma noktalarına sahip kesitlerde Re sayısının vorteks saçılımı üzerinde etkisi bulunmamaktadır.
Bir silindir deniz tabanına yerleştirildiğinde yaklaşan akımın türbülansını hissetmektedir. Yaklaşan akım içindeki türbülansın vorteks saçılımı üzerinde etkin bir faktör olduğu bilinmektedir.



Şekil 2.7 Kaldırma salınımlarının güç spektrumu (Schewe [9])



Şekil 2.8 Dairesel silindirlerde pürüzlülüğün değişik değerleri için St sayısının Re sayısına göre değişimi (Achenbach ve Heinecke [12])



Şekil 2.9 Vorteks saçılım frekansı üzerinde şekil kesitinin etkisi (Blevins[11])

Bu etki Cheung ve Melbourne [13], Kwok [14], Norberg ve Sunden [15] tarafından araştırılmıştır. Farklı türbülans şiddetleri için yaptıkları deneysel çalışmalardan elde ettikleri Strouhal sayısı verileri Şekil 2.10'da görülmektedir (Cheung ve Melbourne [13]). Iu, türbülans şiddeti olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.10 Farklı türbülans değerleri için St sayısının değişimi (Cheung ve Melbourne [13])

$$I_u = \frac{\sqrt{u'^2}}{\overline{u}}$$
(2.5)

Burada u ortalama hız ve u'çalkantı hızının ortalamasıdır. Reynolds sayısı ile St sayısının değişimi yaklaşan akım içindeki türbülans şiddetiyle önemli şekilde değişmektedir. Kritik, kritik üstü ve geçiş üstü akımı rejimlerinin bir geçiş bölgesinde birleştiği Şekil 2.10'da görülmektedir. Bu geçiş aralığının alt ucu türbülans şiddetinin artması ile daha küçük Re sayılarına doğru hareket etmektedir. Bunun nedeni ise yaklaşan akımın türbülans şiddetinin artması ile silindir sınır tabakası içinde türbülansa daha erken geçilmesidir.

Yaklaşan akım içindeki kayma, vorteks saçılımı üzerinde etkili bir parametredir. Bu etki iki yolla görülmektedir. İlki silindirin uzunluğu boyunca uzunluk doğrultusunda (Şekil 2.11a), diğeri ise akış yönüne dik doğrultuda meydana gelmektedir (Şekil 2.11b). Griffin [16], [17] dairesel olmayan dik gövdeli kesitler etrafındaki akımın kayma özelliklerini incelemiştir. Silindirin uzunluğu doğrultusunda kayma gerilmesi mevcut ise uzunluk hücreleri içindeki her bir hücrede sabit frekanslı vorteks saçılımı meydana gelmektedir (Şekil 2.11a).



Şekil 2.11 Yaklaşan akımda kayma etkisi (Griffin, [16], [17])

Silindirin uzunluğu boyunca hücreler içerisinde vorteks saçılımı meydana gelmektedir. Şekil 2.12' de hücreli yapıların uzunluğu boyunca vorteks saçılımının zamanla değişimi gösterilmektedir. Burada silindirin uzunluğu boyunca saçılımın üniform olmadığı görülmektedir.

Şekil 2.13' de her biri farklı frekansa sahip dört hücre içindeki saçılım görülmektedir. Şekilde kesikli çizgilerle gösterilen yerel hızlara bağlı Strouhal sayısı'nın, fD/U_{yerel}, 0.25 değeri civarında gruplandığı gözlemlenmektedir.

Araştırmacılar hücre uzunluklarının kayma şiddeti ile ilişkili olduğunu belirtmektedir. Genel kanı ise, kayma şiddetinin artmasıyla hücre uzunluğunun azalmasıdır (Griffin [16]).

Kayma dikliğinin ortalama değeri, s ile tanımlanmaktadır.

$$s = \frac{D}{U_c} \frac{du}{dy}$$
(2.6)

Akışa dik doğrultuda kayma olması durumunda s'nin küçük değerleri için saçılım zayıf, s'nin büyük değerleri için saçılım, oldukça büyüktür. (Kiya vd. [18]).



Şekil 2.12 Hücreli yapıların uzunluğu boyunca vorteks saçılımının zamanla değişimi (Sümer [7])



Şekil 2.13 Vorteks saçılım frekansı üzerinde yaklaşan akım içindeki kayma etkisi (Maull ve Young [19])

Şekil 2.14'de s'nin üç farklı değeri için Reynolds sayısına karşılık Strouhal sayısı görülmektedir. Üniform akım durumuna, s = 0'a göre s = 0.2'de Strouhal sayısı oldukça artmaktadır. İnce çizgiler üniform akımı, daireler ise kayma akımını göstermektedir (Şekil 2.14).

Boru hattı hareketli bir deniz tabanı üzerine yerleştirildiğinde akım yapısı sebebiyle boru altında oyulma meydana gelmektedir. Bu oyulma ise 0.1D ila 1D mertebelerinde küçük bir açıklık ile taban üzerinde borunun askıda kalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle bir boru üzerindeki etkili kuvvetler ile taban etrafındaki akım alanı içinde meydana gelen değişikliklerin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 2.14 Kayma dikliğinin üç farklı değeri için Re sayısına karşın St sayısının değişimi (Kiya vd. [18])

Silindirin bir cidara yakın yerleştirilmesi durumunda çevresindeki akım alanı içinde meydana gelen değişiklikler aşağıda özetlenmiştir.

- a) Açıklık oranı, e/D, yaklaşık olarak 0.3'den daha küçük değerler aldığında vorteks saçılımı önlenmektedir (e, cidar ile silindir arasındaki açıklık).
- b) Şekil 2.15'de durgunluk noktasının bir açısal konumda aşağı hareket ettiği görülmektedir. Üç farklı açıklık oranı değeri için silindir etrafındaki ortalama basınç dağılımları Şekil 2.16a ve Şekil 2.16b'de verilmektedir. Açıklık oranı, e/D, 1 değerini aldığında durgunluk noktası φ=0°'da oluşmakta, açıklık oranı'nın, e/D, 0.1 değerine kadar azalması ile açısal konumun φ=-40°'ye kadar hareket ettiği görülmektedir.
- c) Ayrıca ayrılma noktalarının açısal konumları değişmektedir. Silindirin serbest akış tarafında ayrılma noktası memba' ya doğru, cidar tarafında ayrılma noktası mansaba doğru hareket etmektedir (Şekil 2.15). Şekil 2.17'de Re sayısı 6x10³'e

eşit iken açıklık oranı, e/D'nin, 0.1 değeri için bir silindirin ayrılma açısının serbest akış tarafında $\phi = 80^{\circ}$, cidar tarafında ise $\phi = -110^{\circ}$ olduğu görülmektedir.

 d) Silindirin serbest akış tarafındaki vakum, silindirin cidar tarafındakinden daha büyük meydana gelmektedir (Şekil 2.16b ve Şekil 2.16c). Silindirin cidardan uzağa konmasıyla bu etki kaybolmaktadır (Şekil 2.16a).



Şekil 2.15 Ayrılma noktası etrafında akım alanı (Sümer [7])



Şekil 2.16 Açıklık oranı e/D'nin bir fonksiyonu olarak cidar yakınında bir silindir üzerindeki basınç dağılımları (Bearman ve Zdravkovich [20])



Şekil 2.17 Boşluk oranının fonksiyonu olarak ayrılma açısı (Jensen ve Sumer [21])

Bir cidara yakın yerleştirilmiş silindir etrafındaki vorteks saçılımı önlenebilmektedir. Cidara farklı mesafelerde konulan bir silindirin art-iz bölgesinin her iki kenarındaki sıcak tel (hot-wire) sinyallerinden alınan güç spektrumu Şekil 2.18'de verilmiştir (Bearman ve Zdravkovich [20]). Şekilden de görüldüğü gibi açıklık oranı, e/D'nin, 0.3 değerine kadar düzenli vorteks saçılımı devam etmektedir.

Bu sonuç ilk olarak Bearman ve Zdravkovich [20] tarafından belirtilmiş ve daha sonra Grass vd. [22]'nin ölçümleri ile doğrulanmıştır (Şekil 2.19).

Cidar tarafında sönümlendirilen vorteks saçılımları silindirin her iki tarafı arasında vorteks saçlımında asimetriye neden olmaktadır. Serbest kenarda kalan vorteks cidar tarafında kalan vorteksten daha büyük ve güçlü olarak gelişmektedir. Böylece bu iki vorteksin etkileşimi büyük ölçüde azalmakta ve düzenli vorteks saçılımının kısmen veya tamamen zayıflamasına neden olmaktadır (Şekil 2.19).

Şekil 2.20'da Grass vd. [22] ve Raven vd. [23]'ün çalışmaları verilmiştir. Saçılım frekansının açıklık oranının azalması ile arttığı gösterilmiştir.



Şekil 2.18 Art-iz bölgesinde sıcak tel sinyallerinden alınan güç spektrumu (Bearman ve Zdravkovich [20])

Bearman ve Zdravkovich [20], Angrilli vd. [24] gibi araştırmacılara ait farklı veriler bulunmaktadır. Bearman ve Zdravkovich [20] yaptıkları ölçümlerde saçılım frekansının $0.3 \le e/D \le 3$ aralığında neredeyse değişmediğini belirtmişlerdir. Angrilli vd. [24] $0.5 \le e/D \le 6$ aralığın da yaptıkları ölçümlerde açıklık oranının azalmasıyla saçılım frekansının sistematik bir şekilde yavaşça arttığını göstermişlerdir (açıklık oranının 0.5 değerini aldığında saçılım frekansının %10 arttığını söylemişlerdir).

Açıklık oranının azalması ile vorteks saçılım frekansının hafifçe artmasına rağmen vorteks saçılım frekansının açıklık oranına karşı hassas olmadığı mevcut verilerden açıkça görülmektedir. St sayısındaki bu hafif artışın nedeni cidarın mevcut olması durumunda cidar tarafında oluşan vorteksin serbest akım tarafındaki vortekse yakın olmasıdır. Bunun sonucu olarak da her iki vorteks daha hızlı bir şekilde etkileşerek daha yüksek St frekansına neden olmaktadır.



Şekil 2.19 Cidara yakın yerleştirilmiş silindirin art-iz bölgesinin e/D'ye bağlı olarak değişimleri (Grass vd. [22])



Şekil 2.20 Vorteks saçılımı üzerinde cidar yakınlığının etkisi. e/D' nin fonksiyonu olarak St sayısının normalleştirilmiş değerleri. (Daireler; Raven vd. [23], Eğri; Grass vd. [22])

Jensen vd. [25] tarafından oyulma işleminin beş farklı safhasında bir boru hattı etrafındaki akım alanı araştırılmıştır (Şekil 2.21). III. ve V. safhada vorteks saçılımı görülmekte iken I. ve II. safhalarda saçılım görülmemektedir. Şekil 2.22'de farklı

safhalardaki saçılım frekansları verilmiştir. Strouhal sayısı III. safhada sahip olduğu yüksek bir değer olan 0.36'dan V. safhada sahip olduğu bir denge değeri olan 0.17'ye doğru değişmektedir. Bu değişime neden olan mansap oyulma profilinin geometrisi aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.21 Yaklaşık durgunluk noktası, S, konumunda ortalama hız vektörleri (Jensen vd. [25])

Silindirin arka tarafındaki kumul membasının dik eğimi, silindirin alt kenarında meydana gelen ayrılma tabakasının yukarıya doğru bükülmesine neden olmaktadır (III ve IV). Bu nedenle üst ile alt vorteks erken etkileşmekte ve bir erken saçılım meydana gelmektedir. Böylece yüksek bir vorteks saçılım frekansı çok dar bir alanda oluşmaktadır. Akım görüntüleme çalışmalarıyla benzer deneyler yapılmış ve bu dar bölgenin varlığı doğrulanmıştır (Jensen vd. [25]).



Şekil 2.22 Boru hattı altında oyulma süreci boyunca Strouhal sayısının zaman gelişimi (Jensen vd. [25])

Cidara yakın yerleştirilmiş silindir etrafındaki akım alanı ile ilgili yapmış oldukları çalışmada, silindir çevresinde ve cidar boyunca basınç dağılımının zamansal ortalamasını belirlemişlerdir. Basınç değişimi boyutsuz C_p basınç katsayısı ile temsil edilmiştir (Bearman ve Zdravkovich [20]).

Şekil 2.23 silindir etrafındaki iki asimetrik basınç dağılımını göstermektedir. Şekil 2.23a hem cidar üzerinde bulunan silindir için basınç dağılımını, hem de silindir ile cidarın temas noktasındaki süreksizliği açıkça göstermektedir. Memba ayrılma bölgesi yaklaşık olarak pozitif sabit bir C_p ve mansap ayrılma bölgesi ise negatif sabit bir C_p değerine sahiptir. Şekil 2.23b ise boru cidar açıklığı e/D = 0.1 için açıklık akımının cidardaki basınç dağılımı üzerindeki etkisini göstermektedir (Cidarda silindirin altında ani bir düşme olduğu ve minimum C_p değerinin açıklığın hemen arkasında meydana geldiği kaydedilmiştir).



Şekil 2.23 Silindirin çevresi ve cidar boyunca basınç dağılımı, a) e/D = 0, b) e/D = 0.1(Bearman ve Zdravkovich [20]).

Şekil 2.24'de e/D = 0.4 ve e/D = 0.8 için basınç dağılımlarının memba durgunluk noktası etrafında yaklaşık olarak simetrik bir şekil aldığı görülmektedir. e/D' nin bu aralığında taban basınç katsayısının, C_{pt} , belirgin bir şekilde daha da küçüldüğü görülmektedir. e/D oranı arttıkça bu minimum basıncın büyüklüğü azalmaktadır.



Şekil 2.24 Silindir çevresi ve cidar boyunca basınç dağılımı, a) e/D = 0.4; b) e/D = 0.8, (Bearman ve Zdravkovich [20])

Şekil 2.25'de e/D'nin 1.0'den büyük değerlerinde taban basıncındaki değişikliğin oldukça küçük olduğu görülmektedir. e/D oranı arttıkça, serbest akım yönünde simetri ekseninde basınç dağılımında simetrik bir form oluşmaktadır.

Şekil 2.26 farklı e/D oranları için C_p ' nin negatif pikinin büyüklüğünü ve cidar boyunca yerini göstermektedir. e/D = 0.4 olduğunda silindirin mansabında 0.5D kadar mesafede basınç maksimum değerine ulaşmaktadır.



Şekil 2.25 Silindir çevresi ve cidar boyunca basınç dağılımı, a) e/D = 1.0; b) e/D = 2.0, (Bearman ve Zdravkovich [20])



Şekil 2.26 Cidar üzerindeki minimum basınç katsayısı, o, Cpmin; x, Cpmin'un yeri (Bearman ve Zdravkovich [20])

Lei vd. [26] tarafından düz bir plaka üzerindeki farklı sınır tabakası kalınlıklarında, pürüzsüz dairesel bir silindire gelen hidrodinamik kuvvetleri ve vorteks kopmaları irdelenmişdir. Ayrıca basınç dağılımına; duvarın yakınlığının, sınır tabakası kalınlığının ve sınır tabakası kalınlığı içerisindeki hız değişiminin etkilerini, $13000 \le \text{Re}_D \le 14500$, $0.14 \le \delta/D \le 2.89$ ve $0.0 \le e/D \le 3.0$ aralıklarında deneysel olarak incelemişlerdir. Boşluk

oranının artmasıyla silindir önünde oluşan durma noktasının yukarıya doğru kaydığını ve silindir arka yüzeyindeki basıncın azaldığını, aynı boşluk oranı için taban sınır tabakası kalınlığının artmasının durma noktasını yukarı doğru kaydırdığını fakat silindir arka yüzeyindeki basıncı değistirmediğini bildirmişlerdir. İtki ve kaldırma kuvvetlerinin boşluk oranından etkilendiklerini, itki katsayısının küçük boşluk oranlarında, kalın sınır tabakasına göre ince sınır tabakasında daha büyük çıktığını, silindirin taban sınır tabakası dışında bulunması halinde ise boşluk oranından fazla etkilenmediğini, silindirin tamamen ya da kısmen sınır tabakası içinde olması halinde ise δ/D ile doğru orantılı olarak itki katsayısının arttığını belirtmişlerdir. Boşluk oranı azaldıkça silindir merkez hizasındaki hız ile hesaplanan St sayısının, e/D'nin azalmasına bağlı olarak değiştiğini, buna karşın serbest akım hızı ile hesaplanan St sayısının boşluk oranının azalmasına bağlı yerel hızdaki değisimden etkilenmediğini, bu yüzden de serbest akım hızı ile St sayısının hesaplanmasının daha uygun olacağını bildirmişlerdir. Sınır tabakası kalınlığına bağlı olarak, e/D=0.2-0.3 değerlerinde vorteks kopmasının baştırıldığını, sınır tabakası kalınlığı arttıkça vorteks kopmasının daha küçük boşluk oranlarında bastırıldığını, e/D'nin 2.0'den büyük olması halinde ise tabanın silindire gelen kuvvetlere ve vorteks kopması davranışına etkisinin ihmal edilebileceğini bildirmişlerdir.

Choi ve Lee [27] düz bir plaka üzerine yerleştirdikleri eliptik silindir etrafindaki akım özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Eliptik silindir membasın da tabana yerleştirilen bir kablo sayesinde kalınlığı artırılmış olan türbülanslı bir sınır tabakası (δ =75mm) içerisine yerleştirilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla deneyler, çapı eliptik silindirin düşey yüksekliği ile aynı olan (D=21.2mm) dairesel bir silindir için de tekrarlanmıştır. Deneylerde silindir kesit yüksekliğine bağlı Reynolds sayısının 14000 değerinde çalışmışlardır. Boşluk oranının artmasıyla eliptik ve dairesel silindire gelen itki kuvvetinin arttığını, kaldırma kuvvetinin ise azaldığını, çalışmalarında test ettikleri bütün boşluk oranları için eliptik silindire gelen itki katsayısının dairesel silindire gelen itki katsayısının yarısına eşit olduğunu bildirmişlerdir. Silindir arkasında oluşan kuyrukların hız profillerini ise kızgın-tel anemometresi kullanarak elde etmişlerdir. Vorteks kopmasının bastırıldığı boşluk oranını dairesel silindir için e/D=0.2 olarak, eliptik silindir için ise e/D=0.4 olarak elde etmişlerdir (Choi ve Lee [27]). Ayrıca vorteks kopmasının bastırıldığı oranlarına sınır tabakasının etkisinin çok küçük olduğunu bildirmişlerdir. Eliptik silindir için, boşluk oranı e/D>0.4 iken kuyrukta

düzenli vorteks kopmaları oluşsa bile, e/D=0.5 ve e/D=1.0 iken silindir arkasında oluşan ayrılma bölgesi yapılarının birbirinden oldukça farklı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Zovatto ve Pedrizzetti [28] tarafından iki paralel levha arasına yerleştirilen dairesel bir silindir etrafındaki akım, $100 \le \operatorname{Re}_D \le 2000$ ve $0.25 \le D \le 2.0$ aralıklarında, vortisite-akım fonksiyonu formülasyonuna dayalı bir sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmişdir. Silindir duvara yaklaştıkça, kuyruk bölgesinin duvar sınır tabakasından daha fazla etkilenmesi sebebiyle, düzenli akımdan periyodik vorteks kopması rejimine geçişin, tabandan etkilenmeyen bir silindire göre daha büyük Re_D değerlerinde oluştuğunu belirtmişlerdir. Duvarın çok yakın olduğu durumlarda vorteks kopmasının bastırıldığını, duvardan uzaklığın silindir yarıçapının yarısından küçük olması durumunda kanal Reynolds sayısının (Re= u_0d/ν , d su derinliği) büyük değerlerinde, vorteks kopması rejiminin oluşabildiğini gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak silindir çapından daha küçük boşluk durumunda, Karman vorteks yolunun yerine silindirin duvardan uzak yüzeyinden kopan vortekslerin tekil bir sıra oluşturduklarını bildirmişlerdir.

Price vd. [29] tarafından düz bir duvar yakınındaki dairesel silindir etrafındaki akım, akım görüntüleme, PIV ve kızgın-tel anemometresi teknikleri kullanılarak deneysel olarak incelenmişdir. Akım görüntüleme deneylerinde, Re_D=1200 ve 1400 değerlerinde, kızgın-tel anemometresi kullandıkları deneylerde ise 1380≤Re_D≤4960 aralığında çalışmışlardır. e/D≤ 0.125 ve Re_D=1200-1400 aralığı için, yaptıkları akım görüntüleme deneylerinde, silindirin sadece üst yüzeyinden vorteks kopması oluştuğunu tespit etmişlerdir. Hem akım görüntüleme hem de PIV ölçümlerinden elde ettikleri bulgularda, belirtilen bosluk oranlarında silindir memba ve mansabındaki taban sınır tabakalarında ayrılmaların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. 0.0≤e/D≤0.125 aralığındaki bosluk oranlarında elde ettikleri sonuçların birbirine çok yakın olduğunu ve bu bosluk oranlarında boşluktan geçen akımın zayıf olduğunu ifade etmişlerdir. e/D=0.25 ve 0.375 için silindirin membasında oluşan ayrılma bölgesi boyutunun daha düşük boşluk oranlarına göre küçüldüğünü ve e/D'nin artmasıyla küçülmeye devam ettiğini, ve ayrıca zıt yönlü vortisitelere sahip, duvar sınır tabakası ile silindir alt yüzeyinden ayrılan kayma tabakasının birleştiğini, silindir üst yüzeyinden ayrılan kayma tabakasının ise periyodik bir vorteks davranışı sergilediğini, buna karşın silindir alt sınır tabakasında vorteks oluşmadığını belirtmişlerdir (Price vd. [29]). Orta boşluk oranları olarak nitelendirdikleri, e/D=0.5 ve 0.75 aralığında, silindirden ayrılan kayma tabakalarının tamamının kıvrılarak vorteks kopması deseni oluşturduğunu, ancak vorteks kopması frekansının, tabandan etkilenmeyen bir silindire göre daha büyük değerler aldığını, silindir mansabında duvardan ayrılan sınır tabakasının, periyodik bir biçimde silindirden kopan vortekslerle birleştiğini bildirmişlerdir. e/D=1.0, 1.5, 2.0 gibi daha geniş boşluk oranlarında, silindir etrafındaki akımın katı duvar ya da serbest yüzey etkisi olmayan izole bir silindir çevresindeki akıma daha fazla benzediğini, ayrıca silindir membasında duvardan ayrılma oluşmadığını, buna karşın e/D=1.0'de silindir mansabında, silindirden kopan vortekslerin duvar sınır tabakasını etkileyerek aynı frekansta ayrılmasına sebep olduğunu, bu durumun e/D oranı arttıkça azaldığını ve e/D=2.0'de silindir etrafındaki akımın izole bir silindir etrafındaki akımdan ayırt edilemez hale geldiğini bildirmişlerdir.

Hatipoğlu ve Avcı [30] düzenli bir akıntı durumunda kanal tabanı üzerinde veya kanal tabanına yarı gömülü halde bulunan bir silindir etrafındaki akımı Reynolds sayısının (Re= $U_c(D-B)/\nu$, U_c silindirden etkilenmeyen akıntı hızı, B gömülme derinliği) 13000 ve 26000 aralığında incelemişlerdir. Silindirin gömülme derinliğinin çapa oranının (B/D) farklı değerleri için memba ve mansap ayrılma bölgelerinin uzunlukları ile akım alanının özelliklerini deneysel ve teorik olarak belirlemişlerdir. Deneyleri akım görüntüleme tekniği ile akım içine bırakılan küçük parçacıkların hareketlerini izlemek suretiyle gerçekleştirmişlerdir. Bir CFD yazılımı olan Fluent paket programından elde edilen sayısal hesaplama sonuçlarını deneysel bulgularla karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sayısal ve deneysel sonuçlar, gömülme oranının artmasıyla birlikte silindir memba ve mansabında oluşan ayrılma bölgesi uzunluklarının azaldığını göstermiştir

Straatman ve Martinuzzi [31] geçirimsiz bir duvar yakınındaki kare silindir üzerinde, vorteks kopması oluşumuna sınır tabakasının etkisini bulabilmek amacıyla teorik bir çalışma yapmışlardır. Sonlu hacimler tekniğini kullandıkları çalışmalarını, $0.5 \le \delta /D \le 2.0$, $0.25 \le D \le 0.38$ aralıklarında gerçekleştirmişlerdir. Boşluk oranının azalmasıyla birlikte duvar sınır tabakası kalınlığının artmasının, vorteks kopması periyoduna dizginleyici bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, kare bir silindir için vorteks kopmasının bastırıldığı boşluk oranını e/D=1.5 olarak belirlemişlerdir. Ayrıca silindir ayrılma bölgesi genişliğinin azalmasına bağlı olarak silindir alt yüzeyindeki basınç dağılımının önemli ölçüde değiştiğini bildirmişlerdir.

Wu vd. [32] izole dairesel bir silindir etrafındaki sınır tabakasının ayrılma açısını, Re<280 değeri için teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrılma açılarının belirlenmesinde "soap-film" akım görüntüleme metodunu ilk defa kullanmışlardır. Bu yöntem ile ayrılma açılarının belirlenmesinde bilinen diğer bütün akım görüntüleme yöntemlerine göre daha hassas sonuçlar elde edilebileceğini savunmuşlardır. Literatürde bir çok araştırmacı tarafından ayrılma açıları için verilen, ayrılmanın birbirinden çok farklı ve geniş aralıklı deney yöntemlerinden, ayrılmanın düzensiz yapısından ve genellikle bu farklı ayrılma açılarına sebep olarak gösterilen blokaj oranından (D/h) kaynaklanmadığını öne sürmüşlerdir. Sayısal çözüm sonuçlarına dayanarak, 7 \leq Re_D \leq 200 aralığında, ayrılma açılarının zamansal ortalaması için $\theta_a=95.88+264.76x \text{Rep}^{-1/2}-$ 619.01xRep⁻¹+1042.4xRep^{-3/2} ifadesini vermişlerdir. Reynolds sayısı aralığında uydurulan bu eğrinin kareler ortalamasının karekökünün 0.0004 hata payına sahip olduğunu bildirmişlerdir (Wu vd. [32]). Elde ettikleri deney sonuçları ile teorik sonuçların birbiri ile uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

Testik vd. [33] düzlem bir tabana yatay yerleştirilmiş kısa dairesel bir silindir etrafındaki üç boyutlu kararlı ve salınımlı akım yapısını araştırmak için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Kararlı ve salınımlı akım durumunda Re=300–5300, KC=4–31 aralığında akım yapısını tanımlamak için akım görünürlüğü ile parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniğini kullanmışlardır.

Şekil 2.27'de kararlı akım durumunda iki farklı Re sayısında benzer profil-iz fotoğrafları görülmektedir. Şekil 2.27a'da Re sayısının 1500 değeri için silindirin çevresindeki üç vorteks yapısı belirtilmektedir. Beyaz okla gösterilen ilk vorteks pozitif yönde (saat yönünün tersi) dönmekte, silindirin mansabına bitişik olmakta ve hala gelişmektedir. Siyah okla gösterilen ikinci vorteks negatif yönde dönmekte (saat yönünde) ve beyaz okla gösterilen üçüncü vorteks ise pozitif yönde dönmektedir.

Şekil 2.27b'de Re sayısının büyük değerlerinde (=4500) bir vorteksin silindirin daha dar art-iz bölgesindeki sınırlı hareketi görülmektedir. Farklı Re sayısı için yapılan deneylerde Re sayının artmasıyla art-iz bölgesinin düşey yüksekliğinin azaldığı belirtilmiştir. Vorteksler saçılırken silindir yakınındaki art-iz bölgesinin yüksekliği titreşmekte ve bu vorteks eğrileri yatay bir düzlem ile açı yapmaktadırlar. Bu açı, α (vorteks ayrılma), ayrılmış pozitif vorteksin dış kenarı ile silindire teğet olan kesikli çizgilerin yatay ile yaptığı açı olarak adlandırılmakta ve Şekil 2.27a'da görülmektedir.



Şekil 2.27 Kararlı akım durumunda iki farklı Re sayısı için iz fotoğraflarının yandan görünüşü. Akım sağdan sola doğrudur. Deney parametreleri D = 3 cm, a) U = 5 cm s⁻¹, Re = 1500 (dny 5), b) 15, 4500 (dny 11). Beyaz kesikli çizgi vorteks ayrılma açısını (α = 0.49 rad) göstermektedir (Testik vd. [33])

Şekil 2.28'de farklı Re sayılarında a'nın değişimi görülmektedir.

$$\alpha = 90/\mathrm{Re}^{3/4} + 0.085 \tag{2.7}$$

Şekil 2.28 deki deneysel veriler Re sayısı arttığı zaman α 'nın sıfıra doğrı gitmediğini sabit bir asimptotik değer olan 0.085'e gittiğini göstermektedir.



Şekil 2.28 Kararlı akımda Re sayısının α'ya bağlı değişimi. Ölçüm hataları çubuk hataları ile gösterilmektedir (Testik vd. [33])

Şekil 2.29'da iz fotoğrafının üstten görünüşü ve akım çizgilerinin PIV ölçümlerinden elde edilen değerleri görülmektedir. Birbirine ters yönde dönen iki vorteks silindirin merkezinde karşılaşmakta ve art-iz bölgesinin yakınında G boyunda bir girdap bölgesi meydana getirmektedirler (Şekil 2.29a). Gözlemlerde saçılımın zaman periyodu dışında G değerinde önemli bir değişiklik görülmemektedir. Zaman periyotları içinde G'nin değeri önce artmakta ve daha sonra %15-%20 oranında azalmaktadır. Ayrıca silindir merkezinin yakınındaki girdap bölgesinin kenarı yavaşça salınmaktadır.



Şekil 2.29 Kararlı akım durumunda iz fotoğrafinın üstten görünüşü ve akım çizgileri. Akım yönü soldan sağa doğrudur. Ayrıca silindirin art-iz bölgesinin yakınında birbirlerine ters yönde dönen iki vorteks görülmektedir. Deneysel parametreleri; a) U =

 8 cm s^{-1} , D = 3 cm, Re = 2400 (dny 6) ve b) 5, 3,1500 (dny 5) (Testik vd. [33])

Şekil 2.30'da gözlem düzeyindeki ölçümler den (at the level observation) G'nin ortalama yarı kararlı değerleri verilmektedir. Şekil 2.30'da G \approx (2/3)L'nin Re sayısından bağımsız olduğu görülmektedir. Bu sonuç, vortekslerin şittetinin Re sayısı ile artmasına rağmen (Şekil 2.36) vorteks topolojisi içindeki bazı Reynolds sayılarının benzeşimi olarak yorumlanmıştır.



Şekil 2.30 Farklı Re sayılarında girdap bölgesine bitişik boyutsuz G/L uzunluğu. Kesikli çizgiler G/L = 2/3 değerini göstermektedir (Testik vd. [33])

Uzun bir silindir çevresinde meydana gelen iki boyutlu akım yapısı ve kısa bir silindir çevresinde meydana gelen üç boyutlu akım yapısı Şekil 2.27 ve Şekil 2.29'da görülmektedir. Bu etkiler dominant bir rol oynamakta ve vorteks yapılarını büyük ölçüde değiştirmektedir.

Şekil 2.31'de üst ve profil video kayıtları, iz fotoğrafları ve PIV ölçümlerine dayanılarak önerilen kısa bir silindir etrafında meydana gelen atnalı biçmindeki vorteksler üç boyutlu olarak görülmektedir. Ayrıca şekildeki vortekslerin çapı gerçek vortekslerin çapından oldukça küçüktür. Vorteks 1 ve vorteks 2 silindirden uzağa doğru gerilirken (stretch) silindir yakınında vorteks 3 meydana gelmektedir. Bu şekil Achenbach [34] tarafından verilen bir kürenin art-iz bölgesindeki vorteks yapısına benzemektedir. Gerçek bir akımda vorteksler Şekil 2.31'deki gibi oluşmayabilmektedir.

Bazen vortekslerin şekilleri bozularak daha karmaşık akım yapılarına sebep olmaktadırlar. Başlangıçta gelişen vorteksler silindirin uçlarına bağlı olmakta, zamanla vorteksler silindirden kopabilmekte ve yakın dar boyunlarından (kesikli çizgiler, Şekil 2.31a) tekrardan bağlanarak kapalı yüzük biçiminde vorteks yapısı (closed vorteks-ring-like) meydana gelmektedir. Ayrıca bu vorteksler akım ile taşınmaktadırlar.

Başlangıçta göreceli olarak geniş atnalı vorteksi üzerinde bir dar boyunun oluşmasının nedeni katı bir levhanın varlığından kaynaklanmaktadır (Şekil 2.32). Şekil 2.32 de levha üzerindeki birbirlerine ters yönde dönen iki vorteks gerçek atnalı vorteksinin iki bacağının düşey kesitini gösterirken levha altındaki vorteksler ise gerçek vortekslerin yansımasını göstermektedir. Şekildeki çarpı işareti, x, akım yönünün şekil düzlemi içine doğru olduğunu belirtmektedir. Hayali (kesikli) vortekslerin gerçek vorteksleri, oklarla gösterilen yönde, birbirlerine doğru itmesi sonucunda dar boyunlu bölge meydana gelmektedir (Şekil 2.32). Bu katı levhanın ilk etkisidir (Şekil 2.32, 1). Gerçek bir akışkanda levhada kayma olmadığı göz önünde bulundurulursa levhada ikincil vortisiti üretimi dikkate alınarak bu basit şekil değiştirilebilmektedir. Ayrıca Şekil 2.29'da silindirin art-iz bölgesinde akım çizgilerinin birbirlerine doğru hareket etmesi nedeniyle silindirden kaynaklanan vortekslerin bir araya getirildiği görülmektedir.



Şekil 2.31 Kararlı akım durumunda silindir çevresinde üç farklı vorteks oluşumunun üstten ve profilden görünümü (Testik vd. [33])



Şekil 2.32 Başlangıçta geniş atnalı vorteksi üzerinde boyun oluşum mekanizmasının açıklanması (Testik vd. [33])

Şekil 2.33 de PIV ölçümlerinin profilinden elde edilen iki atnalı vorteksinin düşey enkesiti ve yüzük biçiminde vorteks yapısının yeniden bağlanması görülmektedir. Akım

yönü sağdan sola doğrudur. Şekil 2.33a'da pozitif vortisinin (beyaz oklar) iki vorteksi görülmektedir. İlk vorteks silindirden saçılırken ikinci vorteks hala silindire yapışık ve gelişmektedir. Şekil 2.33b'de ilk saçılan vorteksin yakın dar boynundan yeniden bağlanarak yüzük biçiminde bir vorteks yapısı meydana getirdiği görülmektedir. Bunun sonucu olarak ters yönde (gri ok) bir vortisiti bölgesi gözlemlenmektedir. Şekil 2.33c'de ise yüzük biçimindeki akım yapısının (soldaki beyaz ve gri ok ile gösterilen vorteks çifti) mansaba doğru taşındığı ve ikinci vorteksin (sağdaki beyaz ok) silindirden kopmaya başladığı görülmektedir.

Şekil 2.34'de PIV ölçümlerinden elde edilen atnalı vorteksinin peş peşe iki hareketinin yatay en kesitleri görülmektedir. Şekil 2.34a'da bir bitişik atnalı vorteksinin en kesitlerini temsil eden birbirlerine ters vortisitinin iki parçasının meydana getirdiği vorteks çift yapısı görülmektedir. Şekil 2.34b'de ise zamanla vorteks çiftinin silindirden uzağa saçıldığı görülmektedir. Ayrıca saçılımdan sonra vortisitinin iki parçası yavaşça silindire doğru geri hareket etmektedir.



Şekil 2.33 PIV ölçümleri profili a) atnalı vorteksinin düşey en kesitini b) ve c) yüzük biçiminde vorteks yapısının yeniden bağlanmasını göstermektedir. Akım yönü sağdan sola doğrudur. U=2 cm s⁻¹, D=3 cm, Re=600 ve resimler arasındaki zaman aralığı 1.3s dir (Testik vd. [33])



Şekil 2.34 Atnalıvorteksinin yatay en kesitlerinde sol sütun PIV ölçümlerinden elde dilen hız alanlarını sağ sütun ise vortisitileri göstermektedir. a) silindirden uzağa saçılım, b) kararlı akım durumudur. Akım yönü soldan sağa doğrudur. Düz çizgiler pozitif vortisitilerin çevre çizgilerini, kesikli çizgiler ise negatif vortisitilerin çevre çizgilerini belirtmektedir (Testik vd. [33])

Atnalı vorteksinin farklı kesitlerinde sirkülasyonun aynı olduğu PIV ölçümleriyle doğrulanmaktadır. Şekil 2.35'de sirkülasyon oranı, Γ^*/Γ , farklı Re sayıları için PIV ölçümleri kullanılarak atnalı vorteksinin yatay Γ^* ve düşey Γ kesitleri ile hesaplanmaktadır.



Şekil 2.35 Sirkülasyon oranına karşılık Re sayısının değişimi (Testik vd. [33])

Şekil 2.36'da sadece profilden elde edilen veriler ile yapılan çeşitli deneylerde boyutsuz sirkülasyonun, Γ/v , Re sayısının bir fonksiyonu olduğu görülmektedir.

$$\Gamma/\nu = 4\text{Re} \tag{2.8}$$



Şekil 2.36 Re sayısının bir fonksiyonu olarak boyutsuz sirkülasyon. Kesikli çizgiler yaklaşımı göstermektedir (Testik vd. [33])

Ayrıca bütün deneylerde Re sayısının 0<Re<4000 aralığındaki vorteks saçılımları gözlemlenmiştir. Vorteks saçılımı boyutsuz Strouhal sayısı ile tanımlanmaktadır.

$$St = D/UT^*, T^* = 1/f_v$$
 (2.9)

Burada D boru çapı, U akım hızı, T_v^* vorteks saçılım periyodudur. Vorteks saçılım periyodunu belirlemek için iki metot kullanılmaktadır. İlki akım görüntüleme tekniği yardımıyla T_v^* değerinin ortalamasının doğrudan tahmin edilmesi ikincisi ise PIV ölçümleri kullanılarak silindirin mansap bölgesindeki kontrol alanı içinde ortalama vortisitinin zaman izlerinin incelenmesidir. Bu amaçla dar düşey bir kontrol alanı seçilmiştir. Saçılan vorteks bu kontrol alanından geçerken ortalama vortisiti artmakta, maksimuma ulaşmakta ve ortalama periyot tahmin edilmektedir. Ayrıca iki metot arasında bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.37'de akım görüntüleme tekniği ile elde edilen sonuçlara bakıldığında Re \geq 1000 değerinden sonra St sayısının değişmediği ve yaklaşık olarak 0.15 değerinde sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 2.37 Re sayısı ile St sayısının değişimi. Kesikli çizgiler Re sayısının küçük değerleri için beklenilen St değerleri (Testik vd. [33])

Bununla birlikte Re sayısının 300 den küçük değerleri için St sayısının değişimi araştırılmamıştır. Ancak vorteks saçılımının bittiği yerde Re sayısının bazı kritik değerleri altında St sayısının sıfıra yaklaşması beklenmektedir (kesikli çizgiler, Şekil 2.37).

Öner [35] çalışmasında, bir açık kanal içerisindeki D=50 mm çapındaki yatay dairesel bir silindir etrafındaki akımın hız alanının, yedi farklı boşluk oranı, e/D=0.0, 0.1, 0.2,

0.3, 0.6, 1.0, 2.0, ve Reynolds sayısı Re_D=4150 ve 9500 değerlerinde, parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniği ile deneysel olarak ölçmüştür. Farklı Reynolds sayısı durumları için boşluk oranlarının, hız dağılımı, duvar sınır tabakası ayrılması, silindir yüzeyindeki durma ve ayrılma noktası pozisyonları ve vorteks kopması frekansı gibi akım özelliklerine etkisini incelemiştir. Deneysel bulgular, $e/D\geq1.0$ durumunda silindir etrafındaki akıma tabanın etkisinin ihmal edilebilecek boyutta olduğunu göstermiştir. Ayrıca, e/D=0.3 ve Re_D=9500 için silindir etrafındaki akım alanı ANSYS paket programı ile sayısal olarak modellemiş ve hız dağılımları için elde edilen bulguların deneysel bulgularla uyumlu olduğunu göstermiştir.

2.1.2 Kararsız Akım Durumu

Son yıllarda salınımlı akım alanına yerleştirilmiş silindirler çevresindeki akım alanı ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki Sarpkaya [36] ve Sarpkaya ve Rojobi [37]'nin yapmış oldukları çalışmalardır. Bu çalışmaların amacı cidardan çeşitli mesafelere yerleştirilmiş silindirler üzerindeki direnç, atalet ve kaldırma hidrodinamik katsayılarını belirlemektir. Lundgren vd. [38] cidara yerleştirilmiş bir silindir etrafındaki basınç alanını ölçmüştür. Jacobsen vd. [39], Ali ve Narayanan [40], Justesen vd. [41] salınımlı akım etkisinde dairesel silindire tesir eden hidrodinamik kuvvetlerin cidar etkisi ile nasıl değiştiğini belirlemek için bir takım ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Bearman vd. [42], Singh [43], Grass ve Kemp [44], Bearman ve Graham [45], Bearman vd. [46] ve Williamson [47] cidardan uzakta silindirler etrafındaki vorteks saçılımlarının rejimlerini incelemişlerdir. Bu çalışmalar değişik rejimlerde karmaşık vorteks hareketlerini açıklamaya yöneliktir. Williamson [47] özellikle sistematik olarak vorteks art-iz bölgesini tanımlamaya çalışmıştır. Cidar yakınına yerleştirilmiş salınımlı akıma maruz silindirler etrafındaki akım alanı ile ilgili en detaylı çalışma Sümer vd. [7] tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmayı Bearman ve Zdravkovich [20]'in kararlı akım hali ile karşılaştırarak salınımlı akım halindeki akım yapısını tariflemişlerdir. Bu çalışmalarda pürüzsüz dairesel bir silindirin salınımlı akım etkisinde olması durumunda KC sayısı olarak adlandırılan ilave bir parametreye maruz kaldığı belirlenmiştir.

$$KC = \frac{U_m T_w}{D}$$
(2.10)

Burada, U_m , tabanda su partiküllerinin maksimum yörüngesel yatay hızı, T_w , salınımlı akımın periyodu, D ise boru çapıdır. Sinüzoidal akım da hız (2.11) ve maksimum hız (2.12) aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$U = U_{m} \sin(\omega t) \tag{2.11}$$

$$U_{\rm m} = a\omega = \frac{2a\pi}{T_{\rm w}}$$
(2.12)

Burada a, hareketin genliğini, ω ise hareketin açısal frekansını tanımlamaktadır.

$$\omega = 2f_w \pi = \frac{2\pi}{T_w}$$
(2.13)

Burada f_w, açısal frekansı tanımlamaktadır. Yörüngesel hızların sinüzoidal bir şekilde değiştiği kabul edilirse KC sayısı, $\frac{2a\pi}{D}$, dır.

Burada a, tabanda su partiküllerinin yörüngesel hareketinin genliği ve D ise silindirin çapını göstermektedir (Şekil 2.38).



Şekil 2.38 Hareketin genliği

KC sayısının küçük değerlerinde su partiküllerinin yörüngesel hareketi silindirin toplam genişliğine göre küçük olmaktadır. Çok küçük KC sayılarında silindirin gerisinde her zaman sınır tabakadan ayrılma görülmemektedir. Büyük KC sayılarında su partikülleri silindirin toplam genişliğine göre daha uzun mesafelerde hareket etmektedir. Çok büyük KC sayılarında (KC $\rightarrow\infty$) hareketin her bir yarım periyodu için akım kararlı akım durumuna benzeyebilmektedir.

Şekil 2.39'da Re sayısını 10^3 değeri için KC sayısının sıfırdan itibaren artması ile akım içinde meydana gelen değişmeler görülmektedir. Burada, daha önce bahsedildiği gibi Re sayısı, Re = $\frac{DU_m}{v}$, olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.39'da KC sayısının çok küçük değerlerinde ayrılma görülmemektedir. KC sayısı artarak 1.1 değerini aldığında Honji

stabilitesizliği formundaki ilk ayrılma meydana gelmektedir (Şekil 2.40 ve Şekil 2.41). KC sayısı 1.1 değerine ulaştığında silindir yüzeyi üzerindeki iki boyutlu akım yapısının tamamı aniden eşit aralıklı üç boyutlu akım yapısına zorlanmakta ve silindir yüzeyinde düzenli izler oluşmaktadır. Bu izler akım geriye dönmeden önce her yarım periyotta ayrılmaya maruz kalmakta ve ayrılan her iz mantar biçiminde vorteks şekillenmesine neden olmaktadır. Bu olay ilk önce Honji [48] daha sonra da Sarpkaya [49] tarafından belirtilmiştir. Hall [50] lineer stabilite analizi yaparak verilen bir Re sayısında KC sayısının kritik değeri üzerindeki eksenel periyodik vorteksler (Şekil 2.40, Vorktes B) için salınımlı viskoz akımın stabilitesiz hale geldiğini göstermiştir.

KC sayısının 1.1<KC<1.6 gibi dar bir aralığında, (akım rejimi) Honji stabilitesizliği şeklindeki ayrılmanın olduğu Şekil 2.39b'de görülmektedir. KC sayısının artmasıyla akım rejiminde bitişik bir çift simetrik vorteks biçiminde ayrılma başlamaktadır (Şekil 2.39c ve Şekil 2.39d).

KC sayısının 4<KC<7 aralığında iki bitişik vorteks arasındaki simetri bozulmaktadır (vorteksler hala bitişik ancak saçılım yok). Bu akım rejiminin en önemli özelliği ise bitişik vorteksle arasındaki asimetriden dolayı kaldırma kuvvetinin sıfır olmamasıdır. KC>7 durumunda ise vorteks saçılımı meydana gelmektedir.

a		Ayrılma yok. Sürtünme (laminer) akım.	KC < 1.1	
b	\bigcirc	Honji vorteksleri ile ayrılma.	1.1 < KC < 1.6	
c		Bir çift simetrik vorteks.	1.6 < KC < 2.1	
d	A	Bir çift simetrik vorteks. Silindir yüzeyi türbülanslı (A).	2.1 < KC < 4	
e		Bir çift asimetrik vorteks.	4 < KC < 7	
f		Vorteks saçılımı.	7 < KC Saçılım rejimleri	

Şekil 2.39 Pürüzsüz dairesel bir silindir etrafında salınımlı akım etkisindeki akım rejimleri KC<4 (Sarpkaya [49]), KC>4 (Williamson [47]), Re=10³



Şekil 2.40 Mantar şeklinde vorteks formunda ayrılma (Honji [48])



Şekil 2.41 Mantar şeklinde vorteks ayrılması (Honji [48])

Şekil 2.42'a KC sayısının 1.6<KC<4 aralığındaki akım rejiminde, bitişik bir çift simetrik formda vorteks ayrılmasının zamanla değişimi görülmektedir. Silindirin gerisinde oluşan vortekslerin (vorteks M) ilk yarım periyodun sonunda silindir üzerinden süpürüldükleri, yeni oluşan vorteksler (vorteks N) ile eşleşerek vorteks çiftlerini oluşturdukları ve bu vorteks çiftlerinin kendilerinin sebep olduğu hız alanları ile silindirden uzaklaştıkları görülmektedir (Şekil 2.42).



Şekil 2.42 1.6<KC<4 akım rejiminde (Re=10³) kamera ile görüntülenen vorteks hareketlerinin gelişimi (Williamson [47])

Vorteks saçılım rejimleri Bearman vd. [42], Singh [43], Grass ve Kemp [52], Bearman ve Graham [53] ve en son Williamson [47] tarafından diğer araştırmacılara nazaran daha kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Özellikle, Willamson [47] vortekslerin yörünge hareketlerini oldukça sistemli bir şekilde tanımlamıştır.

KC sayısının 7<KC<15, 15<KC<24, 24<KC<32 vb. farklı akım rejimlerinde vorteks saçılımı meydana gelmektedir.

KC sayısının 7<KC<15 aralığı akıma dik vorteks sokağı rejimi olarak bilinmektedir. Şekil 2.43'de bu rejime ait vorteks hareketlerinin zamanla gelişimi görülmektedir. Şekil 2.43a'da sadece vorteks N saçılımı ve silindirin diğer kenarındaki vorteks M gelişimi görülmektedir (Çerçeve 1). Akım geriye döndüğünde her iki vorteks silindir üzerinde süpürülmektedir (Şekil 2.43a, Çerçeve 2). Yarım periyodun ilerlemesi ile vorteks M saçılarak serbest bir vorteks haline gelmekte, N vorteksi ile birlikte bir vorteks çifti oluşturmakta ve kendilerinin neden olduğu hız alanı ile silindirden uzaklaşmaktadırlar (M + N). Ayrıca her bir tam periyodun sonunda bir vorteks çiftinin silindirden taşındığı açıkça görülmektedir. Bu nedenle Williamson [47] bu rejimi tek çift akım rejimi olarak (single-pair regime) adlandırmıştır. Şekil 2.44'de silindirin alt kenarında akıma dik doğrultuda oluşan bir vorteks sokağı görülmektedir. Silindire göre vorteks sokağının konumu, silindir üzerindeki kaldırma kuvvetinin davranışı bakımından önemli olmaktadır. Asimetriden dolayı bu akım rejiminde ortalaması sıfırdan farklı bir kaldırma kuvveti mevcut olmaktadır.

KC sayısının 13<KC<15 aralığında silindirin sadece bir kenarında ve her periyodun 45° değerinde vorteks çiftleri salınımlı akım yönünde taşınmaktadır (Şekil 2.43b).

Şekil 2.43 a ve b'de hareketin bir periyodunda daima bir vorteks çiftinin (sırasıyla, M+N, ilk periyot da N+R ve ikinci periyotta (P+Q)) silindirden taşındığı görülmektedir.



Şekil 2.43 Silindirden tek çift simetrik vorteks taşınımı (Williamson [47])



Şekil 2.44 KC=12 için art-iz bölgesinde akıma dik vorteks sokağı oluşumu, oklar akım yönünü göstermekte (Williamson [47])

Şekil 2.45'de KC sayısının 15<KC<24 aralığında vorteks hareketlerinin zamanla gelişimi görülmektedir. Bu akım rejiminde iki vorteks çifti silindirden taşındığı için iki çift akım rejimi (double-pair regime) olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.45 15<KC< 24 N+M ve P+Q vorteks çiftlerinin silindirden taşınımı (Williamson [47])

Şekil 2.46'da KC saysının 24<KC<32 aralığında vorteks hareketlerinin zamanla gelişimi görülmeketdir. Bu akım rejiminde üç vorteks çifti silindirden taşınmaktadır.

KC sayısını 32<KC<40 aralığında dört çift, 40<KC<48 aralığında ise beş çift vorteks silindirden taşınmaktadır.



Şekil 2.46 24<KC<32 P+Q, N+R ve S+T vorteks çiftlerinin silindirden taşınımı (Williamson [47])

KC sayısı artarak daha yüksek rejimlere ulaştığı zaman tam bir periyotta en az iki vorteks saçılımı meydana gelmektedir. Bu ise salınımlı akımlardaki Strouhal sayısının bir sonucudur.

Akımın geriye dönmesi nedeniyle salınımlı akımlar içindeki vorteks saçılım frekansını tanımlamak oldukça zor olmaktadır. Şekil 2.47 ve Şekil 2.48'de vortekslerin hareketleri ve bir silindir üzerindeki kaldırma kuvveti davranışının zamanla değişimi görülmektedir.

Şekil 2.47'de her yarım periyod da bir vorteksin saçılması ve gelişmesi (vorteks N, çerçeve 1 ve vorteks M, çerçeve 4) negatif piklere (A ve C), akımın geriye dönmesi ile en son saçılan vorteksin silindire doğru geri dönmesi ise pozitif piklere (B) neden olmaktadır. Vorteks saçılımının, kaldırma kuvvetinin zaman ile değişimi serisindeki bütün piklerin kaldırma kuvveti oluşmasına neden olmadığı görülmektedir.

Şekil 2.48'de vorteks saçılması A, B, D, E, G, H piklerine, akım terse döndükten sonra sadece en son saçılan vorteksin silindire doğru geri dönmesi ise C ve F piklerine neden olmaktadır.

Bir kural olarak kaldırma kuvvetindeki piklerin bir kısmının sadece akımın terse dönmesiyle oluştuğu, en son saçılan vorteksin silindire doğru geri dönmesi ile ilişkili olduğu ve geriye kalan piklerin de vorteks saçılımıyla ilişkili olduğu söylenebilmektedir. Bu nedenle, salınımlı akımda kaldırma kuvveti frekansı ile vorteks saçılım frekansının aynı olmadığı açıkça belli olmaktadır.



Şekil 2.47 KC = 12 için kaldırma kuvvetinin zaman ile değişimi (Williamson [47])



Şekil 2.48 15<KC<24 aralığın da kaldırma kuvvetinin zaman ile değişimi (Williamson [47])

Kaldırma frekansını tanımlamanın bir yolu da kaldırma kuvvetinin güç spektrumunu elde etmek ve dominant frekansı belirlemektir. Bu frekans ise ana kaldırma frekansı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.49'da farklı KC sayıları için güç spektrumu gösterilmektedir. Burada ϕ_L kaldırma kuvvetinin güç spektrumunu, σ^2 kaldırma kuvvetinin varyansını, $N_L = \frac{f_L}{f_W}$ ise salınımlı akım frekansıyla normalleştirilmiş ana

kaldırma frekansını temsil etmektedir. Burada f_L , kaldırma frekansını, f_w ise dalga yada salınımlı akımın frekansını ifade etmektedir. Şekil 2.49'da KC sayısının 7, 9, 11 ve 12.5 değerlerinde $N_L=2$ (her akım periyodunda kaldırma kuvveti içinde 2 salınım), KC sayısının 12.5 ve 14 değerleri arasında bir yerlerde $N_L=3$, KC saysının 14 ve 16 değerlerinde $N_L=3$ (kaldırma kuvveti içinde 3 salınım) olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 2.50'de KC = 16 için kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 2.49 Re = 5 x 105 için kaldırma kuvvetinin güç spektrumu (Justesen [41])



Şekil 2.50 Re=5x10⁵ değerinde KC = 16 için güç spektrumuna benzer kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi (Justesen [41])

Williamson [47] β =Re/KC oranını 255 ve 730 aralığında sabit tutarak bir dizi deney yapmıştır. KC sayısının artmasıyla ana kaldırma frekansının arttığı Çizelge 2.1'de görülmektedir

Williamson [47] deneysel çalışmasında KC=15 iken N_L değeri 2'den 3'e değişirken Justesen [41]'nin deneysel çalışmasında KC=13 için N_L 2'den 3'e değişmektedir. Bu fark KC sayısının Re sayısına bağlı olmasından kaynaklanmaktadır.

KC rejimi	KC aralığı	Re aralığı	NL
Tek çift	7 <kc<15< td=""><td>$1.8 - 3.8 \times 10^3$</td><td>2</td></kc<15<>	$1.8 - 3.8 \times 10^3$	2
İki çift	15 <kc<24< td=""><td>$3.8-6.1 \times 10^3$</td><td>3</td></kc<24<>	$3.8-6.1 \times 10^3$	3
Üç çift	24 <kc<32< td=""><td>$6.1 - 8.2 \times 10^3$</td><td>4</td></kc<32<>	$6.1 - 8.2 \times 10^3$	4
Dört çift	3 <kc<40< td=""><td>$8.2 - 10 \times 10^3$</td><td>5</td></kc<40<>	$8.2 - 10 \times 10^3$	5

Çizelge 2.1 (Willamson [47])'ın deneysel çalışmalarında elde edilen ana kaldırma frekansları

Şekil 2.51'de KC sayısının 3'den küçük olması durumunda (KC< 3) Re sayısının rolü tanımlanmaktadır. Şekildeki eğriler ayrılmanın başlangıcını temsil etmektedir. Ayrıca eğrilerin Re=5'e doğru asimptotik yaklaşmaları beklenilmektedir. Re sayısı 4×10^3 den daha büyük değer aldığında Honji şeklindeki ayrılmadan sonra KC sayısındaki bir artma ile ayrılmamış akım rejimi tekrar görülmektedir (Şekil 2.51a'). Bu durumun nedeni ise sınır tabakası içindeki akımın türbülansa geçiş yapmasıyla birlikte sınır tabakadan ayrılmanın gecikmesidir. Ayrıca ayrılmamış akım halinde silindir üzerindeki sınır tabaka artık tam viskoz olmayıp türbülanslı olmaktadır (Şekil 2.51a'). Ayrılmamış akıma geçiş halinde ise bir çift simetrik vorteks meydana gelmektedir.



Şekil 2.51 Salınımlı akım etkisinde KC < 3 için pürüzsüz dairesel bir silindir etrafındaki akım rejimleri (daireler (Sarpkaya [49]) çarpılar Re < 1000 için (Honji [48]) ve Re>1000 için (Sarpkaya [49]))

KC sayısının 3'den büyük olması durumunda (KC > 3) Re sayısının etkisinin ne olacağı ile ilgili mevcut veriler halen yeterli değildir. (Sarpkaya [36]), (Williamson [47]) ve
Justesen [41]'nin verileri ile birlikte Re sayısının artması durumunda meydana gelecek değişiklikler açıklanabilmektedir (Şekil 2.52).

Vorteks saçılım rejimlerine gelince eğrilerin $\text{Re}=10^5$ değerine yaklaşırken bükülmeye başladıkları Şekil 2.52'de açıkça görülmektedir. Bu durum Re sayısı artarken normalleştirilmiş kaldırma frekansının, N_L, artmasından kaynaklanmaktadır.

Tatsumo ve Bearman [54] düşük KC ve düşük β (=Re/KC) sayılarında yaptıkları akım görünürlüğü çalışmasının detaylı sonuçlarını vermişlerdir.

Sümer vd. [7] salınımlı akıma maruz kalmış bir silindir etrafındaki akım rejimleri üzerinde cidar yakınlığının etkisini belirlemek için vorteks hareketlerini, akım görünürlüğü tekniği ve kuvvet ölçümleri ile birlikte araştırmışlardır. Bu çalışmada Re sayısı aralığını akım görünürlüğü deneyleri için 10^3-10^4 ve kuvvet ölçümleri için $0.4 \times 10^5-1.1 \times 10^5$ olarak seçmişlerdir.



Şekil 2.52 Salınımlı akım durumunda pürüzsüz dairesel bir silindir etrafındaki vorteks saçılım rejimleri (Çizgiler (Sarpkaya [36]) ve (Williamson [47]), kareler (Justesen [41]))

Şekil 2.53'de açıklık oranının, e/D, (e, cidar ve silindir arasındaki mesafe) üç farklı değeri için salınımlı hareket boyunca vortekslerin gelişimi görülmektedir (KC=4). Açıklık oranının, e/D=2 olması durumundaki vortekslerin şekli ve hareketlerindeki simetri (Şekil 2.53a), e/D=0.1 olması durumunda bozulmaktadır (Şekil 2.53b).

Şekil 2.54'de açıklık oranının, e/D=2 değeri için silindir üzerinde kaldırma kuvvetti etkisinin olmadığı ancak e/D=0.1 değeri için silindir üzerinde sıfırdan farklı kaldırma kuvvetinin olduğu görülmektedir.

$$F_{\rm L} = \frac{1}{2}\rho C_{\rm L} D U_{\rm m}^2 \tag{2.14}$$

Burada C_L kaldırma katsayısıdır.

Açıklık oranının, e/D, sıfır olması durumunda ilk yarım periyotta silindirin arkasında bir vorteks gelişmekte ve ikinci yarım periyotta silindirin üzerinden süpürülmektedir (Şekil 2.53c). Kaldırma kuvveti pikleri silindir üzerinde süpürülen vorteks (vorteks K, vorteks L gibi., Şekil 2.53c) olayları ile ilişkilidir (Şekil 2.54c).



Şekil 2.53 KC = 4 için a) e/D = 2, b) e/D = 0.1, c) e/D = 0 farklı açıklık oranlarında vorteks hareketleri (Sümer vd. [7])



Şekil 2.54 KC=4 için kaldırma kuvveti izleri (Sümer vd. [7])

7<KC<15 rejiminin en önemli özelliği bir silindirin serbest cidar tarafında akıma dik vorteks sokağı oluşmasına neden olacak vortekslerin saçılmasıdır (Şekil 2.43a ve Şekil 2.44). (Sümer vd. [7]) cidar ve silindir arasındaki açıklığın silindir çapının 1.7–1.8 katından daha az olması durumunda enine sokak rejiminin ortadan kalktığını yaptıkları çalışmalarla göstermişlerdir. Şekil 2.55a ve Şekil 2.55b iki farklı vorteks akım rejimini göstermektedir. İlkinde açıklık oranının kritik değer (enine sokak rejimi yada akıma dik) üzerinde olduğu ikincisinde ise açıklık oranının bu kritik değerin altında olması durumunda salınımlı akım doğrultusuna paralel bir art-iz bölgesi enine vorteks sokağı ile yer değiştirmektedir.

Açıklık oranının, e/D, 1 değeri için Şekil 2.56a, hareketin bir yarım periyodu boyunca vorteks hareketlerinin zamanla değişimini ve Şekil 2.57b ise kaldırma kuvvetinin değişimini göstermektedir. Şekil 2.56a hareketin bir yarım periyodunda sadece tek bir vorteksin saçıldığını (vorteks L) belirtmektedir. K vorteksinin gelişmesi silindir üzerinde Şekil 2.57b'deki negatif pike, B, neden olmaktadır, ($\omega t=0^{\circ}-45^{\circ}$).



Şekil 2.55 KC=10 için vorteks hareketlerinin değişik rejimleri a) e/D = 3.5, b) e/D = 1, c) e/D = 0.1, d) e/D = 0 (Sümer vd. [7])

K silindir üzerinde süpürülürken ve vorteks L gelişirken silindir üzerinde pozitif bir kaldırma kuvveti meydana gelmektedir (Şekil 2.57b, C). Vorteks L silindirden uzaklaşırken ($\omega t=135^{\circ}-150^{\circ}$) silindir üzerindeki pozitif kaldırma kuvveti azalmaktadır.

Açıklık oranı, e/D = 0.1 değerinde serbest akım bölgesinde bir önceki hale benzer saçılımlar meydana gelirken cidar tarafında N vorteksi gelişmekte ve silindirin üst tarafına doğru süpürülmektedir. Pozitif kaldırma kuvveti L vorteksinin gelişmesi ile oluşmakta (Şekil 2.57c, D) buna karşın N vorteksi ile açıklık içinde yüksek hızla geriye dönen akım negatif kaldırma kuvvetine neden olmaktadır (Şekil 2.57c, E).



Şekil 2.56 7< KC< 15 aralığında vorteks hareketlerinin gelişimi, a) e/D=1, b) e/D=0.1, c) e/D=0, (Sümer vd. [7])

Açıklık oranı, e/D=0 için ilk yarım periyotta silindirin gerisinde K vorteksi (Şekil 2.56c) gelişmekte ve yeni oluşan L vorteksi ile birlikte bir vorteks çifti oluşturarak, kendiliğinden oluşan hız alanları nedeniyle silindirden uzaklaşıp mansap bölgesine taşınmaktadır (Şekil 2.56c, $\omega t = 40^{\circ} - 120^{\circ}$). L vorteksinin kopmasıyla silindirin gerisinde yeni bir M vorteksi gelişmektedir.

Araştırmacılar cidar üzerine yerleştirilmiş silindirler için vorteks rejiminin KC'nin diğer değerlerinde de benzerlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Kaldırma kuvvetinin pik değerleri K vorteksinin silindir üzerinden geçişi sırasında meydana gelmektedir (~40°).



Şekil 2.57 7<KC<15 aralığında kaldırma kuvveti izleri (Sümer vd. [7])

KC rejiminin 15<KC<24 aralığında e/D=1 için silindirin serbest cidar tarafında yarım periyotlar arasında simetrik bir vorteks hareketi meydana gelmektedir (Şekil 2.58a). Ayrıca her bir yarım periyotta silindirin serbest akış kenarı ve cidar kenarı arasında gidip gelen vorteksler silindirin üzerinden süpürülmektedir. Şekil 2.59b'de ise kaldırma kuvvetindeki asimetrik değişim görülmektedir.

e/D=0.1 için akım asimetriktir. Bu durumda yeni bir yarım periyot da ters akım başlamadan önce cidar kenarındaki vorteks (P, Şekil 2.58b) silindir üzerinden süpürülmektedir. Çoğu zaman cidardan serbest akım bölgesine doğru kaldırma kuvveti etkimektedir (Şekil 2.59c). Kaldırma kuvvetinin zaman ile değişiminde kısa süreli pikler (F, G) Şekil 2.59c'de görülmektedir. Bu pikler vortekslerin gelişimi ile meydana gelmekte ve silindirin cidar kenarındaki vorteks saçılımından etkilenmektedir (Şekil 2.58b, ω t=50°–60° ve ω t=80°–93°). Açıklık oranının 0.3 değerinden küçük olması durumunda kaldırma kuvveti asimetrik bir hal almakta ve cidardan uzaklaşan yönde etkimektedir (Şekil 2.60). Vorteks saçılımının neden olduğu kısa süreli pikler e/D=0.05

gibi çok küçük açıklıklarda bile görülmektedir. Vorteks saçılımının kararlı akım halinde açıklık oranının 0.3 değerine kadar devam ettiği bilinmektedir.

e/D=0 için 7<KC<15 aralığında görülen benzer şekildeki vorteks hareketleri meydana gelmektedir. Ancak vorteks çiftleri bu durumda daha uzun mesafe kat etmektedir. Kaldırma kuvveti 7<KC<15 rejimindekine benzemekte ancak pikler biraz daha erken meydana gelmektedir. KC>4 değerlerinde ise vorteks saçılım sayısındaki değişim haricinde akım yapısı bir önceki hale benzer tarzda gelişmektedir.



Şekil 2.58 15 < KC < 24 aralığında vorteks hareketlerinin gelişimi a) e/D=1, b) e/D= 0.1, c) e/D=0 (Sümer vd. [7])

Araştırmacılar Şekil 2.61'de görüldüğü gibi çeşitli açıklık oranları için yapmış oldukları çalışmalardan vorteks saçılımının KC değerine göre değişimini inceleyerek şu sonuçlara varmışlardır.



Şekil 2.59 15<KC<24 aralığında kaldırma kuvveti izleri (Sümer vd. [7])

- a) Kararlı akım durumunda KC sayısının büyük, e/D'nin 0.25 den küçük değerlerinde vorteks saçılımı cidar tarafından sönümlendirilmektedir.
- b) Şekil 2.61'de görüldüğü gibi açıklık oranının daha küçük değerlerinde bile KC sayısının 10–20 aralığında vorteks saçılımı söz konusudur. Kısa süreli piklerin vorteks saçılımı ile ilişkili oldukları belirtilmektedir (Şekil 2.60). Çok küçük açıklık oranlarında bile, e/D, vorteks saçılımlarının oluşma nedeni dalga etkisinden kaynaklanan büyük basınç gradyanından dolayı küçük KC sayılarındaki salınımlı akım durumunda silindirin cidar tarafından geçen suyun debisinin kararlı akım durumundakinden daha büyük olmasıdır.



Şekil 2.60 15<KC<24 ve 0.05≤e/D≤ 0.4 aralıklarında kaldırma kuvveti izleri (Sümer vd. [7])



Şekil 2.61 Vorteks saçılımının sönümlendirildiği bölgeyi gösteren diyagram. Açık semboller: Vorteks saçılımları bastırılıyor, dolu semboller: Vorteks saçılımları mevcut (Sümer vd. [7])

Şekil 2.62'de Strouhal sayısının (St) e/D oranları için değişimi verilmiştir. Aslında vorteks saçılım frekansı (f_v) salınımlı akımın periyodu boyunca değişmektedir. Burada tanımlanan St sayısı yeteri uzunlukta bir zaman aralığı boyunca alınmış ortalama değerlerdir.



Şekil 2.62 Açıklık oranına karşı Strouhal sayısı (St). 0, KC=20; Δ , KC=30; \Box , KC=55; ∇ , KC=65 (Sümer vd. [7])

Şekil 2.63'de e/D'nin büyük değerleri için belirlenmiş St₀ sayısı ile normalleştirilmiş St/St₀ oranının e/D oranı ile değişimi görülmektedir. Bu şekilde ayrıca, kararlı akım ile ilgili değerler de işlenmiştir. Sümer vd. [7] gerek Şekil 2.62 ve gerekse Şekil 2.63 den şu sonuçları elde etmişlerdir.

- a) Verilen bir e/D oranı için KC sayısı azaldıkça St sayısı artmaktadır
- b) Silindir cidara yaklaşırken e/D'ye karşılık çizilen St/St₀ eğrisi mevcut gidişinden sapma göstermektedir.
- c) Açıklık oranı azaldıkça St sayısı artmaktadır. Cidara oldukça yakın yerleştirilen silindir için bu artış daha belirgindir (e/D=0.1–0.2). Çünkü cidarın mevcudiyeti, cidar tarafındaki vortekslerin serbest akım tarafındaki vortekslere daha yakın oluşmasına neden olmaktadır. Bu olayın sonunda, iki vorteks hızlı bir şekilde etkileşmekte ve daha büyük St frekansına sebep olmaktadır.



Şekil 2.63 Açıklık oranının fonksiyonu olarak normalleştirilmiş Strouhal sayısı, O, KC =20; Δ, KC=20; □, KC=55; ∇, KC=65; x, kararlı akım (Raven vd.[55]); - - - kararlı akım (Grass vd. [22]), (Sümer vd. [7])

Sümer vd. [7]) tarafından bir silindir etrafındaki kararsız akım yapısı için şu önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- a) KC<4-5 değerlerinde; cidardan uzak bir silindir için, vorteks hareketleri ve şekillenmelerdeki simetri, silindirin cidara yaklaşması ile kaybolmaktadır.
- b) Cidardan uzak silindir etrafındaki vorteks rejimi, açıklık oranı e/D'nin 1'in altına düştüğünde önemli değişmeler göstermektedir.
- c) 7<KC<13 değerlerinde, cidardan uzak silindir için akım doğrultusuna dik vorteks saçılımı gözlenmekte, bu açıklık oranı 1.7'nin altına düştüğünde kaybolmaktadır.
- d) Küçük açıklık oranlarında vorteks saçılımı sönümlendirilmekte ve bu sönümlendirme KC'nin artan değeri ile artmaktadır. Küçük KC değerlerinde (10-20 gibi) açıklık oranının küçük değerlerinde bile (0.1 gibi) vorteks saçılımına rastlanmaktadır. Saçılım frekansı e/D'nin bir fonksiyonu olup e/D'nin azalması ile artmaktadır.
- e) Silindir cidara yaklaştıkça duvardan uzaklaşan yönde kısa süreli kaldırma kuvveti pikleri meydana gelmektedir. Bu pikler, silindirin cidar tarafında saçılan vortekslerle ilgilidir.

f) Silindir cidara tam değdiğinde, akım tipinin ana karakteristikleri her bir yarım periyodda silindirin art-iz bölgesinde vorteks çifti şekillenmesidir. Bu vorteks çiftleri silindirden kararlı bir biçimde akımın yarım periyotluk süresi içinde uzaklaşmaktadır. Kaldırma kuvvetindeki en büyük pik, art-iz bölgesindeki vorteksin silindirin üzerinden süpürülmesi ile meydana gelmektedir.

Salınımlı akım etkisinde gözlenen atnalı vorteksleri kararlı akım etkisinde gözlenen atnalı vortekslerine benzemektedir. Akım yapısı oldukça karmaşık oluşmakta ve vorteksler silindirin her iki kenarında periyodik bir şekilde meydana gelmektedir. Akımın geriye dönmesiyle silindirin bir kenarında oluşan vorteks silindirin diğer tarafına süpürülmekte ve burada oluşan yeni vorteks ile etkileşmektedir (Testik vd. [33]).

Şekil 2.64'de salınımlı akım durumunda bir çeyrek periyot süresince ard ardına üç adet iz fotoğrafi görülmektedir. Şekil 2.64a'da akım sağdan sola maksimum hızla hareket etmektedir. Şekil 2.64b'de akım yavaşlamakta ve akım hızı azalmaktadır. Şekil 2.64c'de ise akım durmakta ve sağa doğru hareket etmeye başlamaktadır. Şekil 2.64a'da anlık Re sayısı maksimum olduğu zaman art-iz bölgesi oldukça dar olmakta ve art-iz bölgesinde sıkıştırılan pozitif vorteks (saatin ters yönü) ok ile gösterilmektedir. Şekil 2.64b'de akım hızının azalmasıyla art-iz bölgesinin genişlediği, pozitif vorteks boyutunun artarak cidardan uzaklaştığı görülmektedir. Şekil 2.64c'de akım hızının azaldığı, art-iz bölgesinin bozulduğu ve art-iz bölgesi hala genişlemeye devam ederken pozitif vorteksin cidardan uzaklaştığı görülmektedir. Ayrıca akımın geriye dönmesiyle silindirin diğer tarafında yeni bir negatif vorteks oluşmakta ve akım hızının artmasıyla negatif vorteksin şiddeti de artmaktadır. Aynı zamanda akımın geriye dönmesiyle daha önce oluşan pozitif vorteks silindirin üzerinden süpürülmekte ve negatif vorteks ile etkileşmektedir. Bu olay periyodik bir şekilde tekrarlanmaktadır.

Ne yazık ki araştırmacılar, negatif ve pozitif vortekslerin etkileşimini, oluşturdukları vorteks çift yapısını göstermeyi ve yeterli iz fotoğraflarını elde etmeyi başaramamışlardır. Şekil 2.65'de vortisiti alanı içindeki akım yapıları görülmesine rağmen hız alanı (iz görüntüleri) içinde bu akım yapıları fark edilebilir bir şekilde görülmemektedir. Şekil 2.65'de salınımlı yarım periyod için PIV ölçümlerinden elde edilen dört çift kesit gösterilmekte ve görüntülerin her çiftinde hız (üst), vortisiti (alt) verilmektedir (a-d). a) akımın durmadan önce soldan sağa doğru hareket ettiği ve

azaldığı, b) akımın ters yönde hareket etmeye başladığı, c) akımın maksimum hız ile sola doğru hareket ettiği, d) akımın azaldığı görüntü çiftlerinde verilmektedir. Şekil 2.65b'de gösterilen kesikli çevre çizgileri dışında hız alanları içindeki vorteks çiftine benzer akım yapısı tanımlanamamaktadır. Ancak bu akım yapısı vortisiti alanı içinde kolayca tanımlanmaktadır. Şekildeki vortisiti alanlarına bakıldığında birbirlerine ters yönde dönen vortisitinin iki parçasının ok ile belirtilen yönde hareket ettiği görülmektedir. (a-d). Akım yapısındaki pozitif (üstteki) vorteks negatif vorteks den daha güçlü olduğundan bu yapı eğrisel bir yörünge boyunca sağa ve yukarıya doğru hareket etmektedir.



Şekil 2.64 Salınımlı akımın çeyrek bir periyodunda iz fotoğrafları, a) akım sağdan sola doğru maksimum hızla hareket etmekte, b) akım yavaşlamakta, c) akım yönü değişmeden önce akım durmakta, görülmektedir. Oklar vortisleri işaret etmektedir. Deney parametreleri; D=2cm, Re=4500, KC=28 dir (Testik vd. [33])

Araştırmacı gözlemlere ve PIV data sonuçlarına dayanarak salınımlı akım durumunda Şekil 2.66'daki vorteks hareketlerini önermişlerdir. Akım sağdan sola doğru hareket ederken silindirin sol tarafında vorteks LF meydana gelmektedir. Akım yönü değiştiğinde silindirin sağ tarafında vorteks RI oluşmaktadır. Aynı zamanda vorteks LF silindirin üzerinden süpürülmekte, vorteks RI ya doğru hareket etmekte ve yeni konumda LF^{*} olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.66b). Vorteks RI ve LF^{*} düşey



düzlemde birbirlerine ters yönde hareket etmekte ve Şekil 2.67'deki vorteks çiftine benzer akım yapısı gibi görülmektedir.



akım (soldan sağa) azalmakta ve durmakta, b) akım ters yönde hareket etmeye başlamakta, c) akım solda maksimum hıza ulaşmakta, d) akım azalmaktadır. Görüntüler arasındaki zaman farkı 0.6 s dir. Şekil b deki hız dağılımında kesikli çizgiler vorteks çift yapısını göstermektedir. Deney parametreleri: D=3 cm, Re=1560, KC=8.4 dür (Testik vd. [33])



Şekil 2.66 Salınımlı akım etkisinde atnalı vorteksinin silindirin bir kenarından diğer kenarına süpürülmesinin şematik gösterimi. Akım sağdan sola doğru hareket ederken vorteks LF silindirin sol kenarından meydana gelmektedir. Akım yönünün değişmesiyle vorteks RI silindirin sağ kenarında oluşurken vorteks LF de (kesikli çizgi ve eğrisel yörünge hareketi) silindirin üzerinden süpürülmekte ve vorteks RI yakınında yeni konumunu, LF^{*}, almaktadır (Testik vd. [33])

Araştırmacı karmaşık vorteks hareketlerini açıklamak için Şekil 2.67'de salınımlı periyodun 1/8'e ayrılmış anlık bölümlerini vermiştir. Akımın her safhasında aynı yönde dönen iki vorteks (ilk ve süpürülen) gelişmektedir. Akım sağdan sola doğru maksimum hız ile hareket ederken daha önce oluşan vorteks RF (Şekil 2.67h) mansabın soluna doğru taşınır ve ilk vorteks LI ile vorteks çifti meydana getirmektedir (Şekil 2.67a). Aynı zamanda silindirin mansabında süpürülen vorteks LF şekillenmektedir. Akım hızının azalmasıyla (Şekil 2.67b) LI ve RF vorteks çifti akım ile taşınırken ve silindirden uzağa sürüklenirken vorteks LF silindirden ve tabandan uzaklaşmaktadır (Şekil 2.67b ve Şekil 2.67c). Akım yönünün değişmesiyle (Şekil 2.67d) vorteks LF silindirin sağına doğru süpürülmekte burada vorteks RI ile etkileşerek bir vorteks çifti oluşturmakta (Şekil 2.67e) ve akım ile silindirden uzağa taşınmaktadır (Şekil 2.67f). Aynı zamanda silindirin mansabında süpürülen vorteks RF şekillenmekte (Şekil 2.67f). Aynı zamanda silindirin mansabında süpürülen vorteks RF şekillenmekte (Şekil 2.67f). Aynı zamanda silindirin mansabında süpürülen vorteks RF şekillenmekte (Şekil 2.67f). Aynı zamanda silindirin mansabında süpürülen vorteks RF şekillenmekte (Şekil 2.67e) ve gelişmektedir (Şekil 2.67f ve Şekil 2.67g). Akımın tekrar geriye dönmesiyle vorteks RF silindirin sol tarafına taşınmakta ve burada vorteks LI ile etkileşmektedir. Daha sonra bu süreç periyodik olarak tekrarlanmaktadır.



Şekil 2.67 Salınımlı akım etkisinde vortekslerin silindirin üzerinden süpürülmesi ve vorteks çifti oluşmasının şematik gösterimi (her bir parça 1/8 periyod). I, ilk, F, süpürülen, R, sağ, F, sol vorteksleri temsil etmektedir. Siyah oklar akım yönünü ve şiddetini göstermektedir. Siyah oklar (içi dolu) vorteks çift yapısını ve ilerleme yönlerini vermektedir (Testik vd. [33])

Testik vd. [33] tabana yatay yerleştirilmiş kısa bir silindir etrafındaki üç boyutlu akım yapısını tanımlamak için bir dizi deneysel çalışmalar yapmıştır. Kararlı ve salınımlı akım yapılarını açıklayabilmek için akım görünürlüğü ve partikül görüntülemeli hız ölçüm tekniğini kullanmıştır.

Silindirin boyutları ile karşılaştırılabilir boyutta büyük vorteksler tarafından art-iz akım yapısına hâkim olunduğunu bulmuşlardır. Gözlemleri açıklamak için atnalı vortekslerinden meydana gelen basitleştirilmiş bir model önermişlerdir. Deneylerde parametrelerin aralıklarını kullanarak kararlı ve salınımlı akımların etkisinde silindir çevresinde atnalı vortekslerinin periyodik bir şekilde oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Atnalı vorteksleri oldukça enerjik olup kararlı akımda vortekslerin şiddeti, akımın Re sayısı ile doğru orantılı olarak değişmektedir (Testik vd. [33]).

Salınımlı akım durumunda atnalı vorteksler silindirin her iki kenarında periyodik olarak birbirlerine ters yönde meydana gelmektedir. Yarım periyot boyunca silindirin her iki kenarında ilk ve süpürülen vortekslerin birbirlerine ters yönde hareket ettikleri gözlemlenmiştir. Akım yönünün değişmesiyle süpürülen vorteks silindirin bir tarafından diğer bir tarafına hareket etmekte ve burada ilk vorteks ile bir vorteks çifti oluşturarak periyodik bir şekilde silindirden uzağa saçılmaktadır. Araştırmacılar KC sayısının 4-31 aralığında akım rejimindeki nitel değişiklikleri gözlemlememişlerdir. Büyük KC sayılarına sahip deneylerdeki video kayıtları ve görsel gözlemler, salınımlı akımın her periyodunda akım rejiminin değişebildiğini ve birden fazla vorteks çiftinin oluşabileceğinin göstermektedir (Testik vd. [33]).

Bu çalışmadaki uygulamalar sığ okyanus dalgaları altında kısa silindirik nesnelerin gömülmesi ve oyulma işleminin tahminini kapsamaktadır. Çalışmada Re= $(1.5-3)\times10^5$, KC=6-12 için boyutsuz parametrelerin aralığı tahmin edilebilmekte olup burada, boru çapı, D=50 cm, ε =50-100 (Spektral genişlik parametresi), dalga frekansı, f=0.1 Hz ve tek yönlü akım hızı için U=30-60 cms⁻¹ kullanılmıştır. Araştırmacıların deneylerindeki KC aralığı denizel ortamları kapsamaktadır. Gerçekte Re sayısı laboratuardakinden daha büyük olmasına rağmen araştırmacılar Re sayısının 2000 den büyük değerlerinde Re sayısının benzerliğinin devam ettiğini gözlemlemişlerdir (Testik vd. [33]).

Son olarak araştırmacılar bu çalışmada karmaşık okyanus akımının dinamiklerini ve yapısını idealleştirerek sonuçları sınırlı parametre aralığında vermişlerdir. Ayrıca araştırmacılar gelecek çalışmalarda daha büyük parametre aralıklarının dikkate alınması gerektiğini ve bu çalışmanın karmaşık problemin araştırılmasında ilk adım olduğunu belirtmişlerdir (Testik vd. [33]).

Bearmean vd. [46] ve Bearmen [56], KC sayısının büyük aralığında vorteks hareketlerini tanımlamışlar ve vortekslerin cisme doğru geri dönerek bir sonraki akım yapısı ile etkileşmesi sonucu art-iz bölgesinin önemini belirtmişlerdir. Williamson [47] ve Sarpkaya [49] KC aralıklarına göre silindir çevresindeki farklı akım rejimlerini sınıflandırmışlardır. Sawamato [57], Obasaju vd. [58] ve Jensen [59]) gibi araştırmacılar akımı görüntülemek için tane partiküller kullanmışlar ve farklı rejimi sınıflarını önermişlerdir. Hayashi vd. [60], Medeiros vd. [61], [62] Laser Doppler hız ölçüm tekniğini kullanarak bir silindir etrafındaki hız alanı haritalamasını gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca bu yöntem ile silindirin alt ve üst kısmındaki vorteks gelişmesinin farklı modlarını elde etmişlerdir. Bruce ve Easson [63]), Sibetheros vd. [64] KC sayısının 15-20 aralığında vorteks saçılımındaki düzensizlikleri göstermek için parçacık görüntülemeli hız ölçüm tekniğini kullanarak yapı çevresindeki hız alanı ve vorteksleri tanımlamışlardır. KC sayısı 2.5 değerine ulaşarak sınır tabakası türbülanslı hale

geldiğinde (Re> 5×10^3 , β > 2.5×10^3) Sunahara ve Kinoshita [65] iki boyutlu bir akımdan stabil olmayan bir akıma (KC=0.15-1) geçiş olduğunu belirtmişlerdir.

Mouaze ve Belorgey [66] dalga etkisi altında bir silindir çevresindeki akım yapısını araştırmak için dalga kanalında (22m boy, 0.8m genişlik, 0.5m su derinliği) görüntüleme yöntemlerini kullanmışlardır. Laser Doppler hız ölçümleri yardımıyla iki silindir için Re sayısının ve dalga yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak KC rejimlerini tanımlamışlardır. Daha nitelikli ölçümler yapabilmek için lazer tabakası tekniğini ve partikül besleme tekniğini kullanmışlardır. Deneylerde şeffaf ve içi su dolu silindirler kullanılmıştır. Ayrıca silindir çevresindeki boşluk 20° lik radyal dilimlere ayrılarak silindirin merkezine doğru birleştirmişlerdir. Bununla birlikte kayıt aparatı ve lazer tabaka konumu arasındaki farklı kırılma indislerinden kaynaklanan sapmaları düzeltmek için hem $(1/3)D_1$ hem de $(1/6)D_2$ eş merkezli çemberler çizilmiştir. Çalışma alanı üst çeyrek memba (UQU), alt çeyrek memba (DQU), üst çeyrek mansap (UQD), alt çeyrek mansap (DQD) olmak üzere dört bölüme ayrılmıştır (Şekil 2.68).



Şekil 2.68 Silindir çevresindeki açıklığın 20° lik radyallara bölünmüş dört çeyrek bölümü (Mouaze ve Belorgey [66])

Mouaze ve Belorgey [66], açıklık oranı, e/D, 0.3 değerini aldığı zaman silindir çevresindeki akımın kanal tabanından etkilenmediğini belirtmiştir. Şekil 2.69'daki grafik beş bölgeye ayrılarak gösterilmektedir.

Şekil 2.69'daki birinci bölgede ayrılma görülmemektedir. İkinci bölgede dalga tepesi safhası süresince silindirin mansabında ayrılma görülmektedir. Ayrıca daha yüksek KC sayılarında üst çeyrek mansap bölgesinde bir negatif vorteks gelişimini (saatin ters yönü) tespit etmişlerdir. Üçüncü bölgede üst çeyrek mansap bölgesinde vortekslerin

oluşması ve gelişmesi görülmektedir. Dördüncü bölgede asimetrik vortekslerin oluşumu görülmektedir. Beşinci bölgede ise üç boyutlu ve yüksek KC etkilerinden kaynaklanan akım yapısındaki düzensizlikler görülmektedir.



Şekil 2.69 D=4 cm, e/D=3.0 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])

Açıklık oranı, e/D, 0.5 değerini aldığı zaman (tabana daha yakın) hızların düşey birleşeninin daha az önemli olduğunu belirtmiştir (Mouaze ve Belorgey [66]). Akımlar dalga tepesi ve çukuru arasında oldukça simetrik olup farklı bölgelerde kolaylıkla tanımlanabilmektedirler. Bu nedenle araştırmacılar Şekil 2.70'deki grafiğide beş farklı bölgeye ayırmışlardır.

Birinci bölgede ayrılma görülmemektedir. İkinci bölgede ayrılma başlamaktadır. Üçüncü bölgede asimetrik vorteksler meydana gelmektedirler. Dördüncü bölgede vorteks saçılımı meydana gelmektedir. Beşinci bölge ise oldukça düzensizdir.



Şekil 2.70 D=4 cm, e/D=0.5 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])

Mouaze ve Belorgey [66], açıklık oranları, e/D=0.1 ile e/D=0.5 değerlerinin benzer özellikler taşıdığını belirterek Şekil 2.71'deki grafiği dört bölgeye ayırmışlardır. Ancak vorteks saçılımı görülmemektedir.

Birinci bölgede akımda ayrılma meydana gelmemektedir. İkinci bölgede ayrılma görülmektedir. Üçüncü bölgede vorteks (4/3)D'ye kadar gelişirken vortkes silindire yakın kalmaktadır (1/6D). Silindir ve taban arasında jet akımına benzer bir akım yapısı meydana gelmektedir. Dördüncü bölge ise oldukça düzensizdir.



Şekil 2.71 D=4 cm, e/D=0.1için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])

Açıklık oranı, e/D~0 olması durumunda, ilk bölgeler e/D=0.1 koşuluna benzediği sürece ayrıntılı anlatılamayacaktır. Ancak beşinci bölge bu koşullara eklenilmektedir (Şekil 2.72). Artık vorteks saçılımı oluşmamakta ve vorteksin ölçeği önemli olmaktadır. Silindir tabana tam olarak koyulmadığı için taban yakınında silindirden hala ayrılma meydana gelebilmektedir. Beşinci bölge stabil durumdadır. Dalga tepesi safhasında silindirin mansabında pozitif yönde büyük ölçekli bir vorteks meydana gelmektedir. Dalga çukuru safhasında ise bir çift vorteks oluşmaktadır (Şekil 2.73).



Şekil 2.72 D=4 cm, e/D~0 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])



Şekil 2.73 D=4 cm, e/D~0 için silindir çevresindeki vorteks hareketleri (Mouaze ve Belorgey [66])

Mouaze ve Belorgey [66], D=10 cm ve açıklık oranı, e/D=0.5 için vorteks saçılımı ve düzensizlik meydana gelmediğini belirtmişlerdir (Şekil 2.74). Birinci bölgede silindir yakınındaki partiküller silindirin alt ve üst kısımlarında salınım yapmaktadırlar. İkinci bölgede ayrılma başlamakta, küçük vorteksler görünmekte ve hızlıca yayılmaktadırlar. Dalga tepe ve çukur safhaları simetriktir (Şekil 2.75).



Şekil 2.74 D=10 cm, e/D=0.5 için silindir çevresindeki vorteks hareketleri (Mouaze ve Belorgey [66])

Üçüncü bölge geçici bir bölgedir. Dördüncü bölge de ise akım asimetriktir.



Şekil 2.75 D=10 cm, e/D=0.5 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])

Mouaze ve Belorgey [66], D=10 cm ve açıklık oranı, e/D=0.1 için Şekil 2.76'ı üç bölgeye ayrılmışlardır. Akım yapıları dalganın farklı safhalarında simetriktir. Burada küçük vorteksler görülmekte ancak küçük silindirlerde bu vorteksler görülmemektedir. Birinci bölgede ayrılma yoktur. Partiküller silindirin alt ve üst kısımlarında salınım yapmaktadırlar. İkinci bölgede ayrılma görülmektedir. Silindirin etkili alanı tüm çevreye yayılmaktadır. Partiküller 1/3D'ye kadar salınımlı bir harekete maruz kalmaktadırlar. Dalga tepe ve çukur safhaları simetriktir. Açıklık içinde 2/3D'ye kadar küçük vorteksler meydana gelmektedir.

gelmektedir. Dalga tepe safhasında silindirin üst çeyrek mansap bölgesinden vorteks 2/3D'ye kadar gelişmektedir. Eddy silindirin kenarında gelişmekte, silindirin çapının iki katına kadar saçılmakta ve dağılmadan önce bir yarım periyotta direncini tutmaktadır.



Şekil 2.76 D=10 cm, e/D=0.1 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])

Mouaze ve Belorgey [66], D=10 cm ve açıklık oranı, e/D~0 için Şekil 2.77'deki grafiği üç bölgede tanımlamışlardır. İlk iki bölge öncekilerine benzemektedir. Üçüncü bölge akışın yeni akım özelliklerini vermektedir. Silindirin üst kısmında vorteksler meydana gelmektedir. Vorteksler üst çeyrek mansap bölgesinden 4/3D'ye kadar gelişmekte ve taban yakınında gelişen eddy' nin hasarı bir jet akımına neden olmaktadır. Dalga tepe ve çukur safhaları simetrektir.



Şekil 2.77 D=10 cm, e/D~0 için akım rejimleri (Mouaze ve Belorgey [66])

Çalışmalarının amacı akım görünürlüğü tekniğiyle zaman içinde akım rejimlerinin düzensizliğini gözlemleyerek açıklamaktır. Silindir altında partiküllerin non-lineer dağılımını gözlemlemişlerdir.

KC sayısı 1.5 değerini aldığında katı madde dağılımı üniform olmamasına rağmen silindirin altında tane aynen kalmaktadır (D=10 cm). KC sayısı arttığında tane silindire iki memba çapında aynen kalmakta (KC=3.1) ve KC sayısının daha yüksek değerlerinde tane askı haline geçmektedir. Dalga kanalının tabanı altında LDV probe'ları kullanılarak enine hızlar elde edilmiştir. Ölçüm cihazları silindirin merkezi, en yakın silindir yüzeyinden 0.5D mansap mesafesi ve kanalın cidar kenarından silindirin üçte biri uzunluğu gibi farklı konumlarda eşit seviyelerde yerleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 2.78'deki gibi üç alana ayrılarak gösterilmiştir. 0<KC<3 aralığında enine hızlarda az bir artış ve önemsiz üç boyutlu etkiler görülmektedir. 3<KC<5 aralığında bir geçiş rejimi görülmektedir. KC sayısının yüksek değerlerinde yatay hızlar artığı için enine hızların sabit kaldığı görülmektedir (Enine hızlar W_t, boyuna hızlar, U_L).



Şekil 2.78 KC sayısının bir fonksiyonu olarak enine ve boyuna hızlar arasındaki oran (Mouaze ve Belorgey [66])

KC sayısının daha yüksek değerlerinde bir silindirin yüzey yakınında ki iki boyutlu akım yapısı mantar çizgileri şeklinde üç boyutlu akım yapısına gelişmektedir. Mouaze ve Belorgey [66] çalışmasında üç boyutlu etkiler Honji [48]) veya Sarpkaya [49]'nın gözlemlediklerinden daha yüksek KC aralığında (KC>3) görülmektedir. Ancak çalışmalarında Honji düzensizliğinin gelişimini doğrulayacak akım görünürlüğü bulunmamaktadır.

Mouaze ve Belorgey [66] sonuçları sadece salınımlı akımlar için elde edilen diğer sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Dalga kanalı içindeki görünürlük uygulamaları, yörünge hareket etkisinin U borusundaki gibi bir viskoz akıma neden olmayacağını göstermiştir. Chaplin [67] durgun bir su tankı içinde bir silindirin yörünge hareketlerini benzeştirerek aynı sonuçları elde etmiştir. Mouaze ve Belorgey [66] açıklık oranı, e/D=3 değeri için taban etkisini ihmal ettiklerinde, Jensen ve Roll [68], Sümer ve Fredsøe [69]'nin gözlemledikleri gibi aynı KC bandında ayrılma olgusu meydana gelmiştir. Simetrik vortekslerin oluşumu sadece geçiş bölgesinde ve yüksek genlikli dalgalarda (5<KC<14)

görünürken Bearman [46] ve Williamson [47] ise bunu KC~4 iken gözlemlemişlerdir. Büyük KC değerleri için simetrik vortekslerin görünürlüğü Obasaju vd.[58], Jensen [59]'nin elde ettikleri sonuçlar ile uyumludur. Mouaze ve Belorgey [66] bir kritik bölgede eksenel hızların görüntüsünü göstermişlerdir (3<KC<4). KC>3 değeri için bir akışın 3D karakteristiklerine doğru deformasyonu Tatsuno ve Bearman [54]'nın açıkladığı sonuçlara benzemektedir.

Mouaze ve Belorgey [66] açıklık oranını azaltıklarında açıklık içindeki yüksek hızların bazı bölgelerinde artan cidar etkisini gözlemleyerek vorteks şekillerini basitleştirmişlerdir. Jacobsen vd. [39] ve Sümer vd. [7] yaptıkları geniş kapsamlı çalışmalarla benzer sonuçları elde etmişler ve küçük açıklık değerleri için silindir cidarında vorteksin meydana gelmediğini belirtmişlerdir.

Açıklık oranı, e/D=0.1 için silindirin üst kısmında gelişen vorteks, izi boyunca bir taraftan diğer tarafa geçmekte, cidara yakın gelişmekte ve yapıdan ayrılmaktadır. Bu nedenle bu iki süreç gerçek bir vorteks saçılımı olarak dikkate alınmamaktadır.

Mouaze ve Belorgey [66] dalga kanalında az çalışma yapmalarına rağmen gözlemleri Jarno [70] (2<KC<3) ve Sakout [71] (KC=5, e/D=0.5 ve 0.09) ile uyumludur. Yani tepe ve çukur arasında bir asimetri ve silindirin membasında daha fazla vorteks aktivite gelişimini işaret etmişlerdir.

Aynı dalga kanalında serbest yüzey ve silindir arasındaki mesafenin azalmasıyla vorteks aktivitesinin arttığı ve yörünge hareketi ile aynı olan vorteksin dönme yönünün öncelikli oluşumu için Lambert [72] (KC=5.7) ile Mouaze ve Belorgey [66] benzer sonuçları vermişlerdir.

İki farklı silindir çapının sahip olduğu KC ve Re sayıları için akım yapıları aynı eğilime sahip olmalarına rağmen hala bazı farklar bulunmaktadır. Bu çalışmada deniz tabanı yakınındaki boru hatları üzerinde etkili kuvvet davranışlarının eş zamanlı olmayan kayıtları dikkate alınmasına rağmen vortekslerin oluşmasıyla, kaldırma kuvvetinin zaman serileriyle bağlantılı uygun belirtiler sağlamak için akım yapıları verilmiştir.

Jensen vd. [59] hareketli bir tabana yerleştirilmiş ve dalga etkisine maruz bir boru hattı etrafındaki akımı araştırmak için hem nümerik hem de deneysel çalışma yapmışlardır. Bu deneysel çalışmalarda oyulmuş taban modellerinin farklı safhalarının rijit cidarla temsil edilmesi ile akım görünürlüğü ve hız ölçümleri yapılmıştır. Akım görünürlüğü deneyleri üç farklı oyulma oyulma profili için yapılmıştır. Şekil 2.79'da görülen bu üç oyulma profili gerçek bir oyulma deneyinden (Sümer ve Fredsøe [73]) elde edilen değerlerdir. Bu üç oyulma profilinden ilki oyulma işleminin oldukça erken safhasını, ikincisi borunun altındaki oyulmanın hala gelişmekte olduğu safhayı ve üçüncüsü ise denge safhasını göstermektedir.



Şekil 2.79 Akım görünürlüğü ve ayrık vorteks metodu kullanılarak elde edilmiş oyulma profilleri (Sümer ve Fredsøe [73])

Akım görünürlüğü ve nümerik hesaplardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil 2.80 KC=10 için salınımlı akımın ilerlemesi esnasında hareketin bir yarım periyodunda borunun çevresindeki akım şeklini göstermektedir.



Şekil 2.80 Salınımlı akımın bir yarım periyodu esnasındaki akım rejimleri. t=9.4 dakikadaki oyulma profili. Soldaki: ayrık vorteks modeli, ortadaki: deneylerden, sağdaki: bunlara karşılık gelen şemalar. Yatay oklar silindire göre akım yönünü göstermektedir (Jensen vd. [59])

Şekil 2.81 oyulma işleminin oldukça erken safhası (t=0.15 dak.) ile denge safhasını (t=182 dak.) göstermektedir.



Şekil 2.81 Salınımlı akımın bir yarım periyodu için oyulmanın erken ve denge safhasını göstermektedir. Yatay oklar akım yönünü silindire rölatif olarak göstermektedir (Jensen vd. [59])

Şekil 2.80 ve Şekil 2.81'deki akım alanları oldukça benzerdirler. Bir safhadan diğerine vorteksin boyutu gelişmekle birlikte, bunların oluşması, gelişmesi ve etkileşimleri üç safhada da aynıdır. Şekil 2.80 ve Şekil 2.81'den görünen önemli bir gözlem KC'nin 10 değeri için serbest silindir çevresinde Şekil 2.82'de gözlenen akıma dik vorteks sokağının bu durumda gözden kaybolduğudur. Bunun nedeni ise borunun deniz tabanına oldukça yakın olmasıdır.



Şekil 2.82 Serbest bir silindir için akıma dik vorteks sokağı 7<KC<13 (Jensen vd. [59]) Şekil 2.81'den gözlenen diğer önemli husus ise vorteks saçılımlarının oyulma işleminin oldukça erken safhalarında mevcut olduğudur. Akım görünürlüğü ve nümerik çalışmalar, boru taban açıklık oranının 0.1 kadar küçük olduğu değerlerde bile vorteks saçılımının meydana geldiğini göstermiştir. Oysa ki kararlı akımda vorteks saçılımları ancak e/D=0.3 değerinde oluşmaya başlamaktadır. Bunun nedeni ise borunun üzerindeki sınır tabakasının oldukça ince ve dalgalı ortamda hareketin her dalga periyodunun başlangıcında akım temelde potansiyel olduğu için, silindir çevresindeki akım kararlı akım halindekinden çok daha hızlı oluşmaktadır.

Şekil 2.83 KC=20 olması durumunda elde edilen sonuçları göstermektedir. Buradaki oyulma profili t=0.65 dakikasındaki gerçek oyulmayı temsil etmektedir. KC=10 durumundaki gibi diğer iki oyulma profili için elde edilen sonuçlar akım alanlarının oldukça benzer olduğunu göstermiştir. KC=20 değerinde de KC=10 halindeki gibi vorteks saçılımları oyulma işleminin oldukça erken safhalarında mevcuttur. Bununla birlikte, KC sayısının artması ile küçük boru- taban açıklığı için vorteks saçılımları daha az görünür hale gelmektedir.



Şekil 2.83 Salınımlı akımın yarım periyodu esnasındaki akım resimleri, t=0.65 dak. da oyulma profili. Soldaki: Ayrık vorteks modeli. Sağdaki: Şemalar. Yatay oklar silindire göre akım yönünü göstermektedir. Ortadaki: Deneyler, KC=20 (Jensen vd. [59])

Şekil 2.83'deki tabana yakın boru durumuna bakıldığında D vorteksi E vorteksinden dolayı saçılmaktadır. Oysaki Şekil 2.84'de tabandan yeterince uzaktaki boru durumuna bakıldığında vorteksin saçılmasının başlıca nedeni olan cidar burada mevcut değildir. Bundan dolayı D vorteksi ve E vorteksi arasında etkileşim meydana gelmediğinden ilave bir vorteks saçılımı oluşmamaktadır.

KC sayısının artmasıyla akım rejimi değiştiğinden dalga periyodunun bir yarısında saçılan vorteks sayısı bir fazla olmaktadır. Böylece araştırmacılar bu sonucun tabana yakın yerleştirilmiş silindir için aynı şekilde uygulanabileceğini belirtilmiştir. Bundan dolayı Şekil 2.83 daha büyük KC rejimlerinde hala geçerlidir, bir yarım periyod için vorteks saçılım sayısı her defasında akım rejiminin bir kademe artması ile bir fazla olmaktadır.



Şekil 2.84 Cidardan uzak bir silindir için yarım periyottaki akım resimleri. Yatay oklar silindire göre akım yönünü gösterir (Jensen vd. [59])

Ayrıca Jensen vd. [59] borunun altındaki taban hızlarını akım doğrultusu boyunca ölçmüşlerdir. Oyulma işleminin erken safhasında oldukça büyük hızlar ölçülmesine rağmen denge safhasında taban boyunca aynı katı madde taşınım miktarına neden olacak oldukça üniform ve daha küçük hızlar ölçülmüştür.

Bu sonuçlara dayanarak Jensen vd. [59] dalga etkisine maruz bir boru hattı çevresindeki akım şeklinin serbest bir silindirden oldukça farklı olduğunu, akım şeklinin KC sayısı ile değiştiğini fakat verilen bir KC sayısında farklı oyulma profilleri için akım şeklinin değişmediğini, kararlı akımda olanın tam tersine boru taban açıklığının çok küçük değerlerinde bile vorteks saçılımının meydana geldiği sonucuna varmışlardır.

BÖLÜM 3

OYULMA MEKANİZMASI

3.1 Oyulmanın Başlangıcı

Bir boru hattı hareketli bir taban üzerine yerleştirildiğinde eğer boru hattının taban içindeki başlangıç gömme derinliği çok büyük değil ve akım (dalga/akıntı nedenli) oldukça kuvvetli ise boru altındaki taban aşınarak oyulmanın başlangıcı meydana gelmektedir. Aslında oyulmanın başlangıcı borunun memba ve mansap arasındaki basınç farkından kaynaklanan sızma akımıyla ilişkilidir.

Oyulmanın başlangıcı için kritik koşullar Mao [74], Chiew [75], Sümer ve Fredsøe [76] ve Klomp vd. [77] tarafından çalışılmıştır.

Mao [78] deneylerini iki aşamada gerçekleştirmiştir. İlk aşamada oyulmanın nasıl başladığını izlemiştir. 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 hareketetme kabiliyetlerini sağlaması yönünde olduğunu belirlemiştir. Boru hattının art-iz bölgesinde $C_p < 0$ olması nedeniyle, yerel hız rahatsız edilmemiş serbest akım hızından daha büyük olmaktadır.

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi boru hattı etrafında oluşan A ve C vorteksleri birbirlerine ters yönde ve borudan uzaklaşan doğrultuda taban malzemesini taşımaktadırlar. Diğer taraftan, B vortkesi taban malzemesini boruya doğru getirmekte ancak bu vorteksin etki alanının C vorteksi ile sınırlandığı belirlenmiştir.

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.



Şekil 3.1 Oyulma başlangıcının şematik olarak izahı (Mao [78])

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 alınabileceğini belirtmiştir.

İkinci aşamada ise tek yönlü akım şartlarında boru hatları etrafındaki yerel oyulmanın atak açısı ile değişimini incelemiş ve akım doğrultusunun boru hattı normali ile paralel olması halinde maksimum oyulma çukurunun meydana geldiğini belirtmiştir.

Chiew [75] sızma akımını ayrıntılı bir şekilde tartışarak, borulanma süreci ile oyulma başlangıcı arasında ilişki kurmuştur. Sümer ve Fredsøe [76] dalga halinde kritik koşulları açıklamak için bir takım deneysel çalışmalar yaparak KC ve e/D parametrelerini ifade etmişlerdir. Klomp vd. [77] dalga ve akıntının birlikte olması durumunda oyulmanın başlaması ile iki ve üç boyutlu oyulmanın gelişimini araştırmışlardır. Oyulmanın başlaması için yapmış oldukları deneylerde, akıntı/dalga hız (U_c/U_w) oranının 0.5'den küçük olduğu değerlerde elde edilen sonuçlar (Sümer vd. [76])'ın elde ettiği 3.1 ampirik ifade ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

$$S/D = 0.1\sqrt{KC}$$
(3.1)

Ancak akıntı/dalga oranının büyük değerleri için sadece iki deney yapıldığı için herhangi bir sonuca varılamamıştır. Araştırmacılar (Sümer vd. [76])'nin elde ettiği

aşağıdaki ifadenin düzensiz dalgalar ve dalganın hâkim olduğu dalga ve akıntı etkisinde de geçerli olduğunu göstermişlerdir.

$$\frac{\mathbf{e}_{\mathrm{kr}}}{\mathrm{D}} = 0.1 \ln(\mathrm{KC}) \tag{3.2}$$

Klomp vd. [77] biri dar diğeri üçgen şeklinde olmak üzere iki farklı geometrisi olan önceden oluşturulmuş oyulma çukurları ile düzenli ve düzensiz dalga şartlarında deneyler yapmışlardır.

Klomp vd. [77] yapmış oldukları üç boyutlu oyulma deneylerinde eksenel oyulma hızının KC sayısı ile arttığını buna karşın artan gömülme miktarı ile azaldığını belirtmişlerdir.

Klomp vd.[77] serbest açıklığın mesnetlerinin uzunluğunun KC sayısının ve rölatif gömülmenin bir fonksiyonu olduğunu ifade etmişlerdir.

Klomp vd. [77] boru hattını dalga ve akıntı yönüne farklı açılarla yerleştirerek bazı deneyler yapmışlardır. Boru ekseni ile kanal ekseni arasındaki açının 60° olması durumunda akıma ters yöndeki oyulma hızının akım yönündeki oyulma hızından daha büyük olduğunu bulmuşlardır. Açının 30° olması halinde ise pozitif oyulma hızının negatif oyulma hızından daha büyük olduğu görülmüştür. Ancak bu değişimin fiziksel açıklaması yapılamamıştır.

Daha sonra Sümer ve Fredsøe (2001a) hem dalga hem de akıntı etkisinde oyulmanın başlangıcını çalışmışlardır. Sümer ve Fredsøe [79] boru altındaki basınç gradyanın 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.

3.1.1 Oyulma başlangıcının mekanizması

Akıntı etkisinde bir boru hattı tabana yerleştirildiği zaman borunun memba ve mansap arasındaki basınç farkı (Şekil 3.2) boru altındaki kum taban içinde sızma akımına (Şekil 3.3) neden olmaktadır (Sümer ve Fredsøe [80]). 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 literatür de borulanma olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.2 Tabana yerleştirilmiş bir boru için basınç dağılımı (Bearman ve Zdravkovich [20])



Şekil 3.3 Borunun altında sızma akımı (Sümer ve Fredsøe [80])

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

Eğer basınç gradyanı tanelerin batık ağırlığını aşarsa borulanma için kritik koşula ulaşılır (Sümer ve Fredsøe [80]), (P≥W).

$$\frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{p}{\gamma} \right) \ge (s-1)(1-n)$$
(3.3)

Sümer ve Fredsøe [79] akıntı durumunda yapmış oldukları çalışmalarda aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir.

- a) Artan hız ile basınç gradyanı artmaktadır ($p \sim U^2$) (Şekil 3.2c).
- b) Basınç gradyanı arttığında boru mansabındaki kum yüzeyinin artmaya başlamasıyla kritik bir noktaya ulaşılmaktadır (Şekil 3.4b).
- c) Bu süreç zamanın kısa bir periyodu için devam etmekte (5 s.) ve sonra kum ve yüzey birleşiminde ayrılma meydana gelmektedir (Şekil 3.4c)
- d) Oyulmanın başlangıcı iki boyutlu oyulmada asla boru uzunluğu boyunca aynı anda meydana gelmez ancak üç boyutlu oyulmada meydana gelmektedir.
- e) Borulanma koşulunun meydana gelebilmesi için basınç gradyanının, $\frac{\partial p}{\partial x}(\frac{p}{x})$, (1-

n)(s-1) değerine ulaşması gerekmektedir.



Şekil 3.4 Borulanma (Sümer vd. [79])

Sümer vd. [79] ayrıca yapmış oldukları çalışmada Mao [74], Chiew [75], Sümer ve Fredsøe [81] 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 (Sümer ve Fredsøe [79]).

- a) Oyulmanın başlangıcı dalga tepesinin yarım periyodunda meydana gelmektedir (ayrılma, Şekil 3.5).
- b) Dalga çukurunun yarım periyodunda borulanmaya neden olan basınç gradyanı yeterince büyük olmamaktadır.

- c) Basınç gradyanı, $\frac{\partial p}{\partial x}(\frac{p}{x})$, (s-1)(1-n) değerine ulaştığında veya aştığında oyulmanın başlangıcı meydana gelmektedir (Şekil 3.5).
- d) 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 3.5).
- e) Ayrıca her bir dalga tabandaki taneleri gevşeterek daha çabuk harekete geçmesini sağlamaktadır. Bu da oyulmanın başlangıcı üzerinde etkili olmaktadır.



Şekil 3.5 Dalga etkisinde boru altında basınç gradyanının zaman serisi (Sümer vd. [79])

3.1.2 Tünel Erozyonu

Oyulmanın başlangıcı safhasını izleyen süreçtir. Şekil 3.6'da taban ve boru arasındaki açıklığın, e, çok küçük olması durumunda e<<D, boru çapı, suyun önemli bir miktarının açıklığa yönlendirildiği görülmektedir.



Şekil 3.6 Yaklaşan akım şeması (Sümer vd. [80])

Oyulmanın başlangıcı safhasından sonra boru altındaki küçük açıklıktan geçen akım hızı artmaktadır (Şekil 3.7). Buna bağlı olarak kayma gerilmesi ve boru altındaki katı madde taşınımı da artmaktadır. Bunun sonucu olarak boru altında hızlı bir şekilde
oyulma meydana gelmektedir. Bilindiği gibi taban kayma gerilmesindeki artış rahatsız edilmemiş taban kayma gerilmesinin dört katı kadar olduğu zaman katı madde taşınım oranı sekiz kat artmaktadır. Katı madde taşınım oranı ile taban kayma gerilmesi arasındaki lineer olmayan ilişki dikkate alındığında tünel oyulması safhasında boru hattı altındaki tabanın niçin çok hızlı ve şiddetli oyulduğu açıklanabilir. Oyulmanın artmasıyla açıklıktaki akım hızı azalmakta yani borunun alt ve üst kısmındaki hızlar eşit olmaktadır. Böylece tünel erozyonu azalmaktadır. Memba ile boru altındaki kayma gerilmeleri eşit olduğunda da erozyon sonlanmaktadır.



Şekil 3.7 Boru altındaki tünel erozyonu (Sümer vd. [80])

3.1.3 Art-iz Erozyonu

Tünel erozyonunu takip eden safhadır. Şekil 3.8'de kararlı akım etkisine maruz tabana yerleştirilmiş rijit bir borunun altında zamanla oyulmanın gelişimi görülmektedir. Başlangıçta oyulma çok hızlı bir şekilde meydana gelmektedir (Tünel erozyonu). Sonuç olarak borunun mansap tarafında kumul şekillenmeye başlar ve zamanla mansaba doğru taşınarak ortadan kalkar. Borunun mansap tarafındaki oyulmasının membadakine göre daha fazla ve eğiminin daha hafif olduğu Şekil 3.8'den görülmektedir.



Şekil 3.8 Akıntı durumunda oyulmanın zamanla değişimi. Noktalı çizgiler: Denge oyulma profili (Mao [74])

Aslında art-iz erozyonu safhasındaki oyulma vorteks saçılımı tarafından yönlendirilmekte ve oyulma karakteristikleri borunun mansabı tarafından kontrol edilmektedir. Oyulma nedeniyle taban ve boru hattı arasındaki açıklık belli bir değere ulaştığında vorteks saçılımı meydana gelmeye başlamaktadır (Sümer vd. [82], Jensen vd. [25]). Borunun taban kenarından saçılan vorteksler mansaba doğru hareket ederken tabanda sürüklenmektedirler (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Vorteks saçılımı nedeniyle katı madde taşınımı (Sümer vd. [82])

Taban kayma gerilmesi ölçümleri, Shields parametresinin periyod boyunca kolaylıkla 4 katı mertebelerine kadar artabileceğini ve bu olay nedeniyle borunun mansabındaki katı madde taşınımında çok büyük artış olacağını göstermiştir (Şekil 3.10). Bu olayda art-iz erozyonuna sebep olacaktır.



Şekil 3.10 Kayma gerilmesinin zaman serileri a) Borusuz, b) Borulu. e/D=0.95, x/D=1.6 (Sümer vd. [80])

Vorteks saçılımları spektral yoğunluk dağılımlarında St sayısının 0.2 değerinde hakim bir pik ile temsil edilmiş ve borunun art-iz bölgesinde oyulmanın oldukça erken safhalarında başladığı görülmüştür (Şekil 3.11). Borudan saçılan ve kararlı olarak mansaba doğru taşınan büyük ölçekli bir vorteks bulutu tarafından borunun mansabındaki oyulma düzenli bir art-iz akımı etkisine girmektedir. Shields parametresi katı madde taşınımının başlaması için gerekli olan 0.04 değerinden biraz daha büyük olup 0.05 olarak alınmıştır. Shields parametresinin daha büyük değerleri için vorteks saçılımları oyulma işleminin daha erken safhalarında bile başlayabilmektedir. Bu nedenle mansap oyulmasının tamamıyla gelişmiş düzenli art-iz akımı etkisinde oluştuğu söylenmiştir.



Şekil 3.11 Boru yakınındaki hızın spektral dağılımı. $\theta = 0.05$. (Sümer vd. [82])

Oyulma işlemi kararlı bir hal aldığında denge safhasına ulaşılmaktadır (Şekil 3.8). Bu durumda borunun altındaki taban boyunca kayma gerilmesi sabit ve rahatsız edilmemiş değerine eşit olmaktadır.

 $\tau = \tau_{\infty}$

(3.4)

Dalga ve akıntı durumundaki en önemli fark, art-iz sisteminin dalga durumunda borunun her iki tarafında meydana gelmesidir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Art-iz etkisi (Sümer vd. [80])

Salınımlı akımda art-iz yapısının şekli ve etki mesafesi Keulegan-Carpenter (KC=U_mT_w/D=2 π a/D) sayısı tarafından düzenlenmektedir (Denklem 2.10). Küçük KC sayılarında su partiküllerinin yörüngesel hareketi borunun toplam genişliğine göre küçük olmaktadır. Bu durumda borunun arkasında ayrılma meydana gelmemektedir. Büyük KC sayılarında su partiküllerinin yörüngesel hareketi borunun toplam genişliğine göre oldukça büyüktür. Bu durumda ayrılma ve vorteks saçılımı meydana gelmektedir. Çok büyük KC sayılarında ise (KC $\rightarrow\infty$) hareketin her bir yarım periyodu için akımın kararlı akım yapısına benzediği düşünülmektedir.

KC sayısının büyük değerlerinde (KC≥6) silindirin art-iz bölgesinde vorteks sokağı şekillenmektedir. Bu sokağın uzunluğu, L_v, KC sayısının artması ile lineer olarak artmaktadır (Şekil 3.12b).

$$\frac{\Delta L}{D} = 0.3 \text{KC} \tag{3.5}$$

Burada, ΔL , akımın bir yarım periyodunda art-iz bölgesinin etkilediği alandır. Denklemin (3.5) (Jensen vd. [59]) tarafından yapılan akım görünürlüğü deneyine dayanmakla birlikte, teorik benzeşim ile de oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Borunun mansap tarafında art-iz bölgesinden etkilenen tabanın uzunluğu KC sayısına bağlıdır. Şekil 3.13'de görüldüğü gibi akımın periyodunun bir yarısında mansaptaki artiz tarafından etkilenen akım yönündeki mesafesi KC sayısı büyüdükçe artmaktadır.



Şekil 3.13 Akımın bir yarım periyoduna karşılık gelen art-iz'in akım yönündeki gelişimi (Sümer ve Fredsøe [81])

Akım art-iz bölgesinde tabanı daha kuvvetli bir şekilde erozyona uğrattığı için artan KC sayısı ile borunun her iki tarafında oyulma çukurunda daha yumuşak eğimler elde edilmektedir.

Oyulma çukurunun her iki tarafındaki eğimlerin gittikçe yumuşak bir hal alması ile borunun altındaki akım bölgesi dış akımlara karşı daha fazla maruz kalacağından borunun altındaki akım hızı artacak ve daha fazla oyulmaya neden olacaktır. Bunların hepsi oyulma derinliğinin KC sayısı ile doğru orantılı bir şekilde artığını göstermektedir.

3.2 İki Boyutlu Oyulma

İki boyutlu akım yapısında oyulma derinliği kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve oldukça da iyi anlaşılmıştır. En çok ise tam gelişmiş safha olarak adlandırılan denge oyulma derinliği vurgulanmıştır.

3.2.1 Kararlı akım (Akıntı) etkisinde oyulma derinliği

Kararlı akım etkisinde oyulma derinliği konusu Chao ve Hennesy [83], Kjeldsen vd. [84], Littlejohns [85], Herbich [86], Bijker ve Leeuwenstein [87], İbrahim ve Naulluri [88], Mao [74], Kristiansen [89], Kristiansen ve Torum [90], Sümer ve Fredsøe [81], Chiew [91] vd., gibi çoğu araştırmacının dikkatini çekmiştir.

Boru hatlarındaki oyulma derinliği ile ilgili deneysel çalışmayı ilk defa (Kjeldsen vd. [92]) yapmıştır. Kjeldsen oyulma derinliği dengesinin borunun geometrisine bağlı olduğunu ve akım hızının zayıf bir etkisi olduğunu gözlemlemiştir. Araştırmacı başlangıçta zemine yerleştirilmiş ve tek yönlü akıma maruz bir denizaltı boru hattı altındaki maksimum yerel oyulma derinliği S için (Coleman [93])'ın vermiş olduğu aşağıdaki şu ampirik ifadeyi elde etmiştir. Bu boyutsuz homojen denklem içinde $\frac{S}{D} \alpha \theta^{0.2}$ olduğu belirtilmiştir.

$$S = 0.972 \left(\frac{U_0^2}{2g}\right)^{0.2} D^{0.8}$$
(3.6)

Burada U_0 rahatsız edilmemiş ortalama akım hızını, D boru çapını göstermektedir. Bu denklem oyulma derinliğinin boru çapı ve kısmen akım hızı ile orantılı olduğunu ancak akım derinliği ve tane çapı ile bir ilişkisi olmadığını göstermektedir. Akım hızı ve tane

çapı dikkate alınarak Shields parametresi hesaplandığında deney şartlarının hareketli taban durumu için olduğu görülmektedir.

Bijker ve Leeuwenstein [87] borulanma, tünel erozonu, art-iz erozyonunu tanımlamışlar ve Kjeldsen' e dayanarak yeni bir ampirik bağıntı elde etmişlerdir.

$$S = 0.929 \left(\frac{U_0^2}{2g}\right)^{0.26} D^{0.78} d_{50}^{-0.04}$$
(3.7)

Burada U_0 rahatsız edilmemiş ortalama akım hızını, D boru çapını, d₅₀ tane çapını göstermektedir. Araştırmacılar boru hattı çevresindeki oyulmanın başlıca nedenini; boru hattı çevresindeki akım yapısında meydana gelen değişimin sebep olduğu taşıma kapasitesindeki yerel artıştan kaynaklandığını, taşıma kapasitesinin azalmasıyla birlikte yığılmanın meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Deneysel çalışmalarla boru hatlarındaki yerel oyulmayı temiz-su ve hareketli taban olarak sınıflayarak oyulma sürecinin açık bir şekilde anlaşılmasını sağlamışlardır (İbrahim ve Naulluri [88]). Bu kapsam da her koşul için farklı bir formül elde etmişlerdir.

Temiz su durumu için $(U/U_{kr} < 1)$:

$$\frac{S}{D} = 4.706 \left(\frac{U}{U_{kr}}\right)^{0.89} \left(\frac{U}{\sqrt{gd}}\right)^{1.43} + 0.06$$
(3.8)

Hareketli taban durumu için (U/U_{kr}>1):

$$\frac{S}{D} = 0.084 \left(\frac{U}{U_{kr}}\right)^{-0.30} \left(\frac{U}{\sqrt{gd}}\right)^{-0.16} + 1.33$$
(3.9)

Bu denklemler hız, boru çapı ve akım derinliği ile orantılıdır. Denklem (3.8)'de akım hızı ile doğru ve akım derinliği ile ters orantılı olmasına rağmen, hareketli taban durumunda tam tersi olduğu görülmektedir. Bu denklemler oyulma işleminin fiziksel tanımından değil eğri uygunluk denkleminden çıkartılmıştır.

Kjeldsen vd. [92], Lucassen [94], Mao [74], oyulma derinliği üzerinde Re sayısının zayıf etkisini göstermek için Kristiansen [89]'in oyulma derinliği üzerindeki deneysel çalışmalarını toplayarak bir araya getirmişlerdir (Sümer ve Fredsøe [81]) (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Kararlı akım durumunda denge oyulma derinliği için veriler. Hareketli taban $(\theta > \theta_{kr})$ (Sümer ve Fredsøe [81])

Sümer ve Fredsøe [80] temiz su durumunda ($\theta < \theta_{kr}$) oyulma derinliği ile Shields parametresi arasında değişimin belirgin olduğunu, hareketli taban durumunda ise çok küçük değişim gözlemlenildiğini açıklamışlardır. Kjeldsen vd. [92] S/D ve θ arasında zayıf bir bağıntı önermelerine rağmen bu zayıf değişim genellikle ihmal edilmiştir (Sümer ve Fredsøe [80]).

Yasa [95] dalga etkisi altında hareketli bir taban üzerindeki boru hattının çevresindeki oyulmayı araştırmıştır. Araştırmacı oyulma ile ilgili çeşitli deneyler yapmıştır. İlk olarak daha önce yapılan deneysel verileri toplayarak geniş bir veri seti elde etmiştir. Bu veri seti önerilen formüllerin doğruluğunu artırabilmektedir. Daha sonra oyulma derinliği üzerinde farklı parametrelerin etkisini araştırmıştır. Hareketli taban ve temiz su durumunda oyulma derinliğinin tahmini için çoklu regresyon analizini kullanarak basit ve kesin bir model geliştirmiştir.

Yasa [95] oyulma derinliği üzerinde farklı parametrelerin etkilerini araştırmıştır. Araştırmacı hareketli taban ve temiz su durumunda deniz altı boru hatları altında dalga nedenli oyulma derinliği tahmini için çoklu regresyon analizi kullanmıştır. Bu metodu kullanmanın en büyük avantajı araştırmacılar tarafından kullanılabilecek açık, anlaşılır ve basit bir formül elde etmektir.

Lucassen [94] farklı parametreler ve oyulma derinliği arasında ilişki bulabilmek için Delft Üniversitesinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Sümer ve Fredsøe [80] deniz altı boru hatları etrafındaki oyulmayı araştırmak için salınımlı U-Tüp (U-tube) ve dalga kanalı deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar Lucassen [94] ve kendi verilerine dayanarak bir ampirik denklem önermişlerdir.

$$\frac{S}{D} = 0.1\sqrt{KC} \exp(-0.6\frac{e}{D}) \ 0 \le \frac{e}{D} \le 2$$
(3.10)

$$KC = \frac{U_m T}{D}$$
(3.11)

Burada oyulma derinliği S, boru çapı D, e ilk açıklık, U_m , tabandaki su partiküllerinin rahatsız edilmemiş yörüngesel hızlarının maksimum değeri, T, periyottur. Denklem oyulma derinliğinin açıklık oranı ve KC sayısına bağlı olduğunu belirtmektedir. Araştırmacılar oyulma derinliğinin Shields parametresi (θ) ile zayıf bir değişimi olduğunu ifade etmişlerdir.

$$\theta = \frac{u_*^2}{g(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)d_{50}}$$
(3.12)

Burada, u_* , taban kayma hızı, ρ_s , katı maddenin özgül kütlesi, ρ , akışkanın özgül kütlesi, d_{50} , ortalama tane çapı, g, yerçekimi ivmesidir. Bu konuyla ilgili (Çevik ve Yüksel [96]), (Pue vd. [97]), (Mousavi vd. [98]) gibi araştırmacıların çalışmaları da bulunmaktadır. Bu çalışmalar KC ve e/D'ye bağlı iki boyutlu oyulma derinliğine dayanmaktadır. Ancak bu çalışmalardan elde edilen formüller (Sümer ve Fredsøe [80])'nin formülleri kadar kesin değildir.

Hareketli taban koşulunda maksimum oyulma derinliği için aşağıdaki formüller önerilmiştir (Etemad-Shahidi vd. [99]).

$$\frac{S}{D} = 0.024 \text{KC}^{0.763} \exp(-0.631 \text{e/D}) \qquad \text{e/D} > 0.145 \qquad (3.13)$$

$$\frac{S}{D} = 0.105 \text{KC}^{0.503} \exp(-0.284 \text{e/D}) \qquad \text{e/D} \le 0.145$$
(3.14)

Hareketli taban durumunda taban üzerinde taşınım etkindir ($\theta > \theta_{kr}$).

Temiz su ve hareketli taban koşullarında aşağıdaki formüller önerilmiştir (Etemad-Shahidi vd. [99]).

$$\frac{S}{D} = 3.344 \text{KC}^{0.512} \theta^{1.296} \exp(-2.32\text{e/D}) \qquad \theta \le 0.064$$
(3.15)

$$\frac{S}{D} = 0.149 \text{KC}^{0.477} \theta^{0.121} \exp(-0.472 \text{e/D}) \qquad \theta > 0.064 \text{ ve e/D} \le 0.145$$
(3.16)

$$\frac{S}{D} = 0.048 \text{KC}^{0.782} \theta^{0.121} \exp(-0.942 \text{e/D}) \qquad \theta > 0.064 \text{ ve e/D} > 0.145$$
(3.17)

Temiz su durumunda borudan uzakta katı madde hareketi meydana gelmemektedir $(\theta < \theta_{kr})$.

Farklı araştırmacıların verilerini toplayarak bir veri seti oluşturmuştur (Yasa [95]). Bununla birlikte veri seti içindeki parametreler ve boyutsuz oyulma derinliği arasındaki korelasyon katsayılarını Çizelge 3.1'de vermiştir.

Veri Seti	KC	e/D	θ
Sümer ve Fredsøe (1990)	0.832	- 0.463	0.1
Pu vd. (2001)	0.455	- 0.255	0.560
Lucassen (1984)	0.849		0.198
Tümü	0.746	- 0.33	0.205

Çizelge 3.1 Korelasyon katsayıları (Yasa [95])

Daha önceki formüllerde oyulma derinliği daha çok KC ve e/D parametrelerine bağlıdır. Aksine tablodan oyulma üzerinde θ ve S/D arasında önemli bir ilişki olduğu görülmektedir.

KC sayısı arttıkça oyulma derinliğinin arttığını ifade etmiştir (Yasa [95]) (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 KC sayısının S/D ile değişimi (Yasa [95])

Tabanın düzensizliğinden dolayı boru hatları nadir olarak tabana boşluksuz döşenmektedir. Boru hattı tabana yerleştirildiğinde bir kısmı tabandan daha yukarıda kalıyorsa ilk açıklık (e/D) var demektir. Şekil 3.16'da açıklık oranı, e/D, arttıkça rölatif oyulma derinliği, S/D,'nin azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.16 S/D'nin e/D ile değişimi (Yasa [95])

Sümer ve Fredsøe [80]'nin ifadelerinin aksine Shields parametresi, θ , arttığında oyulma derinliği gittikçe artmaktadır (Yasa [95]).

Çalışmasında çoklu regresyon analizini kullanarak dalga nedenli oyulma derinliğini tahmin etmiştir (Yasa [95]). Bu kapsamda ilk olarak hareketli taban verilerini kullanmıştır. Hareketli taban durumunda en basit ve en doğru formülü seçerek aşağıda ifade etmiştir.

$$\frac{S}{D} = 0.1 \text{KC}^{0.53} \exp(-1.54 \text{e/D})$$
(3.18)

Daha sonra hareketli taban ve temiz su verilerini kullanarak her iki durumda oyulma derinliği tahmini için aşağıdaki modeli vermiştir.

$$\frac{S}{D} = 0.07 K C^{0.59} exp(-1.54 e/D + 1.02\theta)$$
(3.19)

Shields parametresi özellikle temiz su durumunda oldukça önemlidir (Yasa [95]). Bundan dolayı he iki durumda oyulma derinliği tahmini için denklem 3.19 kullanılmıştır. Çizelge 3.2'de modellerin korelasyon, R, hataların ortalamasının kare kökü, RMSE ve saçılım indeksi, SI değerleri görülmektedir.

Model	Koşul	SI	R	RMSE
(Sümer ve Fredsøe [80])	Hareketli	29.64	0.90	0.092
(Shadidi vd. [99])	Hareketli	21.34	0.95	0.060
(Shadidi vd. [99])	Temiz su	25.44	0.94	0.080
(Yasa [95])	Hareketli	24.35	0.92	0.080
(Yasa [95])	Hareketli+Temiz su	30.80	0.90	0.092

Çizelge 3.2 Farklı modellerin istatiksel değerleri

Yasa [95] kısaca, hem hareketli taban hem de temiz su koşulunda dalga hareketi altında hareketli bir taban üzerinde deniz altı boru hatları çevresindeki oyulmayı incelemiştir.

İlk olarak mevcut deneysel verileri toplayarak geniş bir veri seti elde etmiştir. Daha sonra oyulma üzerinde farklı parametrelerin etkisini araştırmıştır. Oyulma derinliği tahmini için basit ve doğru bir bağıntı bulabilmek için regresyon analizini kullanmıştır. Farklı parametrelerin birleşimlerini test ederek çeşitli modeller geliştirmiştir. Hareketli taban durumunda KC ve e/D, hem temiz su hem de hareketli taban durumunda ise KC, e/D, θ parametrelerini kullanarak iki denklem seçmiştir. Bu formüller öncekilerine oldukça yakındır. Bu formüller (Sümer ve Fredsøe [80])'nin formüllerinden daha doğru sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte önerilen formüller (Shadidi [99])'nin ki kadar doğru değildir. Ancak formüllerin oyulma derinliğinin tahmininde kullanılması oldukça kolaydır.

3.2.2 Dalga etkisinde oyulma derinliği

Salınımlı akım etkisinde bir silindir çevresindeki vortekslerin saçılması üzerine akım görünürlüğü deneyleri ile sadece dalga etkisinde oyulma derinliği çalışmaları yapmışlardır (Jensen, Sümer ve Fredsøe [100]).

Sümer vd. [7], Sümer ve Fredsøe [69] salınımlı akıma maruz ve cidara yakın yerleştirilmiş bir silindir çevresindeki vorteks-akım rejiminin detaylı hesaplamasını sağlamak için çalışmalara devam etmişlerdir. Salınımlı akım durumunda mansap şeklinin büyümesi ve oluşumu için ana parametre olarak Keulegan-Carpanter (KC) sayısı tanımlanmıştır. Rölatif oyulma derinliği ve KC sayısı arasında bir bağıntı elde edebilmek için Sümer ve Fredsøe [81] kendi verileri ile Lucassen [94]'in verilerini toplayarak bir araya getirmişlerdir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 Sadece dalga etkisinde denge oyulma derinliği. Hareketli taban ($\theta > \theta_{kr}$). (Sümer ve Fredsøe [81])

S/D ile KC değişimini tanımlamak için en küçük kareler yöntemi kullanılarak aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{S}{D} = 0.1\sqrt{KC} \tag{3.20}$$

3.2.3 Dalga ve akıntı etkisinde oyulma derinliği

Dalga ve akıntı birleşiminde oyulma derinliği Lucassen [94], Bernetti vd. [101], Hansen [102], Sümer ve Fredsøe [103] tarafından çalışılmıştır. Lucassen [94] ana parametreler üzerindeki aralığın sınırlı olmasına rağmen dalga ve akıntı kombinasyonun da ilk deneysel araştırmayı yapmıştır. Bernetti vd. [101], Hansen [102] karşılaştırma için sınırlı sayıda deneysel veri olmasına rağmen sayısal yaklaşımı tercih etmişlerdir. Sümer ve Fredsøe [103] ana parametrelerin geniş bir aralığını kapsayarak deneysel verileri genişletmişlerdir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Dalga ve akıntı birleşiminde denge oyulma derinliği. Hareketli taban ($\theta > \theta_{kr}$) (Sümer ve Fredsøe [103])

3.2.4 Sığlaşma koşullarında oyulma derinliği

Oyulma bir engel çevresinde akım yapısının değişmesiyle taban malzemesinin erozyonundan dolayı engel çevresinde taban seviyesinin ani olarak azalmasıyla meydana gelmektedir. Akım yapısının değişmesiyle engel çevresinde oluşan vorteks sistemler dolayısıyla sekonder akımın etkisi ile tabanda dengede bulunan malzemelerin yerinden sökülmesi ve taşınması böylece engel etrafında oyulmanın başlaması ve oyulma çukurunun oluşması şeklinde olaylar zinciri şeklinde sıralanabilir. Oyulmanın matematiksel ifadesi

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{Q}_{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{q}_{\mathrm{s}} - \mathbf{q}_{\mathrm{so}} \tag{3.21}$$

 dQ_s/dt - birim zamanda yerel oyulma hacminde meydana gelen değişme, q_s -birim zamanda akımın kapasitesiyle oyulma çukurundan taşınan malzeme miktarı, q_{so} -rahatsız edilmemiş akımın oyulma çukuruna taşıdığı katı madde miktarıdır.

q_s=q_{so}=0 halinde, oyulma yoktur.

 $q_{so}\approx 0$ ve $q_{so}\ll q_s$ halinde, tabanda sürtünme hareketi yokken oyulma vardır. Bu durumdaki oyulmaya " temiz su halindeki oyulma" denmektedir.

 $q_s>q_{so}>0$ halinde, tabanda hem sürtünme hareketi hem de oyulma vardır. Bu durumdaki oyulmaya "hareketli taban oyulması" denmektedir.

Yukarıdaki ifadelerden anlaşıldığı gibi tabanda sürüntü hareketi olmadığı halde bile engel etrafında oyulma meydana gelmektedir. Bunun nedeni, engelden dolayı oluşan türbülans ve vorteksler engel çevresindeki taban kayma gerilmesini etkilediğinden tabanda oyulmaya sebep olmaktadırlar. Temiz su oyulmasında, maksimum denge oyulma derinliğine, oyulma çukuru çevresindeki kayma gerilmeleri katı maddeyi hareket ettirebilecek gücün altına düştüğünde ulaşılmaktadır. Bu durumda maksimum oyulmaya daha uzun zamanda varılır (Şekil 3.19a)

Hareketli taban oyulmasında, maksimum denge oyulma derinliğine, oyulma çukuruna giren katı madde ile oyulma çukurundan çıkan katı madde birbirine eşit olduğu durumda ulaşılmaktadır. Bu durumda maksimum oyulmaya çok kısa zamanda ulaşılır ve bu seviyede oyulma çukuru denge değeri civarında periyodik olarak değişmekte bunun nedeni ise hareketli tabanda oluşabilecek taban şekilleridir (Şekil 3.19b).



Şekil 3.19 Oyulmanın zaman göre değişimi (Çevik [104])

Oyulma çukurunun sınır geometrisi devamlı değişmektedir. Sınır geometrisindeki bu değişim akım alanını ve bu da yerel akım hızını değiştirecektir. Böylece akımın taşıdığı sürüntü yükü de değişecektir. Oyulma devam ettikçe hız azaldığından, q_s de gittikçe azalır ve sonunda q_{so} 'a eşit olur ve $dQ_s/dt=0$ olacağından oyulma durur. Oyulma olayı kararlı bir karakter taşımadığı halde artık zamanla değişmeyen kararlı bir duruma ulaşılır. Bu oluşan denge durumuna " dinamik denge" adı verilir. Denizaltı boru hatları etrafındaki yerel taban hareketine etkili parametreler;

- a) Katı madde özellikleri ve granülometrenin etkisi
- b) Akım ve yörüngesel hızların etkisi
- c) Dalga karakteristiklerinin etkisi
- d) Atak açısının etkisi
- e) Derinliğin etkisi
- f) Taban şekillerinin etkisi
- g) Açıklık oranının etkisi
- h) Kıyı profillerinin etkisi

3.2.4.1 Sığlaşmanın akım alanı üzerine etkileri

Dalgaların kıyıya doğru ilerlemeleri esnasında azalan derinlik etkisini göstermeye başlar. Sığlaşma ile birlikte dalgaların boyları kısalır, yükseklikleri ve diklikleri artar. Böylece belli bir derinliğe ulaştıklarında tepeleri köpürerek kırılırlar. Kırılma belli bir derinlikte akışkan partiküllerinin yörüngesel yatay hız bileşeninin, dalga yayılma hızından büyük olması halinde bu partiküllerin dalga formundan ayrılmasıyla başlar ve bu olay büyük enerji kayıpları meydana gelmesine neden olur. Bu enerji kayıbından dolayı surf bölgesi içerisinde ilerleyen dalgaların yükseklikleri hızla azalır.

1/5 ve 1/10 eğimlere sahip iki farklı kıyı şevi üzerinde sığlaşma ile ilgili deneyler yapmıştır (Çevik [104]). Dalgaların eğimli tabanda ilerlemeleri sırasında dalga parametrelerinde değişikliklerin meydana geldiği bilinmektedir. Yerel dalga karakteristikleri yaklaşan dalga özellikleri ve taban eğimi ile oldukça yakından ilgilidir.

Şekil 3.20a'da 1/5 şev eğimli kanalda yapılan deneylerde spilling, plunging ve surging tipi karakter taşıyan dalgalar görülmektedir. Sığlaşmanın genel özelliği bütün dalgalar için aynı karaktere sahip olsa da, farklı kırılma tipleri için sığlaşma, (H/H₀), rölatif derinliğe, (d/L₀) bağlı olarak kendine has karakteristik bir değişim göstermektedir. Dalga dikliğinin büyük olduğu spilling tipi dalgalar daha açıkta sığlaşma etkisine maruz kalmakta, dolayısıyla sürekli olarak küçülerek kıyıya doğru ilerlemektedir. Buna karşılık dalga dikliğinin daha küçük olduğu plunging tipi dalgalar kıyıya daha yakın, yani rölatif derinliğin 0.1'den küçük olduğu bölgede büyük sığlaşma katsayılarına ulaşmakta ve maksimum büyüklüğe ulaştıktan sonra aniden küçülmektedir. Bu tip dalgalarda kırılmadan sonra enerji kaybı çok büyük olup Şekil 3.20'de kırılmadan sonra sığlaşma değişiminin büyük bir eğime sahip olmasından da bu anlaşılmaktadır. Dalga dikliğinin çok daha küçük olduğu surging tipi dalgalarda ise kıyıya çok daha yakın bölgede maksimum dikliklere ulaşmaktadırlar.

Iwagaki vd. [105], Swift ve Dixon [106], Kamphius [107] rölatif derinliğin $d/L_0<0.1$ olduğu hallerde lineer dalga teorisinin geçersiz olduğunu ve Cnoidal teori ile lineer olmayan dalga teorilerinin uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca H/H₀ oranının sadece rölatif derinliğe, (d/L_0), değil aynı zamanda yaklaşan dalga dikliğine de bağlı olduğunu da göstermişlerdir. Dalga dikliğinin azalmasıyla dalgalar maksimum sığlaşma katsayılarına daha küçük derinlik parametresinde ulaşmaktadır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 a) 1/5 ve b) 1/10 eğimli tabanda sığlaşma (Çevik [104])

Rölatif derinliğin $d/L_0 < 0.1$ olması durumunda lineer dalga teorisi geçerli değildir. Rölatif derinliğin bu sınırından sonra Cnoidal dalga teorisi uygulanmıştır (Yüksel ve Narayanan [108]). Iwagaki vd. [105] kompleks hesaplamalar gerektiren Cnoidal dalga teorisi yerine bu teoriyi kullanarak elde edilmiş daha basit bir ifade önermişlerdir (Denklem 3.22).

$$\frac{H}{H_0} = K_s = (1 + \frac{2kd}{\sinh kd}) \tanh kd + 0.0015(\frac{d}{L_0})^{-2.8}(\frac{H_0}{L_0})^{1.2}$$
(3.22)

Cnoidal teoriden ve deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.21'de bir arada gösterilmektedir. Farklı iki dalga dikliği için elde edilen deneysel sonuçlar Cnoidal teoriden elde edilen değerler ile karşılaştırılmış ve uyum içinde oldukları görülmektedir.



Şekil 3.21 s=1/10 için deneylerden elde edilen sığlaşma katsayılarının Cnoidal teori ile karşılaştırılması (Çevik [104])

Daha önceki çalışmalardan da bilindiği gibi kırılma noktasındaki derinlik ve dalga yüksekliği derin su dalga parametrelerine H_0 , L_0 ve taban eğimine bağlıdır. Ancak eğimli bir tabanda kırılan dalgaların mekaniği ile ilgili bugüne kadar kabul edilmiş herhangi bir teori mevcut değildir. Bunun için Alpet ve Piorewicz [109]) kırılan dalga yüksekliği için denklem 3.23, kırılma derinliği için (Singamsetti ve Wind [110]) denklem 3.24 ve kırılan dalga yüksekliği veya kırılma noktasındaki derinlik için (SPM [111]) denklem 3.25 gibi aşağıdaki ampirik ifadeleri kullanmışlardır.

$$\frac{H_{b}}{H_{0}} = 0.76m^{1/7} (\frac{H_{0}}{L_{0}})^{-1/4}$$
(3.23)

Bu ifade kırılma noktasındaki dalga yüksekliği, H_b , şev eğimi,m, ve derin su dalga dikliğine bağlı olup $0.002 \le H_0/L_0 \le 0.09$ ve $1/50 \le m \le 1/5$ sınır şartlarında geçerli olmaktadır.

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.937 m^{0.155} (\frac{H_0}{L_0})^{-0.13}$$
(3.24)

Bu ifade $0.002 \le H_0/L_0 \le 0.06$ ve $1/40 \le m \le 1/5$ sınır şartlarında geçerli olmaktadır.

$$\frac{d_{b}}{H_{b}} = \frac{1}{b - (aH_{0}/gT^{2})}$$
(3.25)

 $a=43.75(1-e^{-19m})$ ve $b=1.56/(1+e^{-19.5m})$ dir.

Dalga kırılma tipi, surf parametresi yardımı ile tespit edilmektedir (Novak vd. [112]).

$$\xi = s/(H_0/L_0)^{0.5} \tag{3.26}$$

Bu parametreye göre kırılan dalgalar

 ξ <0.5 spilling,

0.5<ξ<3.3 plunging,

 ξ >3.3 surging olarak sınıflandırılmaktadır.

Şekil 3.22'de deneylerden elde edilen değerler (3.23), (3.24) ve (3.25) eşitlikleri ile kıyaslanmaktadır. Deneysel sonuçların bu ifadelerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca d_b/H_b oranı surf parametresi arttıkça küçülmekte, dalga dikliği ile de artmaktadır. Bu da (Battjes [113])'in çalışmasıyla uygunluk göstermektedir.



Şekil 3.22 Rölatif kırılma yüksekliğinin derin su dalga dikliği ile değişimi (Çevik [104])

Sığlaşma bölgesindeki hidrodinamik şartlar son derece önemlidir. Bunun için taban kayma gerilmesi değişiminin belirlenmesi, katı madde taşınımının dolayısıyla deniz yapıları etrafındaki yerel oyulma mekanizmasının anlaşılması açısından oldukça önem taşımaktadır (Cevik ve Yüksel [114]). Cevik kayma gerilmesi ölçümlerini her bir dalga şartı için düzlem taban, 1/5 ve 1/10 kıyı eğimlerinde yaparak her deney şartında elde edilen verilerin aritmetik ortalamasını değerlendirmeye almıştır. Ayrıca farklı dalga şartları için surf bölgesi içindeki ve dışındaki kayma gerilmesinin zamanla değişimini incelemiştir. Kıyıya doğru olan taban kayma gerilmesinin süresi açığa doğru olan taban kayma gerilmesinden daha uzun olduğu, surf bölgesi içinde taban kayma gerilmesinde türbülans etkisinin fazla olduğu özellikle kıyı yönündeki taban kayma gerilmesinde bu etkinin daha büyük olduğu sonucuna varmıştır. Kırılmadan önce ve sonra anlık taban kayma gerilmelerinin aynı dalga periyodu içerisinde iki kere pike ulaştığı ancak plunging noktasında türbülans şiddetinin daha arttığı ve bu noktada daha simetrik bir türbülanslı yapı oluştuğunu belirtmiştir. Bunun nedeni plunging noktasında ileri ve geri doğrultuda hareket eden makro türbülanslı batık çevrilerdir. Zayıf plunging veya spilling tipi kırılma ile plunging tipi kırılmaya ait kayma gerilme değişimlerinin birbirlerine benzediği sonucuna varmıştır. Ancak plunging tipi kırılmada elde edilen kayma gerilmesi şiddetlerinin spilling tipi kırılmaya nazaran daha fazla olduğunu görmüştür. Surging tipi kırılmayı da inceleyerek kayma gerilmesi değişiminin diğerlerine benzediğini belirtmiştir.

Taban kayma gerilmesi maksimum değerine kırılma noktasında değil plunging noktasında ulaşmaktadır. Plunging noktasında suyun jet şeklinde tabana çarpması ile çok şiddetli vorteks yapısının oluşması bu bölgede türbülansın şiddetini artırmaktadır. Tabana yerleştirilmiş yatay silindirlere tesir eden kırılan dalga kuvvetleri ile ilgili yaptıkları çalışmada da maksimum dalga kuvvetinin plunging noktasında meydana geldiğini belirtmişlerdir (Yüksel ve Narayanan [115]).

Taban kayma gerilmesinin kıyı şevi boyunca değişimini daha iyi anlayabilmek için her bir dalga şartında yerel taban kayma gerilmesi düzlem tabana ait kayma gerilmesi ile normalleştirerek (τ/τ_0) derinlik parametresiyle (d/H₀) değişimini göstermiştir (Çevik [104]). Ölçüm yapılan her derinlik için maksimum anlık kayma gerilmesini dikkate alarak sonuçları değerlendirmiştir. Derinlik parametresinin (d/H₀) 2.5 değerine kadar rölatif kayma gerilmesinin daha yavaş değiştiğini ancak bu değerden sonra artma meyilinin daha büyüdüğünü ve bu artışın d/H₀'ın 2 değerinden sonra oldukça belirgin olduğunu görmüştür. Bunun nedeni dalgaların kırılma bölgesine yaklaştıkça dikliklerinin artmasıdır. Rölatif kayma gerilmesinin kırılma bölgesine yakın bölgelerde yaklaşan dalga dikliğine bağlı olarak (d/H₀=2-3) yaklaşık 2 değerine ulaştığını belirtmiştir. Yerel kayma gerilmesindeki bu artışın maksimum değerinin plunging noktası yakınlarında düzlem tabanda ölçülen taban kayma gerilmesinin hemen hemen 3 katı olduğu sonucuna varmıştır. Bu da surf bölgesi içinde katı madde hareketinin çok şiddetli olduğunu açıklamaktadır. Boyutsuz kayma gerilmesinin dalga diklikleri ile sistematik bir değişim gösterdikleri belirlenememesine rağmen, belirli bir derinlikte anlık kayma gerilmesinin dikliği büyük olan dalgaların kayma gerilmelerinin, dalga dikliği küçük olanlara göre biraz daha küçük olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca 1/5 ve 1/10 kıyı şev eğimleri karşılaştırıldığında boyutsuz kayma gerilmelerinin hemen hemen aynı değişimi gösterdiğini belirtmiştir.

Her bir dalga şartı için taban yakınındaki yörüngesel hızları ölçerek maksimum değerlerini dikkate almıştır (Çevik ve Yüksel [114]). Şekil 3.23 düzlem tabanda ölçülen hızların derin su dalga dikliklerine bağlı olarak değişimini göstermektedir. Ayrıca aynı dalga şartları için hazırlanan bilgisayar programları yardımıyla teorik hız değerlerini de hesaplayarak işaretlemiş ve aralarındaki uyumu göstermiştir. Her bir teoriyle hazırlanan hızlara göre ayrı ayrı bakıldığında lineer dalga teorisinden elde edilen hızların daha küçük, buna karşın akım fonksiyonu cinsinden elde edilenlerin biraz daha büyük olduklarını belirtmiştir (Şekil 3.23). Bu teoriler arasında en uyumlu sonucu Cnoidal dalga teorisinin verdiğini ayrıca (Yüksel ve Narayanan [108])'ın deneysel sonuçlarıyla tam bir benzerlik gösterdiğini vurgulamıştır. Şekil 3.23'de hızların dalga dikliği ile değişimine bakıldığında düzlem taban halinde dalga dikliği küçüldüğünde taban hızının arttığı ve belli bir diklikten (0.013) sonra taban yakınındaki hızların tekrar azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise bu diklikten sonra aynı periyodda fakat daha küçük yükseklikteki dalgaların daha küçük taban hızının neden olmasıdır (Chakrabarti [116]).



Şekil 3.23 Düzlem tabanda (d=35 cm) yörüngesel hızlar (Çevik [104])

Taban yakınındaki yörüngesel hızları 1/5 ve 1/10 kıyı eğimleri boyunca 10 farklı derinlikte her dalga şartı için ölçmüştür (Çevik [104]). Şekil 3.24'de derinlik parametresi küçüldükçe hızların arttığı görülmektedir. Şekil 3.24'de teorilerden elde edilen hızlar derinlik parametresinin 1.3 değerine kadar işlenerek deneysel sonuçların teorilerle uygunluğu görülmektedir. Ancak $d/H_0 < 1.3$ olduğu değerden itibaren teoriler artık geçerli olmamakta çünkü bu derinlikten itibaren kırılma bölgesine girilmektedir.



Şekil 3.24 Kıyı boyunca taban yakınında yörüngesel hızın değişimi (Çevik [104])

Oyulma ile ilgili deneylerin değerlendirilmesine geçilmeden önce kıyı profillerinin belirlenmesinin, bu profillerin boru hatları etrafındaki oyulma çukurları üzerine olan etkilerinin anlaşılması açısından son derece yararlı olacaktır (Çevik [104]). Bu nedenle her iki kıyı eğiminde farklı dalga şartları için kıyı profilleri ele edilerek profillerin aldığı şekiller (Horikawa [117])'in elde ettiği ampirik ifadeyle değerlendirilmiştir. Şekil 3.25'den de görüldüğü gibi kıyı profillerinin sınıflandırılmasında derin deniz dalga dikliği H_0/L_0 oldukça etkili bir boyutsuzdur. Aynı dalga periyodu için dalga yüksekliğinin artması halinde normal profilden fırtına profiline doğru değişim gözlenmektedir. Buda dalga yüksekliğinin kıyı profillerinin şekillenmesinde etkili olduğunu göstermektedir. O halde derin su dalga dikliği kıyı profilinin şekillenmesini tam olarak açıklamamaktadır. (Horikowa [117]) ve (Hallermier [118]) kıyı profillerinin oluşumunda tane çapının dalga uzunluğu oranının da etkili bir boyutsuz olduğunu belirttikleri halde (Çevik [104]) yaptığı çalışmada sabit tane çapı kullandığından bu etkiyi irdeleyememiştir.

1/5 kıyı şev eğiminde elde edilen profiller (Horikawa [117])'nın çalışmalarıyla oldukça benzer olmasına rağmen oluşan normal profillerin batık olduğu dikkati çekmektedir (Çevik [104]). Bunun en büyük nedeni ise kıyı şev eğiminin oldukça dik olmasıdır. 1/10 kıyı eğiminde aynı derin su dalga dikliği ile kıyıya yaklaşan dalga, eğimin daha yatık olması nedeniyle kırılma tipi 1/5 eğime göre farklılık göstermektedir. Çünkü 1/5 eğimde surging tipi kırılan dalgalar 1/10 eğimde plunging tipi kırılmakta ve bu durumda geri dönüş akımı tam olarak çekilmeye fırsat bulamadan ardışık dalga yaklaşmaktadır. Böylece askı modundaki katı madde kıyı çizgisinde yığılmaktadır. O halde surf parametresi (ξ) kıyı profillerinin şekillenmesini derin su dalga dikliğine göre daha iyi tanımlamaktadır.

Hareketli tabanlı bir su kanalındaki tek yönlü akım hali için boru hatları etrafındaki yerel oyulma derinliğinin aşağıdaki boyutsuz parametrelerin fonksiyonu olduğu belirlenmiştir.

$$S/D = f(d/D, d_{50}/D, \text{Re}, \theta, X/D)$$
 (3.27)

Burada Re(=UD/v) boruya ait Reynolds sayısı, θ Shields parametresi, d/D rölatif su derinliği, d₅₀/D rölatif tane çapı parametresi ve X/D ise vorteks etki parametresidir. Ancak tabanın hareketli olması durumunda Shields parametresinin oyulma olayına etkisinin olmadığı çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenmiştir.

Sırf dalga durumunda rölatif oyulma derinliği aşağıda belirtilen boyutsuz parametrelere bağlıdır, bunlar;

$$S/D=f(Re, KC, \theta, \xi, d/H, d/D, U_R, H/L, H/D)$$
 (3.28)

$$S/D=f(\beta, KC, \theta, \xi, d/H, d/D, U_R, H/L, H/D)$$
(3.29)

dir, burada H/L dalga dikliği, d/H, derinlik parametresi, KC (U_mT/D) Keulegan-Carpenter sayısı, β , frekans parametresi ve θ Shields parametresidir. Shields parametresinin oyulma derinliği üzerine olan etkisinin çok az olduğu (Sümer ve Fredsøe

[81]) tarafından bulunduğundan oyulma derinliği ile olan değişim dikkate alınmamıştır (Çevik [104]).



Şekil 3.25 a) 1/5 ve b) 1/10 kıyı şev eğimlerinde oluşan taban profilleri (Çevik [104])

Çevik [104] dalga etkisine maruz ve 35 cm su derinliğinde düzlem tabana yerleştirilmiş boru hatları etrafındaki yerel oyulmayla ilgili deneylerini $4.9 \times 10^3 < \text{Re} < 7.7 \times 10^4$ ve 1.5<KC<57 aralıklarında gerçekleştirmiştir. Deneylerde boru hatları dalga yayılma

doğrultusuna dik yerleştirilmiştir. Deneylerde dört farklı boru çapı kullanılarak değişkenlerin akım alanı dolayısıyla oyulma derinliği ile olan ilişkileri ayrı ayrı incelenmiştir.

Çevik [104] boru çapının artmasıyla oyulma derinliğinin artığı görülmüştür. Çünkü boru çapının artmasıyla şekillenen vorteks sistemleri ile daha büyük türbülanslı bir akım alanı yaratılmaktadır. Böylece oyulma hızı ve derinliği artmaktadır.

Çevik [104] oyulma derinliği hem dalga yüksekliğinin hem de dalga periyodunun bir fonksiyonu olup bu parametrelerin artması ile artış göstermektedir. Bunun nedeni dalga yüksekliğinin artması ile boru, akım ve taban etkileşiminin artmasıdır.

Çevik [104] oyulma derinliğinin KC sayısı ile iyi bir korelasyon sağladığını ve artan KC sayısıyla rölatif oyulma derinliğinin arttığını gözlemlemiştir. Bu değişimden rölatif oyulma derinliği için

$$S/D=0.05KC^{0.68}$$
 (3.30)

bağıntısını elde etmiştir.

Çevik [104] düzlem taban oyulma derinliği için elde ettiği sonuçları Sümer ve Fredsøe [81] ve Lucassen [94]'in verileriyle birlikte değerlendirmiştir (Şekil 3.26). Farklı granülometrelere rağmen taban malzemesinin oyulma derinliği üzerine etkisinin olmadığı sonucuna varmıştır. Şekil 3.26'da tüm bu veriler bir arada çizildiğinde rölatif oyulma derinliği için

$$S/D=0.11KC^{0.45}$$
 (3.31)

r=0.85, bağıntısını elde etmiştir.



Şekil 3.26 Rölatif oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi (Çevik [104])

Çevik [104] periyodik akım alanında silindirik yapılar etrafında şekillenen akım yapısında meydana gelen değişimler ve bu değişimlerin sonucunda oluşan yerel oyulma çukuruna KC ve Re sayılarının birlikte olan etkisini araştırmak amacıyla, rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresiyle olan değişimi incelenmiştir. Bu iki parametrenin birbirine oranıyla elde edilen frekans parametresi (Re/KC) aşağıda verilmiştir.

Frekans parametresi=
$$\beta = D^2/vT$$
 (3.32)

Çevik [104] dalga yüksekliğini ihtiva etmeyen frekans parametresinde bu etkinin daha detaylı irdelenebilmesi amacıyla aynı periyodda farklı dalga yüksekliklerinde rölatif oyulma derinlikleri araştırılmıştır. Elde edilen değişim Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Farklı dalga yükseklikleri nedeniyle rölatif oyulma derinliğinde saçılımlar artmakta ve S/D ile β arasındaki korelasyon (r=0.79) azalmaktadır (Şekil 3.27). Periyodun oldukça fazla olan etkisine rağmen dalga yüksekliğinin etkisinin de tamamen göz ardı edilemeyeceği sonucuna varılmıştır. Bunun nedeni, oyulma çukurunun gelişmesi esnasında taban yakınındaki hızların dalga yüksekliğine de bağlı olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.27 Sabit periyodda farklı dalga yükseklikleri dikkate alınarak S/D-β değişimi (Çevik [104])

Derinlik parametresinin, (d/H₀), rölatif oyulma derinliği, (S/D), üzerine etkisi hem 1/5 ve hem de 1/10 kıyı şev eğimlerinde dört farklı boru çapı için Şekil 3.28'de gösterilmiştir (Çevik [104]). Bu şekillerden görüldüğü gibi rölatif oyulma derinliği derinlik parametresinin azalmasıyla ile artış göstermektedir. Çünkü derinliğin azalmasıyla dalga-taban etkileşimi artmaktadır. Ayrıca bu şekillerden artan boru çapı ile rölatif oyulma derinliğinin azaldığı da söylenebilmektedir. Rölatif oyulma derinliğinin

azalan derinlik parametresiyle artışı kıyı şevi boyunca kayma gerilmeleri ve taban yakınındaki hızların dağılımına uygun bir görünüm sergilemektedir. Bu da derinliğin azalmasıyla artan dalga yüksekliğinin tabandaki anlık kayma gerilmesi ve hızların artmasına neden olarak taban hareketinin ve yerleştirilen boru hatları etrafındaki vorteks sistemlerinin şiddetlenmesiyle sonuçlanmaktadır.



Şekil 3.28 a) 1/5 ve b) 1/10 kıyı şev eğimlerinde rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi (Çevik [104])

Bütün dalgaların her iki şev eğimi için düzlem tabana göre normalleştirilmiş oyulma derinliklerinin toplu olarak gösterildiği Şekil 3.29 ise oyulma derinliğinin düzlem tabana göre kaç kat arttığı hakkında bilgi vermektedir. Oyulma derinliğinin bu artış miktarı d/H₀≤2 civarında yaklaşık olarak 2-3 katı mertebesine çıktığından bu sonuç kıyı şevleri boyunca belirlenen rölatif kayma gerilmesindeki artış miktarıyla hemen bir uyum içindedir. O halde derinliğin azalmasıyla artan oyulma miktarına, taban hareketindeki artışın önemli bir etki olduğunu elde edilen sonuç göstermektedir (Çevik [104]).

Sığlaşma bölgesinde KC sayısının etkisinin olup olmadığının veya ne kadar etkili olduğunun araştırmak için 1/5 ve 1/10 kıyı şev eğimlerinde çalışmıştır (Çevik [104]). Şekil 3.30'da görüldüğü gibi KC sayısının artmasıyla rölatif oyulma derinliği artmaktadır. Bilindiği gibi KC sayısı su partiküllerinin yörüngesel deplasmanlarının silindirik yapıların çapına olan oranıdır. Buna göre KC sayısı silindirik yapılar etrafındaki akım yapısının tarifleyen boyutsuz bir sayıdır.



Şekil 3.29 Tüm dalga şartlarında ve boru çaplarında normalleştirilmiş oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi (Çevik [104])

KC sayısı maksimum yatay yörüngesel hız ve dalga periyodu ile doğru, silindiri çapı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Şekil 3.30'da görüldüğü gibi sığlaşma bölgesinde farklı derinliklerde aynı KC sayısında farklı oyulma derinlikleri elde edilmektedir (Çevik [104]). Bu farkın mertebesi %7-8' e kadar ulaşabilmektedir. Çelişkili gibi gözüken bu durum gerçekte doğrudur, çünkü sığlaşma bölgesinde dalgaların asimetrik yapısı daha da artmakta ve bu da taban yakınında da simetrik olmayan bir akım yapısının oluşmasına neden olmaktadır. Şekil 3.30'da aynı KC sayısında aynı dalga periyoduna sahip dalganın azalan derinlikle büyüyen oyulma derinliğine neden olmasının tabandaki hızın artışından kaynaklanmakta olduğu görülmektedir. Böylece gerek taban hareketi gerekse boru hattı etrafındaki vortekslerin şiddeti ve bunun sonucunda oyulma miktarı artmaktadır. Derinlikle artan bu hız değişimi ise küçük KC sayılarında daha az, büyük KC sayılarında daha büyük olacağından, KC sayısı büyüdükçe su derinliğinin azalmasıyla oyulma derinliklerinde bu fark daha da artmaktadır. Şekil 3.30'da küçük KC sayılarında oyulma derinliğindeki fark daha da az olmakla birlikte, surf parametresine bağlı olarak büyük KC sayılarında su derinliğinin etkisinin daha fazla hissedildiği görülmektedir.

Çevik [104] rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimini incelemiştir. 1/5 ve 1/10 kıyı şev eğimlerinde surf parametresinin artması ile rölatif oyulma derinliğinin arttığı görülmektedir (Şekil 3.31). Dalgaların sistematik değişimi incelendiğinde sabit bir dalga periyodunda dalga yüksekliğinin artması ile surf parametresi küçülmektedir. Oysa rölatif oyulma derinliğinin artan dalga yüksekliği ile arttığı daha önce gösterilmişti. Sonuçta rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimine bakıldığında surf parametresinin artan değerlerinde rölatif oyulma derinliğinin de arttığı ancak oyulma mekanizmasını tam olarak yansıtmadığı anlaşılmaktadır. Sığlaşma bölgesine yerleştirilen silindirik yapıların çevresindeki yerel oyulma olayına en sadece taban hareketi ne de sadece silindir etrafında oluşan vorteks mekanizması tek başına etkilidir (Çevik [104]). O halde oldukça karmaşık bir boru hareketli taban etkileşimi vardır.



Şekil 3.30 a)1/5 ve b) 1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimi (Çevik [104])



Şekil 3.31 1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin surf parametresi ile değişimi (Çevik [104])

Çevik ve Yüksel [114] rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresiyle değişimini incelemiştir. Ursell sayısı (HL^2/d^3) dalganın sahip olduğu enerjiyi ve tabana iletilen enerjinin büyüklüğünü tasvir etmektedir (İbrahim ve Naulluri [88]). Bu parametre dalga özelliklerindeki değişimi belirlemekte ve tabanda etkili olacak akım yapısını da

karakterize edebilmektedir. Şekil 3.32'de her bir boru çapı için ayrı ayrı çizilen eğrilerden rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresi ile oldukça yüksek bir korelasyonla arttığı görülmektedir. Su derinliğinin etkisini oldukça etkili bir şekilde yansıtan bu parametre sadece boru çapını içermemektedir. Ancak şekilden görüldüğü gibi her boru çapı için rölatif oyulma derinliği aynı U_R sayısı için değişmektedir. O halde boru çapının etkisini dikkate almayan bu parametre tek başına kullanılamamaktadır.



Şekil 3.32 1/10 kıyı şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresi ile değişimi (Çevik [104])

Boru çapının etkisinin de katılmasıyla rölatif oyulma derinliğinin bu parametre kullanılarak farklı boru çaplarında da elde edilebileceği düşünülmüştür (Çevik ve Yüksel [114]). Böylece yerel dalga yüksekliğinin boru çapına oranıyla verilen dalga yüksekliği parametresi, H/D, ve Ursell parametresinin, U_R , fonksiyonu olduğu düşünülen rölatif oyulma derinliği, S/D, ile aralarındaki ilişki lineer olmayan çoklu regresyon analizi yardımıyla elde edilerek aşağıdaki bağıntı bulunmuştur.

$$\frac{S}{D} = 0.0383 \left[U_R \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right]^{0.4267}$$
(3.33)

Burada parantez içindeki boyutsuzların çarpımı ile

$$U_{RB} = U_R \left(\frac{H}{D}\right)^2 = \frac{H^3 L^2}{d^3 D^2}$$
 (3.34)

Boru Ursell sayısı tanımı yapılarak (3.33) ifadesi yeniden şöyle ifade edilmiştir.

$$\frac{S}{D} = 0.0383 U_{RB}^{0.4267}$$
(3.35)

Elde edilen bağıntının değişimi Şekil 3.33'de gösterilmektedir. Şekilden rölatif denge oyulma derinliği, S/D, ile Boru Ursell sayısı, U_{RB} , arasında oldukça iyi bir korelasyon (R=0.91) görülmektedir (Çevik ve Yüksel [114]). Ayrıca rölatif oyulma derinliği tanımlanan U_{RB} sayısının artan değeriyle artmaktadır.



Şekil 3.33 1/5 ve 1/10 kıyı şev eğimi için S/D'nin U_{RB} ile değişimi (Çevik ve Yüksel [114])

Dalga yüksekliğinin, dalga periyodunun, su derinliğinin, boru çapının ayrı ayrı rölatif oyulma derinliği üzerinde etkili değişkenler olduğu ve sığ su bölgesinde ilerleyen dalga özelliklerini Ursell sayısının oldukça iyi tasvir ettiği daha önceden belirtilmişti.

Düzlem taban şartlarında, rölatif oyulma derinliğinin Boru Ursell sayı ile değişimi, her iki kıyı şev eğimindeki verilerle birlikte düşünülerek, gerek geçiş derinliği gerekse sığ su şartlarını içeren genel bir ifadenin bulunması için yeniden yapılan çoklu regresyon sonucunda aşağıdaki bağıntı bulunmuştur (Çevik ve Yüksel [114]).

$$\frac{S}{D} = 0.0418 U_{RB}^{0.4066}$$
(3.36)

Tüm verilerin bir arada kullanılmasıyla elde edilen rölatif denge oyulma derinliğinin, S/D, boru Ursell sayısı, U_{RB} , ile değişimi Şekil 3.34'de gösterilmektedir. Şekilde S/D'nin U_{RB} ile korelasyonu (r=0.90) hala oldukça yüksektir. Bunun nedeni ise, bu parametrenin yaklaşan dalganın özelliklerinin boru etrafındaki akım yapısına olan etkisini yeterince içermesidir.



Şekil 3.34 Geçiş ve sığ su şartlarında S/D'nin U_{RB} ile değişimi (Çevik ve Yüksel [114]) Çevik (1997) sığlaşma bölgesinde rölatif denge oyulma derinliğinin KC sayısı ile değişimini incelediğinde oyulma derinliğinin KC sayısının kendisiyle değiştiğini bulmuştur (Denklem 3.37).

$$\frac{S}{D} = 0.044 \text{KC}^{0.91} \tag{3.37}$$

KC sayısnını tabandaki yörüngesel deplasmanı veya hızı içermesi dolayısıyla özellikle dalgaların kırılma şartlarında bu parametrenin belirlenmesi oldukça güçtür. Çünkü kırılma bölgesi yakınlarında bugüne kadar dalga kinematiklerini belirleyecek herhangi geçerli bir teorinin bulunmayışı ve deneyler esnasında bu parametrelerin ölçümlerindeki zorluklar nedeniyle KC sayısının belirlenmesinde hesap ve ölçüm hatalarına neden olunabileceği göz önünde tutulmalıdır (Çevik [104]).

Sığlaşma bölgesinde değişen dalga koşullarına göre maksimum oyulma çukurunun meydana geldiği kritik derinlik (d_{kr}) ile surf parametresi arasındaki ilişki, kırılma derinliğine göre;

$$\frac{d_{kr}}{d_b} = 0.645\xi + 1.1 \tag{3.38}$$

bağıntısı ile belirlenmektedir (Çevik [104]). Bu ifadeye göre surf parametresinin artan değerlerinde, maksimum oyulma daha derinde meydana gelmektedir.

Çevik [104] ilave olarak rölatif denge oyulma derinliğinin belirlenmesinde etkin iki parametre belirtmiştir. Bunlar boru Ursell sayısı ve KC sayılarıdır. Boru Ursell sayısı yörüngesel taban hızını içermeyip, sadece dalga karakteristiklerine, akım derinliğine ve

boru çapına bağlı olduğundan özellikle sığlaşma bölgesinde hesaplama kolaylığına sahiptir.

Myrhaugh vd. [119] kırılmış ve henüz kırılmamış düzensiz dalgalar için sığlaşma koşullarında oyulma derinliği formülü elde ederek bir yaklaşım öngörmüştür. Çevik ve Yüksel [114]'in boru hattına normal gelen kırılmış ve henüz kırılmamış düzenli dalgalar için sığlaşma koşullarında elde ettikleri oyulma derinliği formülünü Myrhaugh vd. [119] çalışmasında kullanmıştır. Mendez vd. [120]'in kırılan dalgaları ve sığlaşmayı içeren dalga yüksekliği dağılımını sığlaşma durumunda dalga etkisinde denizaltı boru hatları altındaki oyulma derinliği denklemi ile birleştirilerek vermişlerdir (Myrhaugh vd. [119]). Düzlemsel plajlar üzerinde dalga yüksekliği dağılımını transformasyon modeli kullanılmıştır (Coast. Eng. 50, 3).

Çevik ve Yüksel [114]) dalgaların boru hattına normal gelmesi durumunda boru çapı, D, denge oyulma derinliği, S, için aşağıdaki ampirik formülü elde etmişlerdir.

$$\frac{S}{D} = aU_{Rp}^{b}, 2 \le U_{RB} \le 3000$$
(3.39)

Burada a, 0,042, b, 0,41 ve U_{RB} modifiye edilmiş Ursell sayısıdır.

Çevik ve Yüksel [114] 1000 dalgadan sonra oyulma derinliğinde önemli bir değişiklik olmadığını gözlemleyerek denge oyulma derinliği için minimum 1000 dalgayı dikkate almışlardır. Araştırmacılar sığlaşma koşullarında oyulma derinliğinin daima düzlem tabandakinden daha büyük olduğunu sonucuna varmışlardır. Ayrıca maksimum oyulma derinliğinin kırılma derinliğinin açık deniz tarafında meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Sümer ve Fredsøe [103], [79] düzensiz dalga etkisinde düşey kazıklar çevresindeki ve boru hatları altındaki oyulma için düzensiz değişkenlerin özelliklerini tanımlayarak silindir düşey kazıklar çevresindeki oyulma derinliği, boru hatları altındaki genişlik ve oyulma derinliğini ifade temek için dalga yüksekliği ve periyodunu kullanmışlardır. Deterministik yaklaşımlarda H_{rms} ve T_p verilerle iyi bir uyum vermesine rağmen araştırmacılar deneme yanılma yoluyla bunu bulmuşlardır.

Myrhaugh vd. [119] çalışmasında deneme amaçlı stokastik bir yaklaşımı özetlemiştir. Sabit dar bantlı deniz durumunda düzensiz dalgalar arasında en yüksekleri dikkate alındığında daha çok en yüksek dalgaların oyulmaya neden olduğu varsayılmıştır. Aşılma olasılığı 1/r, $H_{1/r}$ olan en yüksek dalgalar dikkate alınmıştır. Oyulma derinliğine neden olması beklenen en yüksek dalgalar P(H) ile ifade edilmiştir.

$$E[S(H)H > H_{1/n}] = n \int_{H_{1/n}}^{\infty} S(H)p(H)dH$$
(3.40)

Burada p(H) olasılık yoğunluk fonksiyonu dur.

Mendez vd. [120] tarafından önerilen düzlemsel plajlar üzerinde sığlaşma ve kırılmayı içeren dalga yüksekliği dağılımı kabul edilmiştir. Kümülatif dağılım fonksiyonu (cdf) verilmiştir.

$$P\left(\hat{H}\right) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\phi(\kappa)\hat{H}}{1 - \kappa\hat{H}}\right)^{2}\right]; \quad 0 \le \hat{H} \le \frac{1}{\kappa}$$
(3.41)

Burada, boyutsuz dalga yüksekliği, $\hat{H} = \frac{H}{H_{ms}}$, şekil parametresi, $\kappa = \frac{H_{ms}}{H_{maks}}$, H_{maks} , maksimum dalga yüksekliği, κ , sığlaşma katsayısı ve kırılan dalga sönüm katsayısına bağlı ve

$$\phi(\kappa) = (1 - \kappa^{0.944})^{1.187}; \ 0 \le \kappa \le 1 \ \text{dir.}$$
(3.42)

Yerel ve açık deniz değerleri için aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir(Mendez vd. [120]).

$$\mathbf{H}_{\mathrm{ms}} = (\frac{\mathbf{h}_{0}}{\mathbf{h}})\phi(\kappa)\mathbf{H}_{\mathrm{ms},0}$$
(3.43)

Burada (h_0/d)1/4 sığ su dalgaları için sığlaşma katsayısı, h_0 , deniz tarafı su derinliği, m, taban eğimi ve x, yatay koordinat dır (d= h_0 -mx).

Denklem 3.39 yeniden düzenlenmiştir.

$$\hat{S} = \frac{S/D}{aU_{RPms}^{b}} = \hat{H}^{3b}$$
(3.44)

Burada
$$U_{\text{RPrms}} = \frac{H_{\text{ms}}^3 \bar{\lambda}^2}{h^3 D^2}$$
; $0 \le U_{\text{RPrms}} \le 3000$ ve $\bar{\lambda} = 2\pi/\bar{k}$, dalga boyu dur. (3.45)

Oyulma derinliğine neden olması beklenen 1/r. en yüksek dalgalar denklem 3.40'dan;

$$E\left[\stackrel{\wedge}{S}\left(\stackrel{\wedge}{H}\right)\stackrel{\wedge}{H}\stackrel{\wedge}{>}\stackrel{\wedge}{H}_{1/r}\right] = r \int_{\hat{H}_{1/r}}^{1/\kappa} \stackrel{\wedge}{H}^{3b} \stackrel{\wedge}{p(H)} \stackrel{\wedge}{H}_{H}^{(3.46)}$$
(3.46)

Burada $p(\hat{H}) = dP(\hat{H})/d\hat{H}$ denklem 3.41'de verildiği gibidir.

Denklem 3.43 ve denklem 3.45 yeniden düzenlenerek aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$U_{\rm RPms} = (\frac{h_0}{d})^{11/4} \phi^3(\kappa) U_{\rm RPms,0}$$
(3.47)

Myrhaugh vd. [119] mevcut stokastik yöntemin sonuçlarını kullanarak oyulma işleminin alternatif bir incelemesini dikkate alarak düzensiz dalgalar için bir alternatif modifiye Ursell sayısı tanımlanmıştır.

$$U_{RP1/r} = \frac{(E[H_{1/r}])^3 \bar{\lambda}^2}{d^3 D^2}$$
(3.48)

ifade yeniden düzenlenmiştir.

٨

$$V_{RP1/n} = U_{RPms} ([H_{1/r}])^3$$
(3.49)

Burada U_{RPrms} denklem 3.45'de verilmiş ve

$$E\begin{bmatrix} \uparrow\\ H_{1/r} \end{bmatrix} = n \int_{H_{1/r}}^{1/\kappa} H p(H) dH$$

$$H_{1/r}$$
(3.50)

Denklem 3.39'da düzenli dalga formülündeki U_{RP} ile $U_{RP1/n}$ 'nin yer değiştirilmesiyle oyulma işleminin alternatif incelenmesinin sonucu elde edilmiştir.

$$\frac{S}{D} = a U_{RPrms}^{b} (E[H_{1/r}])^{3b}$$
(3.51)

 $E[H_{1/r}]$ için polinominal fonksiyon n=(3,10) koşulunda aşağıda verilmiştir (Mendez vd. [120], Çizelge 1).

$$E\begin{bmatrix} \hat{H}_{1/n} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1.416\\ 1.800 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0.140\\ 0.830 \end{pmatrix} \kappa - \begin{pmatrix} 0.749\\ 0.477 \end{pmatrix} \kappa^2 + \begin{pmatrix} 0.887\\ 0.985 \end{pmatrix} \kappa^3 - \begin{pmatrix} 0.413\\ 0.478 \end{pmatrix} \kappa^4; n = \begin{pmatrix} 3\\ 10 \end{pmatrix} \quad (3.52)$$

Literatürde düzenli dalgalar koşulunda sığlaşma bölgesi içinde boru hatları altındaki oyulma derinliği için mevcut yeterli veri bulunmamaktadır. Bu çalışmadaki sonuçların deneysel olarak dikkate alınması gerekmekte ve yaklaşımın geçerliliği konusundan herhangi bir sonuca varılmadan önce de verilerin karşılaştırılması gerekmektedir. Bu sonuç aynı zamanda bir mühendislik yaklaşımı olarak faydalı olacaktır.

Şekil 3.35 r=3 ve r=10 durumunda örneklendirilerek denklem 3.46 içindeki stokastik yönteme uygun olarak κ 'nın 0 ve 0.8 aralığında U_{RPrms} ile S/D değişimini göstermektedir. κ 'nın verilen bir değerinde U_{RPrms} artıkça S/D artmaktadır.



Şekil 3.35 Sığlaşma durumunda oyulma derinliği ile U_{RPrms} değişimi (sol n=3, sağ n=10) (Myraugh vd. [119])

Şekil 3.36 r=3 ve r=10 durumunda yaklaştırma yöntemi ve stokastik yöntem arasındaki oran, O, ile κ 'nın değişimini göstermektedir.

$$O = \frac{\left(E\left[\stackrel{\circ}{H_{1/n}}\right]\right)^{3b}}{E\left[\stackrel{\circ}{S}\left(\stackrel{\circ}{H}\right)|\stackrel{\circ}{H} > \stackrel{\circ}{H_{1/n}}\right]}$$
(3.53)

Bu oran, O, κ'nın bütün değerleri için 1'e çok yakındır. Eğer 1/n. en yüksek dalgaların ortalaması ile düzensiz dalgalar temsil edillebilirse düzenli dalgalar için oyulma derinliği formülü düzensiz dalgalar içinde kullanılabilecektir (Myraugh vd. [119]).



Şekil 3.36 O ile k'nın değişimi (Myraugh vd. [119])

Myraugh vd. [119]'nin ulaştığı sonuçları kısaca özetlersek;

- a) Sığlaşma koşullarında boru hattına normal gelen düzensiz dalga etkisine maruz boru hattı altındaki oyulma derinliği tahmini için pratik bir yaklaşım önermişlerdir. Yaklaşım kırılan ve kırılmayan dalgalar için geçerlidir.
- b) Eğer 1/n. en yüksek dalgaların ortalaması ile düzensiz dalgalar ifade edilebilirse düzenli dalgalar için elde edilen oyulma derinliği formülünün düzensiz dalgalar içinde uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

3.2.5 Zaman ölçeği

Shen vd. [121] hem hareketli taban hem de temiz su koşulların da oyulmanın zamanla değişimini araştırmak için tek bir boru çapı, tek bir tane boyutu, farklı su derinliği ve farklı akım hızlarında 21 deney yapmışlardır. Ayrıca bu deneyler tek bir silindir çapı ve tane büyüklüğü kullanılarak sınırlandırılmıştır. Daha sonra Shen vd. [121] bazı eksiklikleri gidermek için hareketli taban durumunda hem tam hem de yarım silindir ve farklı tane çaplarında (d₅₀=0.24-0.46 mm) ilave 37 deney daha yapmışlardır. Araştırmacılar, büyük çaplı katı maddelerde denge oyulma derinliğinin %75'ine ulaşmak için gerekli zaman daha büyük iken ortalama derinlik hızlarının karesinin büyük değerlerinde bu zamanın azaldığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca zaman ölçeğinin silindir çapından bağımsız olduğunu bulmuşlardır.

Cartens [122] laboratuarda yaptığı kanal testlerinde oyulma hızlarını araştırmıştır. Çalışmalarında bir engelin çevresindeki hız dağılımını, oyulma çukuru ve engel geometrisinin bir fonksiyonu olarak varsaymıştır. Ayrıca bir silindir için oyulma çukurunun kesilmiş ters bir koni şeklini aldığını farz etmiştir.

Hjorth [123], Einstein [124] tarafından önerilen yönteme dayanarak yerel oyulmayı belirlemek için stokastik model geliştirmiştir. Model oyulma çukurunun tabanındaki kayma gerilmesini, çukurun anlık derinliğinin bir fonksiyonu ve vorteks korunumundan kaynaklandığını varsaymıştır.

Johnson ve McCuen [125] köprü ayakları çevresindeki oyulmayı araştırmak için bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem denklemlere bağlı olmakta ve bu denklemler zamanadım büyüklüğü için oldukça hassastır. Ayrıca alınan denklemlerin yapısı denge oyulma derinliği için pürüzsüz bir geçişe neden olmaktadır.
Fredsøe [126] tarafından bir boru hattı altındaki oyulmanın zaman ölçeği kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır. Bugüne kadarki tek literatür çalışması hem akıntı hem de dalga koşulunda yapılmıştır (Fredsøe vd. [127]). Araştırma, oyulma derinliği ve zaman arasındaki bir lognormal eğri bağıntısına dayanmaktadır.

$$S = S_0 (1 - \exp(-\frac{t}{T}))$$
 (3.54)

Burada S_0 denge oyulma derinliği, T oyulma işleminin zaman ölçeği olup oyulmanın büyük miktarının geliştiği zaman periyodudur. Araştırmacılar sadece dalga etkisinde Shields parametresi ile ilişkili boyutsuz ampirik bağıntı geliştirmek için (Mao [74]) ve (Fredsøe vd. [127])'nin deneysel verilerinden yararlanmışlardır. Araştırmacılar katı madde süreklilik denkleminin normalleştirilmesi yoluyla normalleştirilmiş zaman ölçeği T^{*} ve zaman ölçeği T ile ilişkili bir boyutsuz formül elde etmişlerdir.

$$T^* = \frac{(g(s-1)d_{50}^3)^{1/2}}{D^2}T$$
(3.55)

Burada d₅₀ katı maddenin çapı, D boru çapıdır. Ayrıca kararlı akım durumunda $T^*=f(\theta)$, dalga durumunda ise $T^*=f(\theta, KC)$ dir.

Formül hem dalga hem de akıntı durumunda kullanılabilmektedir. Normalleştirilmiş zaman ölçeği T^* ve Shields parametresi θ arasındaki bağıntı deneysel olarak elde edilmiştir (Şekil 3.37). Sonuç olarak Şekil 3.37'de T^* ve θ arasındaki ilişki aşağıdaki basit ifade ile verilmiştir.

$$T^* = \frac{1}{50} \theta^{-5/3} \tag{3.56}$$



Şekil 3.37 Shields parametresine karşı boyutsuz zaman ölçeği, dalga+kararlı akım durumunda. Taban orijinal düzlem ve taban ile boru arasında açıklık yoktur (Fredsøe vd. [127])

Harris vd. [128] akıntı, dalga, dalga+akıntı etkisi altında bir açık deniz yapısı çevresinde oyulmanın zamanla değişimini tahmin etmek için bir mühendislik modeli geliştirmiştir. Model, bir dizi veri ile karşılaştırılarak test edilmiş ve idealleştirilmiş testler için kurulmuştur. Oyulmanın tahmini ile ilgili testlerin sonuçları belirtilmiştir. Gelgit saha verileri ve büyük ölçekli laboratuar testleri model ile karşılaştırıldığında oyulmanın ilk gelisme hızının daha hızlı olduğu anlaşılmıştır. Saha ölçekli bir çalışma için model uygulaması tamamlanmış ve sığ su derinliklerinde fırtına dalgalarının hakim olduğu görülmüştür. Oyulmanın zaman alanının belirtilmesi gerektiğinden oyulma değerlendirme çalışmaları için oyulmanın zaman ile değişimini öngören model uygulanmıştır. Bu model açık deniz türbin çalışmaları dışında köprü ayakları, kazık ve diğer oyulma problemlerinde de uygulanabilmektedir.

Dalga ve akıntı etkisinde oyulma gelişimi zamanla değişen bir süreçtir. Bir oyulma çukuru, gelişmeye devam ederse verilen bir bölgedeki katı madde karakteristikleri ve verilen bir zamandaki hidrodinamik olayların bir fonksiyonu olarak ya dengeye ulaşacak ya da dolacaktır. Bu nedenle oyulma gelişimi deniz tabanındaki ripple'ların gelişmesine ve bozulmasına benzemektedir. Sığ sulardaki kıyı şeridi çevresinde günlük, yarı günlük veya karmaşık gelgitler görülmektedir. Gelgit etkisiyle meydana gelen akıntılar nedeniyle oyulma gelişimi iki yönde meydana gelecektir.

Gelgit akımının neden olduğu oyulma ile ilgili araştırma çalışmaları tek yönlü akımlara nazaran oldukça azdır. Gelgit koşullarında oyulma araştırılmıştır (Escarameria ve May [129]). Jensen [130] gelgit etkisinde kazıklar çevresindeki yerel oyulmanın tahmini için önerilerde bulunmuştur. Gelgit periyodunun ters kısmında gelgitin ilk safhasında erozyona uğrayan katı maddeden dolayı oyulma gelişimi azalmaktadır. Jensen [130] modifiye faktörü 1.5 yerine standart sapma 0.2 ile birlikte 1.25 kullanarak Breusers vd. [131]'nin formülünü önermiştir. Jensen [130] güçlü gelgit akım koşullarında denge oyulma derinliğinin kararlı akım koşulları ile aynı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca gelgitin aşırı değişimi, diğer etkiler (firtına kabarması, haliçlerdeki gelgit akımları) gelgit alanlarında oyulmayı etkileyebilmektedir. Kararlı akım durumunda bir oyulma çukurunun gelişmesi için oyulma süreci zaman almakta ve oyulma derinliğinin S_t, zaman ile gelişmesi aşağıdaki formül ile tanımlanabilmektedir (Whitehouse [132]).Burada k, katsayıdır.

$$S(t) = S_e \left[1 - exp \left(-\frac{t}{T_s} \right)^k \right]$$
(3.57)

Harris vd. [128] açık deniz rüzgârının estiği yönde Scarweather Sands üzerine yerleştirilen git direğinde (met. mast) oyulma derinliğine bakarak gelgit koşullarında oyulmanın zaman serileri tahminini yapmışlardır. Zaman serileri, çok ışıklı ölçme yöntemi kullanılarak toplanan verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ölçüm, alçak su seviyesinden yüksek su seviyesine yükselen gelgit üzerinde yapılmıştır. Talbot limanında gelgitin günlük ölçüm aralığı yaklaşık 4.8 m dir (25 Haziran 2003). Bununla birlikte, direk çevresindeki yakın alanda oyulma etkilerinin sınırlandığı ve gelgitin yarım periyodunda tabanın taşma içindeki değişmelerden etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu model, saha ölçümlerinin zaman çevresindeki oyulma derinliği tahminini belirlenmesine rağmen çok kısa süredeki oyulma derinliğine bağlı oyulma çukurunun gelişimini belirlemede başarısız olmuştur. Ayrıca modelde dalga etkileri ihmal edilmiştir.

Whitehouse [133] oyulma gelişimi için zaman serileri yöntemlerini geliştirmenin gerekli olduğunu vurgulamıştır. Bununla birlikte yapılarda meydana gelen oyulmanın aşılma olasılığınıda araştırmıştır.

Rüzgar türbinleri çevresinde dalga ve akıntı nedenli oyulma için bir mühendislik modeli önermişlerdir (Nilsen ve Hansen [134]). Ayrıca zamanla oyulma derinliğinin değişimini tahmin etmek için katı maddenin sürtünme açısına bağlı oyulma çukuru genişliğindeki değişime uygun bir model vererek mansap eğimi ve oyulma çukurunun kenarları için açılar kabul etmişlerdir. (Nilsen ve Hansen [134])'nin yaklaşımları daha önce kabul edilen araştırmalara benzemekte ve daha genişletilmiş bir model (Harris vd. [128]) tarafından verilmiştir.

Harris vd. [128] denizel ortamda tek bir kazık çevresinde oyulmanın zamanla değişimini tahmin etmek için bir mühendislik model geliştirmişlerdir. Bu model silindir, kare ve dikdörtgen yapılarda da uygulanabilmektedir.

Oyulma işleminin zaman ölçeği farklı yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bir geçiş periyodu süresince denge koşulları için oyulma derinliği gelişimi şeklen asimptotiktir. Hareketli taban durumunda denge oyulma derinliği temiz su durumundakinden daha hızlı elde edilmektedir.

Hem periyodik hem de kararlı akımlarda oyulma derinliği zaman alanını belirlemek için Sümer vd. [135]'nin yöntemleri uygulanmıştır. Kararlı akımlar için boyutsuz zaman ölçeği aşağıda verilmiştir.

$$T_* = \frac{\delta \theta^{-2.2}}{2000 D_p}$$
(3.58)

Burada, δ , sınır tabaka kalınlığı, θ , shields parametresi, D_p , kazık çapı olarak verilmektedir. Gelgit sınır tabaka kalınlığı su sütunun çoğunluğundan meydana geldiğinden Britanya adalarının kıyı şeridinde su derinliğinin sınır tabaka kalınlığına eşit olduğu uygun bir varsayımdır. Gelgit durumundaki sınır tabaka kalınlığı;

$$\delta = 0.0038(\frac{U_{a}\sigma - U_{b}f}{\sigma^{2} - f^{2}})$$
(3.59)

Burada, σ , gelgit hareketinin açısal frekansı, f, Coriolis parametresi, U_a, gelgit elipsinin büyük çapı, U_b, Gelgit elipsinin küçük çapı, olarak verilmektedir.

Bu model başka bölgelerde de kullanılabilir. Ancak denklem 3.58'de kullanıldığı gibi sınır tabaka kalınlığını ifade etmek için su derinliğinin alınıp alınmayacağının değerlendirilmesi gerekmektedir. Sınır tabakanın su derinliğinden daha ince olduğu yerlerde su derinliğinin kullanılması verilen θ değeri için oyulma derinliğinin aşırı tahmin edilmesine neden olacaktır.

Dalga durumunda boyutsuz zaman ölçeği aşağıda verilmektedir.

$$T_* = 10^{-6} \left(\frac{KC}{\theta}\right)^3 \tag{3.60}$$

Başlangıçta denklem 3.58 ve 3.60'in hareketli taban oyulma koşulları ve koheziv olmayan katı maddeler için uygunluğu düşünülmüş ve kullanılmıştır. Hareketli taban oyulması durumunda Shields parametresi için katı madde eşiğinden 0.3'e kadar ve KC sayısı içinde 7'den 34'e kadar olan aralıkları alınmıştır (Sümer vd. [135]). Model de Shields parametresi ve KC sayısının alt ve üst limitleri uygulanmamaktadır. Bu nedenle denklemler Shields parametresinin 0.3 den büyük ve temiz su oyulma rejimlerinde uygulanmaktadır.

Araştırmalara dayalı oyulma zaman değişimi formülasyonunun tahmin (Step) modeli Hr Wallingford merkezinde (Hydraulics Research Station of the UK Government) yapılarak Opti-Pile design tool daki temel yaklaşımlar kullanılmıştır (Whitehouse [132], [133]). Hr Wallingford'da daha önce yayımlanmayan çalışmalar denklem 3.57'de ki k değerinin 0.5 alabileceğini önermiştir (Sümer için k=1).

Denge oyulma derinliğini hesaplamak için Step model Breusers vd. [131], Escarameia ve May [129], Richardon ve Davis [136] tarafından üç farklı yaklaşımla kodlanmıştır. Şimdiki versiyon da sadece Breusers vd. [131]'nin yaklaşımı kullanılmaktadır. Çizelge 3.3 ve Şekil 3.38'de deneysel denklemler ile laboratuvar ölçümlerinin karşılaştırılması görülmektedir.

			Tahmin edilen denge oyulma derinliği								
			Opti-pile	Step Model							
Veri No	Run No	Ölçülen denge oyulma derinliği	1.75	HEC18	1.25	1.5	1.75				
S&F	1	0.005	0.001	0.050	0.050	0.050	0.050				
S&F	2	0.010	0.007	0.056	0.056	0.056	0.056				
S&F	3	0.050	0.021	0.063	0.063	0.063	0.063				
S&F	4	0.075	0.053	0.080	0.080	0.080	0.080				
S&F	5	0.010	0.022	0.063	0.063	0.063	0.063				
S&F	6	0.045	0.031	0.072	0.072	0.072	0.072				
S&F	7	0.070	0.045	0.083	0.083	0.083	0.083				
S&F	8	0.095	0.081	0.105	0.105	0.105	0.105				
S&F	I3	0.109	0.151	0.177	0.113	0.135	0.157				
R&B	I-3	0.020	0.000	0.029	0.029	0.029	0.029				
R&B	I-I	0.026	0.050	0.070	0.063	0.063	0.063				
R&B	I-2	0.035	0.036	0.055	0.055	0.055	0.055				
R&B	I-6	0.070	0.102	0.066	0.054	0.054	0.054				
R&B	I-7	0.005	0.0107	0.000	0.022	0.022	0.022				
R&B	I-9	0.079	0.058	0.103	0.083	0.083	0.083				
R&B	I-10	0.043	0.039	0.078	0.070	0.070	0.070				
R&B	I-11	0.053	0.057	0.091	0.075	0.075	0.075				
R&B	I-4	0.106	0.200	0.176	0.150	0.180	0.210				

Çizelge 3.3 Labaratuvar verilerine karşılık ampirik denge oyulma ifadelerinin karşılaştırılması (S&F, (Sümer&Fredsøe [79]), R&B, (Rudolph&Bos [137]), HEC18, (Richardson and Davis [136]), (Breusers vd. [131])

Laboratuar ölçüm değerleri ile çeşitli deneysel denge oyulma tahmin ifadeleri karşılaştırıldığında sonuçlarda bazı değişkenlikler vardır. Çoğu değişik modeller ölçümler ile mantıklı bir uyuma sahiptirler ancak deneysel hatalardan dolayı bazı saçılmalar olmaktadır. (Breusers vd. [131]) formülasyonunda 1.75 faktörü için Opti-pile tool ve Step model karşılaştırıldığında farklar görülmüştür.



Şekil 3.38 Deneysel denge oyulma ifadelerinin laboratuar verileri ile karşılaştırılması (Harris vd. [128])

Gelgit durumunda oyulma ölçümlerini kapsayan çalışmalara dayanarak oyulma için deneysel bağıntı geliştirmiştir (Breusers vd. [131]). Bu bağıntı;

$$S_{c} = 1.5K_{1}K_{2}K_{3}K_{4}D_{p}tanh(\frac{h}{D_{p}})$$
 (3.61)

Burada, D_p kazık çapını, h toplam su derinliğini (m), K_1 kazık burun şekli için düzeltme katsayısını, K_2 akımın geliş açısı için düzeltme katsayısını, K_3 taban durumu için düzeltme katsayısını, K_4 taban malzemesinin boyutu için düzeltme katsayısını, S_C ise kararlı akım etkisinde denge oyulma derinliğini temsil etmektedir.

Boon vd. [138] opti-Pile tool akıntı, dalga, dalga+akıntı koşullarında denge oyulma derinliğinin belirlenmesini sağlamışlardır.

Step model için çeşitli inputlar, değişkenler ve denklemler kullanılmıştır. Step model için Sümer ve Fredsøe [79], [80]'nin yöntemi kabul edilmiştir. Step model açık deniz rüzgar santralinde prototip ölçekte kullanılan kazık çaplarındaki oyulmanın zamanla değişimini tahmin etmede kullanılmaktadır. Araştırmacı üç farklı su derinliği kullanmıştır (Çizelge 3.4).

Step model üç farklı su derinliğinde akıntı, dalga+akıntı etkisinde gerçekleştirilmiştir. Sığ su bölgesinde Step model gelgit durumunda dalga ve dalga etkisiz kurulmuştur. Sığ su derinlikleri dalga oyulma gelişimi üzerinde önemli bir etkendir. Ayrıca oyulma derinliği sığ su tarafından sınırlandırılmaktadır. Dalganın oyulma gelişiminin başlangıç hızına etkisinin olmadığı Şekil 3.39'da açıkça görülmektedir.

Parametreler	Sığ su bölgesi	Ortalama derin bölge	Derin su bölgesi
H _s : m	0.38-2.26	0.47-2.57	0.33-2.49
$T_p: s$	2.03-9.85	2.98-10.67	1.63-11.64
h : m (oss)	1.29-6.86	5.62-10.62	17.91-22.75
U _c : m/s	0.13-1.34	0.05-1.30	0.06-1.32

Çizelge 3.4 Farklı bölgelerdeki fiziksel parametreler (Metocean veri, UK)



Şekil 3.39 Sığ su bölgesinde oyulma tahmini (Harris vd. [128])

Orta su derinliği bölgesinde dalga olmadığı durumda oyulma derinliği gelişiminde derin sularda tahmin edilenden daha çok gelgit etkisi vardır. Dalga etkisinde başlangıç oyulma gelişim hızının çok küçük olduğu Şekil 3.40'da görülmektedir.



Şekil 3.40 Orta su derinliği bölgesinde oyulma tahmini (Harris vd. [128])

Derin su bölgesinde dalga etkisi oyulma çukuru derinliğini azaltmakta ve dalga yok iken oyulma derinliğinde az bir değişim olmaktadır. Her iki koşulda da oyulma çukurunun ilk gelişme hızlarının benzer olduğu Şekil 3.41'de görülmektedir.



Şekil 3.41 Derin su derinliği bölgesinde oyulma tahmini (Harris vd. [128])

HR Wallingford tarafından yapılan araştırmaya (Whitehouse, [132], [133]) dayanarak oyulmanın zamanla değişim tahmin (Step) modelinin formülasyonu geliştirilmiş ve Opti-Pile tool'da ki oyulma yaklaşım kullanılarak model kurulmuştur (Harris vd. [128]). Model için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$S(t) = S_e \left[1 - exp \left(-\frac{t}{T_s} \right)^k \right]$$
(3.62)

Model bir dizi veriyle karşılaştırılarak test edilmiş ve idealleştirilmiş testler için modeller kurulmuştur. Model oyulma tahmini için aşağıdaki konuları vurgulamıştır.

- a) Oyulmanın başlangıç gelişme hızının, gelgit saha verileri ve büyük ölçekli laboratuvar testlerine dayanarak model ile karşılaştırıldığında oldukça hızlı olduğu görülmüştür.
- b) Sümer ve Fredsøe [80]'nin verdiği yöntem hareketli taban koşullarında dalga, dalga+akıntı birleşiminde uygulanabilmektedir. Hareketli taban ve temiz su oyulma koşullarını göz önünde bulunduran Opti-Pile da kullanılan bazı yaklaşımları dikkate almışlardır (Harris vd. [128]). Dalga ve akıntı etkileşiminde tahmin yapabilmek için (Sümer ve Fredsøe [80])'nin verdiği zaman ölçeği önerilen aralık dışında uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar uygun olmasına rağmen mevcut denklem aralığını genişletmek için daha fazla araştırma gerekmektedir.

Harris vd. [128] model sonuçlarından aşağıdaki gözlemleri yapmışlardır;

 a) Model sonuçları modelde kullanılan denklemler ile birbirini tutmaktadır. Modelin saha verileriyle karşılaştırılarak test edilmesi gerekmektedir. OptiPile'da kullanılan $1.75D_p$ faktörü ulaşılabilir maksimum denge oyulma içinde düzensizliği temsil etmesine rağmen Step model formülasyonunda oyulma derinliğini fazla tahmin edebilmektedir. Mevcut uygulamada $1.25D_p$ faktörü daha uygun olmaktadır.

- b) DNV faktörü 1.3D_p ile saha ölçekli çalışma modelinin uygulaması yapılarak, sığ su derinliklerinde firtına dalgalarının oyulma işleminde hâkim olduğu, daha derin sularda ise akıntıların egemen olduğu görülmektedir.
- c) Model kazıklı temeller için bir tahmin metodu olarak kullanılabilmektedir.

3.2.6 Oyulma çukurunun genişliği

Şekil 3.42'den görüldüğü gibi KC sayısının artmasıyla oyulma çukurunun genişliği de artmaktadır. Sonuç olarak Şekil 3.42'den aşağıdaki ampirik bağıntı elde edilmiştir.

$$\frac{W}{D} = 0.35 KC^{0.65}$$
(3.63)

Burada, W=borunun merkezinden oyulma çukurunun sonuna kadar ölçülen genişliktir.



Şekil 3.42 Denge oyulma profilleri (Sümer ve Fredsøe [81])

Dalga ve akıntı kombinasyonu içinde akıntı etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Sümer ve Fredsøe [103]) (Şekil 3.43);

 a) U_c/(U_c+U_m)→0'a giderken denklem 3.63'den tahmin edildiği gibi W₁ ve W₂ (sırasıyla memba ve mansap genişlikleri) azalmaktadır.

- b) Dalgaların üzerine bir akıntının eklenmesi durumunda art-iz etkisi nedeniyle oyulma çukurunun mansap genişliği daha büyük ve memba genişliği daha küçük olmaktadır.
- c) U_c/(U_c+U_m)'nin 0.5-0.7'den daha büyük değerleri için oyulma genişliğinin sabit değerlere yaklaştığı görülmektedir.
- d) Sadece akıntı durumunda $U_c/(U_c+U_m) \rightarrow 1$ için yaklaşık olarak $\frac{W_1}{D} \rightarrow 2 \text{ ve } \frac{W_2}{D} \rightarrow 4 \text{ değerlerini almaktadır.}$



Şekil 3.43 Denge oyulma genişliği. Dalga ve akıntı kombinasyonu (Sümer ve Fredsøe [81])

Ayrıca oyulma genişliği Shields parametresi, borunun düşey konumu, boru hattının titreşimi, atak açısı, zırhlanma ve su derinliği gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir.

3.2.7 Oyulma derinliğinin diğer etkileri

Oyulma probleminin karmaşıklığı nedeniyle hala oyulma derinliği üzerinde etkili çok sayıda faktör bulunmaktadır. Bu etkiler Sümer ve Fredsøe 880]'nin çalışmalarında detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.2.7.1 Boru pürüzlüğünün etkisi

Boru hattı deniz tabanına yerleştirildiğinde borunun yüzeyinde deniz canlılarının gelişmesi ile zamanla pürüzlü bir yüzey meydana gelmektedir. Bu durumda vorteks saçılımı üzerinde Re sayısının etkisi kaybolmaktadır. Sümer ve Fredsøe [81] test çalışmaları ile oyulma sürecinin boru pürüzlülüğünden önemli ölçüde etkilenmediğini belirtmişlerdir. Ayrıca borunun pürüzlü ve pürüzsüz olması durumunda oyulma sürecinde çok az fark olduğu sonucuna varmışlardır.

3.2.7.2 Boru konumunun etkisi

Hansen vd. [139] ilk defa kararlı akım durumunda boru konumunun etkisini açıklayarak aşağıdaki ampirik formülü önermişlerdir.

$$\frac{S}{D} = 0.625 \exp(-0.6\frac{e}{D}); \qquad -0.25 \le \frac{e}{D} \le 1.2 \qquad (3.64)$$

Sümer ve Fredsøe [81] dalga durumunda yaptıkları deneysel çalışmalarla aşağıdaki ampirik formülü önermişlerdir (Şekil 3.44).



Şekil 3.44 Boru konumunun etkisi. a) KC=11, θ =0.19. b) KC=27, θ =0.035. c) KC=900, θ =02.4. (Sümer ve Fredsøe [81])

Bazı hesaplamalar Hansen vd. [139] tarafından taban seviyesinden daha düşük boru konumlarında yapılırken Sümer ve Fredsøe [81] tarafından sadece tabandan yukarıdaki boru konumlarında yapılmıştır.

3.2.7.3 Titreşim etkisi

Akım nedenli titreşim problemi (Sümer vd. [140]), (Kristiansen [89]) tarafından çalışılmış ve akım nedenli titreşime bağlı üç farklı erozyon tipi tanımlanmıştır. Sabit bir boruya göre boruda titreşim meydana geldiği zaman daha büyük oyulma derinlikleri elde edilmiştir.

3.2.7.4 Atak açısının etkisi

Mao [78] tarafından atak açısının etkisi üzerine deneyler yapılmış ve atak açısının artmasıyla oyulma derinliğinin arttığı bulunmuştur. Hansen [102], Mao [78]'in deneysel sonuçları ile zayıf korelasyona sahip bir sayısal yöntem geliştirmiştir (Şekil 3.45).



Şekil 3.45 Atak açsının etkisi. Düz çizgi: Sayısal (Hansen [102]). Kesikli çizgi: Deney (Mao [78])

Kozakiewicz, Ferdsøe ve Sümer [141] serbest bir silindir için atak açısının azalmasıyla vorteks saçılım etkisi azalacağından kaldırma kuvveti spektrumunun daha geniş oluştuğunu belirtilmişlerdir.

3.2.7.5 Çoklu boru hatlarının etkisi

Gelişen sanayi ile birlikte ekonomik faydalarının da dikkate alınmasıyla boru hatlarının bir demet olarak çoklu bir şekilde uygulanması son zamanlarda çoklu boru hatlarının oyulma üzerinde etkilerinin araştırılmasına neden olmuştur. Boru hattı demetlerinin enli dizilişlerinin sebep olduğu oyulma ile ilgili kesin sonuçlar olmamasına rağmen oyulma üzerindeki etkileri belirlemek için deneyler yapılmıştır (Westerhortmann vd. [142]). Konuyla ilgili sayısal yöntemler de tercih edilmiştir (Zhao ve Fernando [143]).

3.2.7.6 Zırhlanma etkisi

Bugüne kadar zırhlanma etkisi detaylı bir şekilde araştırılmamıştır. Deneysel çalışmada zırhlanma etkisiyle oyulmanın büyük ölçüde azaldığı belirtilmiştir (Sidek ve İbrahim [144]) (Şekil 3.46). Burada t zamandır.



Şekil 3.46 Kum içinde kabuk parçalarının etkisi (Sidek ve İbrahim [144])

3.2.7.7 Koheziv katı madde etkisi

Oyulma derinliği üzerinde koheziv katı madde etkileri araştırılmıştır (Pluim-van der Velden ve Bijker [145]). Kum ve silt karışımında oyulmanın başlaması için taban ve boru arasında bir açıklık olması gerektiği ve kum tabana göre kum-silt karışımı için kritik kayma gerilmesinin daha büyük olduğu belirtilmiştir.

3.2.7.8 Su derinliğinin etkisi

Oyulma derinliği üzerinde su derinliğinin etkilerini araştırmak için bir takım deneyler yapılmıştır (Chiew [146]). Su derinliği nispeten daha küçük olduğu zaman su derinliği etkisinin denkleme katıldığını gözlemlemişlerdir. Su derinliğindeki azalma, borunun blokaj etkisi nedeniyle daha fazla suyun borunun altına yönlendirilmesine sebep olmaktadır. Boru hattı altında akımın artmasının etkisi bir dizi Froude sayısı deneyleri ile araştırılmıştır (Moncada-M ve Aguirre-Pe [147]). (Moncada-M ve Aguirre-Pe [147]) ve (Sümer ve Fredsøe [148])'nin deneysel verilerini bir araya getirerek oyulma derinliği ve Froude sayısı arasında ilişki elde etmişlerdir (Sümer ve Fredsøe [80]), (Şekil 3.47).



Şekil 3.47 Su derinliğinin etkisi (Sümer ve Fredsøe [80])

3.3 Üç boyutlu oyulma

Bugüne kadar üç boyutlu oyulma ile ilgili kapsamlı çalışmalar yapılmamıştır. Model deneyleri kullanarak üç boyutlu oyulma problemini ele alan ilk hesaplamaları Graven ve Fredsøe [149] vermişlerdir. Bu araştırma problemin temelini anlamaktan daha çok üç boyutlu oyulma tarafından oluşturulmuş problemin çözümüne odaklanmıştır.

Leeuwestin [150] boru hattının kendi kendine gömülmesini ve stabiletisini araştırmasına rağmen bir boru hattı boyunca oyulma çukuru gelişimini de açıklamıştır.

Fredsøe vd. [151] boru hattının kendi kendine gömülmesini ve sarkmasını araştırmalarına rağmen boru hattı altındaki üç boyutlu oyulma problemini de ele almışlardır.

Bernetti vd. [152] katı madde korunumu denklemine dayanarak oyulma çukurunun eksenel gelişmesi için teorik bir model önermişlerdir. Bu modelde tabi zemin şev açısının oyulma eğimine eşit olduğu kabul edilmiştir.

Daha sonra bu model sarkma ve boru hattını gömme gibi oyulma işlemini yavaşlatan parametrelerin nedenini açıklamak için uyarlanmıştır (Hansen vd. [153]). Bu modelde açıklığın ortasındaki iki boyutlu oyulmanın denge safhasına ulaştığı varsayılmaktadır. Bu nedenle bu bölgedeki taban kayma gerilmesi borudan uzaktaki taban kayma gerilmesine eşit olmaktadır ($\tau = \tau_{\infty}$).

Petrol ve gaz sanayinin hızlı bir şekilde gelişmesi ve açık denizlerde boru hatları ile taşınması esnasında boru hatları altındaki oyulma önemli bir problem teşkil etmektedir. Açık deniz boru hatları altındaki oyulma iki boyutlu problemden ziyada üç boyutlu bir problemdir. Boru hatları altındaki üç boyutlu oyulmayı araştırarak eksenel oyulma hızı tahmini için bir yöntem geliştirmiştir. Ayrıca Yeow [154] iki boyutlu nümerik bir çalışma ile boru hatlı oyulma çukurunun geri dolmasını ve Reynolds sayısı etkilerini de araştırmıştır.

Yeow [154] açık deniz boru hatları altındaki üç boyutlu oyulmayı sistematik bir yolla araştırmış ve ilk önce akıntı etkisinde çalışmıştır. Deneylerini 50 m uzunluğunda 2.5 m derinliğinde ve 4 m genişliğindeki akıntı/dalga kanalında yapmıştır. Sümer ve Fredsøe [135]'nin çalışmalarına dayanarak oyulma ilerleme hızı için aşağıdaki bağıntıyı vermiştir (Yeow [154]).

$$V_{h} = K \left(25 \frac{\sqrt{g(s-1)d_{50}^{3}}}{D \tan\beta_{s}} \theta^{5/3} \left(1 - \frac{e}{D} \right) \right)$$
(3.66)

Burada θ Shields parametresini, K bir sabiti, e/D açıklık oranını, β_s oyulma derinliğinin ortalama eğimi, α_s atak açısını ifade etmektedir. Eğer akım boruya belli bir açı ile geliyorsa;

$$V_{h} = K \left(25 \frac{\sqrt{g(s-1)d_{50}^{3}}}{D \tan\beta_{s}} \theta^{5/3} \left(1 - \frac{e}{D} (1 + \sin\alpha_{s}) \right) \right)$$
(3.67)

Yeow [154] sadece akıntı koşulunda yaptığı deneysel çalışmada aşağıdaki sonuçları elde etmiştir.

- a) Boru hattı boyunca oyulma gelişim hızı gömme derinliğinin artmasıyla azalmakta ve akım hızının artmasıyla artmaktadır.
- b) Gömme derinliği (e/D<0.2) küçük ve akım hızı yüksek (θ>0.106) olduğunda birincil ilerleme (primary propagation) meydana gelmektedir.
- c) Gömme derinliği büyük (e/D>0.2) ve akım hızı küçük (θ<0.106) olduğunda ikincil ilerleme (secondary propagation) meydana gelmektedir.
- d) Mesnet bölgesinde her deney boyunca oyulma eğimi oldukça sabit kalmakta ve oyulma eğimi için tanenin tabii zemin şev açısı iyi tahmin edilmelidir.

Yeow [154] sadece dalga, dalga+akıntı etkisine maruz kalan açık deniz boru hatları altındaki üç boyutlu yerel oyulmayı ve oyulma başladıktan sonra boru hattı boyunca oyulmanın gelişme hızını araştırmıştır. Keuglegan-Carpenter sayısı (KC), gömme derinliği (e/D) ve oyulma çukur gelişim hızı (V_h) arasında bağıntı elde etmiştir. Bununla birlikte oyulma hızı üzerinde atak açısının etkisini de incelemiştir. Deneyler sonucunda aşağıdaki model elde edilmiştir.

$$V_{h} = K(1 - \frac{e}{D}) \frac{\sqrt{g(s-1)d_{50}^{3}}}{\tan\beta_{s}} \theta^{5/3} \sqrt{KC}$$
(3.68)

Eğer dalga boruya açı ile yaklaşıyorsa;

$$V_{h} = K(1 - \frac{e}{D}) \frac{\sqrt{g(s-1)d_{50}^{3}}}{\tan\beta_{s}} \theta^{5/3} (1 - \frac{e}{D}(1 + \sin\alpha_{s}\sqrt{KC}), \quad 0^{\circ} \le \alpha \le 45^{\circ}$$
(3.69)

Yeow [154] sadece dalga, dalga ve akıntı birleşiminde yaptığı deneysel çalışmada aşağıdaki sonuçları elde etmiştir.

- a) Sadece dalga koşulunda bir rijit boru hattı boyunca oyulma çukurunda sabit bir hızda ilerleme görülmektedir.
- b) Dalga etkisinde boru hattı boyunca oyulmanın gelişmesi KC sayısı arttıkça artmakta ve gömme derinliği arttıkça azalmaktadır.
- c) Gelen dalganın atak açısına bakmaksızın boru hattı boyunca her iki yöne doğru oyulmanın gelişmesi hemen hemen aynı olmaktadır.
- d) Önerilen model deneysel sonuçlar ile iyi bir korelasyon göstermektedir.

 e) Aynı yönde akıntı üzerine dalga etkisinin de birleştirilmesiyle akıntı hızı U_c/(U_c+U_w)≈0.6'ya kadar arttığında oyulma ilerleme hızı önce azalmakta ve sonra artmaya başlamaktadır.

Yeow [154] kararlı akım etkisinde açık deniz boru hatları altında iki boyutlu oyulmanın Reynolds sayısına bağlılığını araştırmak için bir sayısal model kullanmıştır. Modelde askıda katı madde taşınım hızını hesaplamak için yeni bir cidar fonksiyonu önermiştir. Farklı Reynolds sayılarına rağmen aynı rahatsız edilmemiş Shields parametresi altında model boru hattı altındaki oyulma gelişimlerini ve uygun prototip boru hattını benzeştirmiştir. Oyulma profili gelişimi üzerinde Reynolds sayısı farklılığının etkisi de araştırmıştır. Prototip boru hatlarındaki oyulma derinliklerinin model boru hatlarındakinden hemen hemen %10~15 daha küçük olduğu sonucuna varımıştır. Ayrıca normalleştirilmiş zaman ölçeği yaklaşık olarak benzer bulunmuştur.

Yeow [154] boru hattı oyulma çukurunun kendiliğinden gömülmesi için sayısal bir model geliştirilmiştir Hem kararlı akım hem de salınımlı akım etkisinde boru hattı hendeğinin morfolojik değişimini benzeştirerek aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır;

- a) Oyulma çukurunun içinde boru hattının var oluşu sadece boru hattı çevresindeki geri doldurma işlemini etkilemektedir. Boru hattı olsun ya da olmasın geri doldurma işleminin zaman ölçeği kabaca aynıdır. Geri doldurma işleminin oyulma çukuru şekli, boru çapı, akım hızı, dalga periyodu, katı madde özellikleri vb. ile ilişkili olduğu ifade edilmektedir.
- b) Kararlı akımdaki dik eğimli oyulma çukuru için oyulma çukuru, membadan taşınan katı maddeler ile doldurulmadan önce oyulma çukurunun ana kısmında mansaba doğru belirgin taşıma görülmemektedir. Bu sonuç oyulma çukuru içindeki güçlü vorteksin varlığı ile açıklanmaktadır.
- c) Salınımlı akımın hızlanan safhasında oyulma çukuru içinde ayrılma görülmemektedir. Akım terse döndüğünde hızı azalan safhada vorteksler şekillenmekte ve oyulma çukurunun dışına çıkarılmaktadırlar.
- d) Kararlı akım etkisinde oyulma çukuru derinliği zaman ile azalmakta salınımlı akım etkisinde ise çok yavaşça doldurulmaktadır.

3.4 Sayısal yöntem ile oyulmanın modellenmesi

Son yıllarda çoğu üniversitelerde ve araştırma enstitülerinde yapılan deneysel ve ampirik çalışmalar neticesinde sayısal model çalışmaları hızlı bir şekilde gelişmektedir (Brørs [155], Li ve Cheng, [156], Li ve Cheng [157], Liang ve Cheng [158], Liang vd. [159], Liang ve Cheng [160] vd.). Uygulamalarının güçlüğüne rağmen sayısal modellerin uygulamaları düşük maliyetlidir

Liang ve Cheng [161] denizaltı boru hatları çevresindeki oyulmayı benzeştirmek için sayısal modeller geliştirmişlerdir. Ancak bu modeller çok karmaşık ve zaman alıcıdır.

3.5 YSA yöntemi ile oyulmanın modellenmesi

Boru hatları veya kazıklar çevresindeki denge oyulma derinliğini tahmin etmek için araştırmacılar Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks, ANNs), Genetik Proglamlama (GP), ve Bulanık Mantık (Fuzzy Inference Systems, FIS) gibi yöntemler kullanılmıştır (Kambekar ve De [162], Bateni vd. [163], Bateni vd. [164], Harris vd. [128], Kazeminezhad vd. [165]).

Kazeminezhad vd. [165], Pue vd. [97], Sümer ve Fredsøe [91] ve Mousavi vd. [98]'nın deneysel verilerini kullanarak dalga etkisinde denizaltı boru hatları çevresinde denge oyulma derinliğini çalışmışlardır. Ayrıca Kazeminezhad vd. [165] ANN yöntemi ile açıklık oranı, KC sayısı, boru çapı, Shields parametresi, katı madde Reynolds sayısı ve sınır tabakası Reynolds sayıları gibi farklı girdi parametrelerini kullanarak oyulmayı tahmin edebilen modeller geliştirmişlerdir.

BÖLÜM 4

DENEY SİSTEMİ

Bu bölümde deney sisteminin kurulması, ölçüm teknikleri ve yapılan deneylerden bahsedilecektir. Daha sonra boru-hareketli taban-dalga etkileşimi problemine etkili parametreler belirlenerek boyut analizi ile boyutsuz sayılar elde edilecektir.

Deneysel çalışmalar Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği Laboratuvarı'nda mevcut düzensiz dalga kanalında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Genel görünüm

Bretschneider spektrumu modeli kullanılarak çok sayıda dalga üretilmiş ve bunlar içersinden seçilen dalgalar ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

4.1 Deney sistemi

Hidrolik model deneyleri, Edinburgh Design firmasının ürettiği "Ocean and Wave" dalga üretim sistemi ile üretilen dalgaların HR Wallingford'un ürettiği "HR Wavedata" veri toplama bilgisayar programı ve ekipmanları ile 20m uzunluğundaki dalga kanalı içerisinde yapılmıştır.

4.1.1 Dalga Kanalı

İki boyutlu oyulma deneyleri 1 m genişliğinde, 1 m yüksekliğinde ve 20 m uzunluğundaki dalga kanalında yapılmıştır. Kanalın 14 m uzunluğu boyunca her iki kenarı 19 mm kalınlığında camdan olup, 6 m uzunluk ise 4 mm kalınlığında sacdan yapılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Dalga kanalı

Dalgalar 1/10 eğimli tabanın bitiminden 10 m daha açıkta olan 60 cm su derinliğinde piston tipi dalga üreticisi ile üretilmiştir. Düzlem tabana ve 1/10 eğime sahip çelik rampadan oluşturulmuş şev üzerine 25 cm yüksekliğinde kum malzemesi serilmiştir. Üretilen dalgalar dalga üreticisinin önünde 4 no'lu prob, oyulma deneylerinin yapıldığı konumlarda düzlem tabanda 35 cm su derinliğinde ve 1/10 eğimli tabanda 31 ve 23 cm su derinliklerinde 3, 2 ve 1 no'lu problar kullanılarak ölçülmüşlerdir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Kanalın şematik gösterimi

Gerek kıyı profili ölçümleri gerekse yerel oyulma deneyleri için düzlem ve 1/10 eğimli deniz tabanı her deneyden önce düzeltilmiş ve önceden belirlenen dalgalar üretilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

4.1.2 Kum taban özellikleri

Deneylerde hareketli taban malzemesi olarak yıkanmış ve özel elek analizine tabi tutulmuş kuvars kumu kullanılmıştır. Deneysel çalışmaya başlamadan önce kullanılan kuvars kumun özgül ağırlığı YTÜ Malzeme Laboratuvarında yapılan deneylerden $\gamma_s=2.65$ t/m³ olarak ve granülometrisi ise Şekil 4.4'teki gibi belirlenmiştir.

Kumun granülometre eğrisi kullanılarak elde edilen büyüklükler; d_{50} = 1.28 mm, d_{90} = 1.89 mm, d_m = d_{60} = 1.43 mm, σ = 1.57 şeklinde sıralanabilir.



Şekil 4.4 Kumun granülometri eğrisi

4.1.3 Kıyı profil ölçümü

Kıyı profil ölçümleri HR Wallingford firmasının üretmiş olduğu 2 boyutta profil ölçümüne olanak sağlayan taban profili ölçüm cihazı (bed profiler) ile yapılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Profil Kaydedici

Bu sistemde probun ucunda minimum basınçları algılayan bir basınç ölçer bulunmaktadır. Probun taban profili ile teması sırasında basınç ölçer sistemi devreye girerek bulunduğu konumun X ve Y değerlerini bilgisayar ortamına kaydetmekte ve taban yüksekliğini okumaktadır. Profil kaydedici taban profilinin değiştiği bölgede belirli aralıklarla ilerleyerek her noktada işlemini tekrar eder. Kıyı profili oluşumu ile ilgili deneyler için hareketli tabanı oluşturan kum istenilen eğimde (burada 1/10) düzeltildikten sonra (Şekil 4.6), önceden belirlenen dalgalar üretilerek istenilen deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir kıyı profili değişiminin sonunda kanal eksenine yerleştirilmiş 6m uzunluğunda bir ray üzerinde hareket edebilen taban profili ölçüm cihazı ile ölçümler yapılmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.6 Dalga üretilmeden önce düzeltilmiş taban profili ölçümü



Şekil 4.7 Dalga üretildikten sonra oluşan taban profili ölçümü

4.1.4 Deneylerde kullanılan boru hatları

Denizaltı boru hatlarını laboratuvarda kurulan modelde benzeştirebilmek amacıyla üstü kırmızı renk ile boyalı farklı çaptaki çelik silindir borulardan faydalanılmıştır. Düzlem taban ve 1/10 şev eğiminde boru hattı altında meydana gelen yerel oyulmayı belirlemek için dört farklı çaptaki, D=3.23 cm, D=4.90 cm, D=7.70 cm, D=11.40 cm, silindirler dalga geliş doğrultusuna dik ve tabana oturacak bir şekilde yerleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Deneylerde farklı konumlara yerleştirilen boru hatları (D=3.23 cm, D= 4.90 cm, D=7.70 cm ve 11.40 cm olmak üzere seçilmiştir.)

Deneyler sırasında kullanılan bu silindirler kanal yan duvarlarına oynar menteşelerle bağlanmış ve içine yiv açılarak yukarı-aşağı doğrultuda her iki destek çubuğuna rijit olarak bağlanmışlardır. Yerel taban hareketi ile ilgili deneyler, her ne kadar kanal yan duvarlarının ve silindir uçlarının deney şartlarını etkilememeleri sağlanmış ise de deneyler dalga kanalı ekseni doğrultusu esas alınarak yapılmıştır. Bu nedenle boru hatlarının tam orta noktasında açılan delik yardımı ile oyulma miktarları ölçülmüştür.

4.1.5 Deneylerde oyulma derinliği ölçümleri

Deneysel ölçümler, 35 cm su derinliğindeki düzlem taban ile 1/10 şev eğimi üzerinde 31 cm, 23 cm su derinliklerinde gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı su derinliğinde dört farklı boru çapı kullanılmıştır. Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı su derinliklerinde, farklı çaplardaki boru hatları altındaki yerel oyulma derinliği, S, düşey ve yatay eksende hareket edebilen limnimetre yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 4.9). Oyulma derinliği ölçümleri tam boru hattının altında ve kanalın orta ekseninde gerçekleştirilmiştir.

Ortalama dalga periyodu, T_m , dikkate alındığında düzensiz dalga şartlarında yapılan deneylerde denizaltı boru hattı altındaki oyulmanın yaklaşık 1000 dalga etkisinde dinamik dengeye ulaştığı ve 1000 dalgadan sonra oyulma derinliğinde ciddi bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla farklı su derinliklerinde ve farklı çaptaki denizaltı boru hatları 1000 dalga etkisine maruz bırakılarak deneysel çalışma yapılmıştır. Benzer etki (Çevik [104])'in düzenli dalga etkisinde yaptığı deneylerde de gözlemlenmiştir.



a)



b)

Şekil 4.9 Limnimetre ile oyuma derinliği ölçümü (1/10 şev eğimi, d=23 cm, D=11.40 cm, H_s =9.35 cm, T_p =2.00 sn, T_m =1.31 cm, S=1.60 cm)

4.1.6 Deneylerde kullanılan ölçüm derinlikleri

Dalga kanalı içindeki dalga üreticisinden, 8 metre mesafede olan düzlem taban başlangıcına kadar su derinliği 60 cm, 10 metre mesafede olan 1/10 kıyı eğimi başlangıcına kadar su derinliği 35 cm dir. 1/10 şev eğimi üzerinde ise d=23 cm ve d=31 cm su derinlikleri deneysel çalışmada kullanılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Farklı su derinliklerinin şematik gösterimi

4.2 Dalga Üretimi

Doğada rüzgâr etkisiyle oluşan dalgaların dalga üretim bölgesinde çok farklı boya, yüksekliğe ve periyoda sahip oldukları bilinir ve genellikle kısa dalga tipindedirler. Rüzgâr dalgalarının en karakteristik özellikleri ise düzensiz olmalarıdır. Doğada oluşan rüzgâr dalgalarını laboratuvar ortamında oluşturabilmek için Edinburgh Design firmasının üretmiş olduğu Wave ve Ocean yazılımı birlikte kullanılmıştır. Wave ve Ocean özel yazılım içeren programdır ve dalga üretimi yapılabilmesi için laboratuvarda kullanılan bilgisayarda kurulumlarının yapılmış olması gerekmektedir.

4.2.1 Wave yazılımı

Wave yazılımı C, Pascal, Fortran ve bazı durumlarda Basic gibi programlama dillerinden yararlanarak çalışmaktadır. Wave yazılımı MS-DOS komut ortamında çalışmakta ve Ocean yazılımının kullanımı için gerekli olan dalga parametrelerinin oluşturulmasını sağlamaktadır.

4.2.2 Ocean yazılımı

Ocean yazılımı, Windows ortamında çalışan ve Wave yazılımının üretmiş olduğu parametreleri kullanarak dalga üreticisini çalıştıran programın ismidir. Ocean yazılımı için gerekli parametreleri sağlamak amacıyla wave yazılımında üretilmesi istenen dalgaya ait f_p pik frekans, m₀ sıfırıncı moment ve $R_{\tilde{u}}$ üretecin frekansı değerleri girilmektedir. Wave yazılımı yardımıyla girilen komutlar ile Ocean yazılımı kullanılarak mekanik ve hidrolik parçalardan oluşan dalga üreticisinin istenilen dalgaları üretmesi sağlanır.

4.2.3 Düzenli dalga üretimi

Wave yazılımında single (frekans, genlik) komutu ile üretilen tekil dalga parametrelerinin Ocean yazılımında çağrılarak kullanılması ile düzenli dalga üretimi yapılabileceği gibi Ocean yazılımının içinde bulunan sinüs fonksiyonu kullanılarak da istenilen boy ve periyoda sahip düzenli dalgaların üretilmesi sağlanabilmektedir.

4.2.4 Düzensiz dalga üretimi

Deniz ulaştırması, deniz ve inşaat mühendisliğinde rasgele deniz durumunda gemi davranışlarının belirlenmesi, açık denizlerdeki yapılar ve kıyı yapılarındaki hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanması düzensiz dalgaların önemli en uygulamalarındandır. Deniz yapılarının tasarımında lineer ve lineer olmayan davranışların stokastik tahmini için deniz durumunu temsil eden dalga spektrumunun bilinmesi şarttır. Düzensiz dalga koşullarını oluşturmak için bilinen belli başlı spektrum Pierson-Moskowitz, JONSWAP, Bretschneider, modelleri Scott. Neumann spektrumlarıdır.

Düzensiz dalgaların üretimi için Ocean yazılımı bu spektrum modellerinden faydalanmaktadır. Bunun için Wave yazılımı kullanılarak spektruma ait belirli komutlar

ve parametreler yardımı ile oluşturulan dalgaların Ocean yazılımında kullanılması ile düzensiz dalgalar üretilebilmektedir.

Deneylerde Hidrolik ve Kıyı-Liman Laboratuvar'ında Edinburg Designs firmasının üretmiş olduğu piston tipi dalga üreteci ile düzensiz dalgalar üretilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Dalga üreticisi

Rüzgâr etkisiyle üretilen dalgalar düzensizdirler (non-periodic). Su yüzeyinin sakin su seviyesine göre yapmış olduğu düşey yer değiştirmesi ile oluşan dalgalar iki temel yöntemle incelenmektedir. Bunlardan ilki zaman alanında analizdir. Burada sıfırı kesme yöntemi kullanılmaktadır. Sıfırı yukarı ya da aşağı kesme yöntemiyle kayıttaki her bir tekil dalga yüksekliği ve periyodu belirlenerek bunların istatiksel analizi ile çeşitli karakteristik dalga parametreleri elde edilir. Analog veriler genellikle zaman alanındaki analiz ile değerlendirilmektedir. Kısa dönem dalga istatistiği tekil dalgaların özellikleri ile ilgilenmektedir. İkincisi ise düşey yer değiştirmelerin spektral enerji yoğunluk fonksiyonunun elde edilmesidir (Yüksel ve Çevik [166]).

Sıfırı kesme yöntemi, bir dalga kaydındaki her bir tekil dalganın ayrılması yöntemidir (Şekil 4.12). Ardışık sıfırı kesme arasındaki zaman farkı bir tekil dalganın periyodunu, ardışık en düşük dalga çukuruna karşılık en yüksek dalga tepesi arasındaki yükseklik de bir tekil dalganın yüksekliği olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemin sıfırı yukarı ve sıfırı aşağı kesme şeklinde iki seçeneği bulunmaktadır (IAHR/PIANC [167]).

Bir firtınada oluşan deniz durumunun belirlenmesinde 10-25 dakikalık sürelerle alınan dalga kayıtlarının analizi kayda değer verilerin sağlanması için yeterli olabilmektedir. Sabit bir rüzgâr hızının sonsuz bir sürede esmesi ile dalga üretiminin mümkün olmayacağı gibi, dalga şartları sürekli değiştiğinden sonsuz uzunluktaki bir kaydın değerlendirilmesi de mümkün değildir. Dolayısıyla dalga kaydı zaman içerisindeki anlık bir ölçümdür. Bu nedenle dalgalar kesikli olarak kaydedilmektedir (Yüksel ve Çevik [166]).



Şekil 4.12 Düzensiz deniz durumunun tipik kaydı ve sıfırı aşağı kesme yöntemi prensibi Dijital dalga kaydının süresi 20 dakikadır. Bu 20 dakikalık süre hem kararlı bir deniz durumunu hem de düşük örnekleme çeşitliliği gerekliliğini sağlamaktadır. Dalga profilinin örnekleme aralığı mümkün olduğunca kısa olmalıdır. Bunun standardı dalga periyodunun onda biri veya tercihen yirmide biridir (Goda [168]).

Bir deniz durumuna ait dalga yükseklilerini hesaplamak için özellikle iki tanım kullanılmaktadır (CIRIA [169]).

- H_{%P}, aşılma olasılığı %P olan dalga yüksekliğidir. Bunlardan en çok kullanılanları H_{%0.1}, H_{%1}, H_{%2}, H_{%10} dur.
- H_{1/Q}, aşılma olasılığı 1/Q olan dalgaların ortalama yüksekliğidir. Bunlardan en çok kullanılanları belirgin dalga yüksekliği, H_s=H_{1/3}, H_{1/10}, H_{1/100}, H_{1/250} dir.

En çok kullanılan başlıca karakteristik dalga parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir (IAHR/ PIANC [167]).

Karakteristik Dalga Parametreleri	Açıklama							
Ortalama dalga yüksekliği, H _m	$\mathbf{H}_{m} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \mathbf{H}_{j}$							
Dalga yüksekliklerinin karelerinin ortalamasının karekökü, H _{rms}	$\mathbf{H}_{\mathrm{ms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \mathbf{H}_{j}^{2}}$							
Belirgin dalga yüksekliği, H _s =H _{1/3}	Dalga kaydındaki dalga yüksekliklerinin en yüksek 1/3'ünün ortalaması							
Dalga yüksekliği, H _{1/10}	Dalga kaydındaki dalga yüksekliklerinin en yüksek 1/10'nun ortalaması							
Dalga yüksekliği, H _{1/100}	Dalga kaydındaki dalga yüksekliklerinin en yüksek 1/100'nün ortalaması							
Dalga yüksekliği, H _{1/250}	Dalga kaydındaki dalga yüksekliklerinin en yüksek 1/250'sinin ortalaması							
Dalga yüksekliği, H _{%2}	Dalga kaydındaki dalga yüksekliklerinin %2'si tarafından aşılan dalga yüksekliği							
Maksimum dalga yüksekliği, H _{maks}	Dalga kaydındaki en yüksek dalga yüksekliği							
Ortalama dalga periyodu, T _m	$T_{m} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} T_{j}$							
Belirgin dalga periyodu, $T_s=T_{1/3}$	Dalga kaydındaki dalga yüksekliklerinin en yüksek 1/3'üne karşılık gelen periyodların ortalaması							
Maksimum dalga yüksekliğinin	Dalga kaydındaki en büyük dalga							
periyodu, T _{Hmaks}	yüksekliğinin periyodu							
Maksimum dalga periyodu, T _{maks}	Dalga kaydındaki en büyük dalga periyodu							

Çizelge 4.1 Tekil dalgaların kullanılması ile deniz durumunun karakteristik dalga yükseklik ve periyot parametreleri

Derin sudaki su yüzeyi değişimi genellikle bir Gaussian sürecini izlemekte dolayısıyla tekil dalga yükseklikleri Rayleigh dağılımına uymaktadır. Bu dağılım tek bir parametre ile tanımlanmaktadır. Bu parametreler H_m , H_{rms} ve serbest yüzey değişiminin varyansı, m_0 dır. Denklem 4.1'de kümülatif dağılım Denklem 4.2'de ise olasılık yoğunluk fonksiyonu verilmiştir.

$$P(H) = P(\underline{H} < H) = 1 - \exp\left(-\frac{H^2}{8m_0}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{H_m}\right)^2\right) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H}{H_{ms}}\right)^2\right)$$
(4.1)

$$p(H) = \frac{H}{4m_0} \exp\left(-\frac{H^2}{8m_0}\right) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{H_m^2} \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H_m}\right)^2\right) = \frac{2H}{H_{ms}^2} \exp\left(-\left(\frac{H}{H_{ms}}\right)^2\right)$$
(4.2)

Varyans, m_0 , serbest yüzey değişimi, $\eta(t)$, ya da dalga enerji spektrumundan, S(f), elde edilmektedir.

$$m_0 = \eta_{ms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (\eta(t) - \bar{\eta})^2 dt$$

Dalga yüksekliği dağılımının Rayleigh dağılımına uyması durumunda, H_{rms} değerleri ile karakteristik dalga yükseklikleri arasında bir ilişki vardır. Deniz durumunu gösteren en önemli parametre olan belirgin dalga yüksekliği, H_s , dalga spektrum momentlerinden yaklaşık olarak hesaplandığında H_{m0} olarak da gösterilmektedir. Dar bantlı spektruma sahip dalga sistemi için $H_{1/3}$ = H_s verilmekte ancak daha tipik deniz durumları için $0.9H_s$ < $H_{1/3}$ < H_s olarak verilmektedir (Yüksel ve Çevik [166]).

$$H_{m0} = H_{1/3} = 4.004 \eta_{ms} = 4.004 \sqrt{m_0}$$
(4.3)

$$H_{\rm rms} = 2\sqrt{2m_0} \tag{4.4}$$

Belirgin dalga yüksekliği derin deniz için aşağıdaki ortalama ile daha iyi temsil edilmektedir.

$$H_{1/3} = 3.8\sqrt{m_0}$$
(4.5)

Rayleigh olasılık dağılımına göre çeşitli karakteristik dalga yükseklikleri arasında aşağıdaki ilişkiler bulunmaktadır.

$$H_{s} = H_{m0} = H_{1/3}$$
(4.6)

$$H_{\rm ms} = (1/\sqrt{2})H_{1/3} \tag{4.7}$$

$$H_{1/10} = 1.27 H_{1/3}$$
 (4.8)

Sığ sularda dalga kırılması ve non-lineer etkilerden dolayı dalga yüksekliği dağılımı değişmekte ve önemli ölçüde Rayleigh dağılımından ayrılmaktadır. Son zamanlarda kırılma ve sığlaşma bölgesinde dalga yükseklikleri için dağılım modelleri geliştirilmektedir. Bu modeller, Beta-Rayleigh dağılımı (Hughes ve Borgman [170]), Weibull dağılımı (Glukhovskiy [171]), bileşik Weibull dağılımı (CWD) (Battjes ve Groenendijk [172]) ve değiştirilmiş dağılımlarının (Mendez vd. [120]) kullanılmasına dayanmaktadır. Bunlar arasında Battjes ve Groenendijk [172]'nin CWD dağılımı verilerin büyük çoğunluğu üzerinde başarıyla test edilmiştir. Ayrıca bu dağılım (CWD) mühendislik uygulamalarında kullanılabilmektedir (CIRIA [169]).

Deniz durumu, bir diğerinden oldukça farklı dalga serilerinden meydana gelmekle birlikte düzensiz ve rasgele bir karaktere sahiptir. Ancak yapılan incelemelerde dalga yüksekliklerinin rastgele olmadıkları ortaya çıkmıştır. Çok sık olarak farklı yüksek dalgaların kısa serileri (5-10) ve sonra düşük dalgaların serileri ve tekrar yüksek dalgaların serileri görülmektedir. Bu dalga grup hızı olarak adlandırılmaktadır. Bir deniz durumundaki dalgaların grupluğunu belirlemek için Goda [173], Kimura [174], Funke ve Mansard [175], Van Vledder [176] tarafından çeşitli parametreler önerilmiştir (CIRIA [169]).

Su yüzeyinin sakin su seviyesine göre yapmış olduğu düşey yer değiştirmesi ile oluşan dalgaların diğer bir inceleme yöntemi ise düşey yer değiştirmelerden spektral enerji yoğunluk fonksiyonunun elde edilmesidir. Burada elde edilen enerji spektrumunun momentleri yardımıyla yine çeşitli karakteristik dalga yüksekliği ve periyodu parametreleri elde edilmektedir (Yüksel ve Çevik [166]).

Genel olarak dalga alanlarının birçok tekil sinüzoidal dalga bileşenlerine ayrılabildiği gözlemlenmiştir. Her bir bileşen farklı yüksekliğe H, frekansa f ve yöne θ sahiptir. Dalga frekansının bir fonksiyonu olarak dalga enerjisinin dağılımı bir boyutlu dalga enerji yoğunluk spektrumu tarafından ifade edilmektedir. Bu da S_{ηη}(f) ile adlandırılmaktadır. Bağımsız değişkenler f ve θ ile yönsel veya iki boyutlu spektrum kullanılarak yönsel yayılma (spread) dahil edilebilmektedir, S_{ηη}(f, θ) (CIRIA [169]).

Bir deniz yüzeyi değişimi kaydından dalga enerji yoğunluk spektrumunun tahmini, Fourier transform tekniği kullanılarak elde edilebilmektedir. $S_{\eta\eta}(f)$ spektrumu için çeşitli dalga parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Spektrum analizi dalga enerjisinin frekansa göre dağılımını vermektedir. Bu yöntemin temeli zaman alanından frekans alanına bir dönüşümdür. Karmaşık bir fiziksel olayın tekil bileşenlere ayrılması tekniği birçok fiziksel probleme uygulanmaktadır (Yüksel ve Çevik [166]).

Son zamanlarda deniz yapılarının tasarımları için ortalama enerji periyodları T_E , $T_{m-1,0}$ veya T_{-10} kullanılmaktadır. Aslında bu basitçe enerji spektrumuna göre ağırlığı alımış ortalama periyottur. Ortalama dalga periyodunun farklı bir ifadesi ise denklem 4.9'da verilmiştir.

$$T_{m-1,0} = T_{-10} = T_{E} = \frac{m_{-1}}{m_{0}} = \frac{\int_{0}^{+\infty} \frac{S(f)}{f} df}{\int_{0}^{+\infty} S(f) df} = \frac{\int_{0}^{+\infty} T.S(f) df}{\int_{0}^{+\infty} S(f) df}$$
(4.9)

$$\mathbf{m}_{-1} = \int_{0}^{+\infty} \frac{\mathbf{S}_{\mathbf{f}}}{\mathbf{d}_{\mathbf{f}}} \mathbf{d}_{\mathbf{f}}$$
(4.9a)

 T_p ve $T_{m\mbox{-}1,0}$ arasındaki ilişki aşağıda ifade edilmiştir.

$$T_p = 1.1 T_{m-1,0}$$
 (4.10)

Ocean ve Wave yazılımı kullanılarak üretilebilen spektrumlar aşağıda açıklanmıştır.

Karakteristik Dalga Parametreleri	Açıklama						
Varyans, m ₀	$m_0 = \int_{f_{min}}^{f_{maks}} S(f) df = \int_{f_{min}}^{f_{maks}} f^0 S(f) df =$						
m ₀ spektrumunun n. derece momentleri	$m_n = \int_{f_{min}}^{f_{maks}} f^n S(f) df$						
Spektral belirgin dalga yüksekliği, H _{m0}	$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$						
Ortalama enerji dalga yüksekliği, H_E	$H_{\rm E} = \sqrt{8 m_0}$						
Pik frekans f_p ve pik periyot $T_p=1/f_p$ Pik frekans spektrumun maksimum (pik) değerinin frekansıdır. Bir kesme spektrumu için spektrum piklerinde kesme frekansı olabilmektedir. Ancak kesme pik frekansı sürekli olmadığı için bu seçim çok uygun olmamaktadır	Delft yöntemi $f_{P}^{Dm} = \int_{f_{1}}^{f_{2}} f S(f) df / \int_{f_{1}}^{f_{2}} S(f) df$ Burada f ₁ ve f ₂ kesme pik frekans çevresinde iki frekans eşiğidir ve spektrum değeri maksimum kesme pik değerinin m _% 'si dir. Genellikle m=%80 kullanılmaktadır. Read yöntemi $f_{P}^{Rm} = \int_{f_{min}}^{f_{maks}} f S^{n}(f) df / \int_{f_{min}}^{f_{maks}} S^{n}(f) df$ Burada kuvvet n, genellikle 4 veya 5 alınmaktadır.						
Ortalama dalga periyodu, $T_{m01}=T_{01}$	$T_{01}=1/f_{01}=m_0/m_1$						
Ortalama dalga periyodu, $T_{m02}=T_{02}$	$T_{02}=1/f_{02}=\sqrt{m_0/m_2}$						
Ortalama enerji periyodu, $T_E=T_{m-1,0}=T_{-10}$	$T_{E}=T_{m-1,0}=T_{-10}=1/f_{-10}=m_{-1}/m_{0}$						
Spektral genişlik parametresi, v ²	$v^2 = \frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1$						
Spektral genişlik parametresi, ε^2	$\varepsilon^2 = 1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}$						
Spektral genişlik parametresi, κ (Van Vledder ve Battjes, 1992)	$\kappa = \frac{\left \int_0^\infty S(f) \exp(i 2\pi f T_{02}) df \right }{m_0}$						

Çizelge 4.2 Spektrum analizinden elde edilen karakteristik dalga parametreleri (CIRL	A
[169]).	

4.2.4.1 Neumann Spektrumu

Mühendislikde tasarım amaçlı olarak kullanılan ilk analitik spektrum modeli Neumann (1953) tarafından geliştirilen Neumann modelidir (Yüksel ve Çevik [166]).

$$S(f) = \frac{24m_0}{f_p \pi} \left(\frac{f_p}{f}\right)^6 \sqrt{\frac{3}{\pi}} \exp\left[-\gamma \left(\frac{f_p}{f}\right)^2\right]$$
(4.11)

Burada, f frekans, f_p spektrumun pik frekansı, m_0 dalganın toplam varyansıdır (Edinburg designs [177).

4.2.4.2 Pierson-Moskowitz Spektrumu (P-M)

1964 yılında Pierson ve Moskowitz benzerlik teorisine dayanan ve Tucker tarafından Kuzey Atlantik'te kaydedilmiş dalga ölçüm verilerinin analiziyle enerji spektrumu dağılımı için yeni bir model vermişlerdir. P-M spektrum modeli tam gelişmiş deniz durumunu tanımlamaktadır ve tek parametrelidir (rüzgar hızı veya belirgin dalga yüksekliği). Dolayısıyla oldukça kararlı deniz şartlarından çıkarılmıştır. Feç ve süre sonsuz olarak dikkate alınmaktadır. Böyle bir modelin uygulanabilmesi için rüzgar hemen hemen sabit bir hızla ve sabit bir doğrultuda saatlerce çok geniş bir alanda esmiş olmalıdır. Bu varsayımlara rağmen, P-M modeli açık deniz yapılarının tasarımında ciddi fırtına etkisini temsil etmek için oldukça yararlı görülmüştür (Yüksel ve Çevik [166]).

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f'^5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f'}\right)^4\right]$$
(4.12)

$$f' = \frac{f_e}{\frac{f_p/f - \tau}{C_e} + \tau}$$
(4.13)

Wave yazılımı ile üretilmek istenilen PM spektrumu için denklem 4.14'deki dalga parametreleri kullanılmaktadır.

wave pm (
$$f_p$$
, C_e) (4.14)

Bura da f frekans, f_e, dalga genliğinden hesaplanan frekans, f_p, spektrumun pik frekansı, C_e, sıkışma faktörü, α =0.0081, τ =0.857222 dir (Edinburg designs [177]).

4.2.4.3 JONSWAP Spektrumu

JONSWAP spektrumu Hasselman ve ark. (1973) tarafından Joint North Sea Wave Project ismiyle bilinen 1968-1969 yılları arasında yapılan yoğun dalga ölçümlerinden sonra geliştirilmiştir ve bu nedenle bu isim kullanılmıştır. JONSWAP spektrumunun formülü P-M spektrum modelinin değiştirilmesi ile elde edilmiştir (Yüksel ve Çevik [166]).

$$S(f) = S_{PM}(f) \gamma^{e^{-\frac{1}{2}(\frac{f}{\sigma})^{2}}}$$
(4.15)

$$\sigma = \begin{cases} (f > f_p) & \sigma_a \\ (f < f_p) & \sigma_b \end{cases}$$
(4.16)

Wave yazılımı ile üretilmek istenilen JONSWAP spektrumu için denklem 4.17'deki dalga parametreleri kullanılmaktadır.

wave jonswap
$$(f_p, \alpha, \gamma, \sigma_a, \sigma_b)$$
 (4.17)

Burada, f_p , pik spektral yoğunluk frekansı, α =0.0081, γ =1-7, varyansı artıran diklik parametresi, σ_s şekil parametresi, spektrum eğrisinin sol tarafı çizilirken σ_{sa} =0.07, sağ tarafi çizilirken, σ_{sb} =0.09, değeri kullanılmaktadır (Edinburg designs [177]).

4.2.4.4 Scott Spektrumu

Scott (1965) spektrum ifadesi rüzgar hızı, feç veya süreden bağımsızdır ve tam gelişmiş deniz spektrumunu göstermektedir. Scott spectrumu iki parametrelidir. Bu spektrum formunun katsayıları boyutsuz değillerdir. Scott spektrumu Kuzey Atlantik'ten elde edilen saha verileri ile uyumludur (Yüksel ve Çevik [166]).

$$S(f) = \frac{2\pi 3.424}{\sqrt{S_{\ddot{o}}}} m_0 \exp\left[-\sqrt{\frac{(f-f_p)^2}{\frac{0.065\sqrt{S_{\ddot{o}}}}{2\pi}}\left(f-f_p+\frac{0.265\sqrt{S_{\ddot{o}}}}{2\pi}\right)}\right]$$
(4.18)
$$f = \left[-\frac{0.265\sqrt{S_{\ddot{o}}}}{2\pi} < f-f_p < \frac{0.165\sqrt{S_{\ddot{o}}}}{2\pi}\right]$$
(4.19)

Wave yazılımı ile üretilmek istenilen Scott spektrumu için denklem 4.20'deki dalga parametreleri kullanılmaktadır.

(4.19)

wave scott
$$(f_p, m_0, S)$$
 (4.20)

Burada, f_p pik spektral frekans, m₀ toplam varyans, S_ö (ölçek) [1,1000] aralığındaki model için gerçek boyutların oranıdır (Edinburg designs [177]).

4.2.4.5 Bretschneider Spektrumu

Bretschneider spektrumu dalga dağılımının dar bantlı olduğu ve tekil dalga yüksekliği ile dalga periyodunun Rayleigh dağılımına uyduğu varsayımına dayanarak elde edilen spektrum modelidir (Bretschneider [178], [179]). Bu spektrum iki parametrelidir ve deniz sistemlerinin tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır. Önceki modeller tam gelişmiş deniz durumu için türetilmişlerdir. Fakat bu model kısmen gelişmiş deniz (yani gelişmekte olan) için de uygulanabilir. Dalga yüksekliği, dalga periyodu ve rüzgar hızı arasındaki ilişki (Bretschneider [178]) tarafından ampirik olarak çıkartılmıştır (Yüksel ve Çevik [166]).

$$S(f) = \frac{5m_0}{f_p} \left(\frac{f_p}{f}\right)^5 e^{-1.25(f_p/f)^4}$$
(4.21)

Wave yazılımı ile üretilmek istenilen Bretschneider spektrumu için denklem 4.22'deki dalga parametreleri kullanılmaktadır.

wave bretsch
$$(f_p, m_0)$$
 (4.22)

Burada, f_p pik spektral yoğunluk frekansı, m₀ toplam varyansdır. Ayrıca Bretschneider spektrumu toplam varyans tarafından tanımlanan bir spektrumdur. Bu bazen dalga enerjisinin karesi, H_{rms}^2 olarak da tanımlanmaktadır (Edinburg designs [177]).

Deneylerde düzensiz dalga üretiminin yapılabilmesi için Bretschneider spektrumu tercih edilmiştir.

Boru hattı konulmaksızın üretilen düzensiz dalgalar gerek düzlem tabanda 35 cm su derinliğinde gerekse 1/10 eğimli tabanda 31 ve 23 cm su derinliklerinde ölçülerek farklı düzensiz dalga karakteristik parametreleri elde edilmiştir. Ocean ve Wave programları kullanılarak üretilen düzensiz dalgaların dalga karakteristikleri H_{1/10}, H_s, ,H_{rms}, H_{maks}, T_m, T_p, olarak Çizelge 4.3'de ifade edilmiştir.

Bulunan düzensiz dalga karakteristik parametrelerinden, surf bölgesi içerisinde düzensiz dalgalar için dalga yüksekliği ifadeleri Goda [168] yöntemi kullanılarak derin su dalga parametreleri elde edilmiştir. Goda [168] düzensiz dalga parametrelerinin değişimini aşağıdaki ifadelerle vermiştir.

Dalga No	Seçilen dalga karakteristikleri		Dalga üretiminde kullanılan girdi parametreleri		yod	d=23 cm		d=31 cm		d=35 cm		d=60 cm		Derin su dalga parametreleri				
					Peri									ц	ц	и	т.	Tm0
	H _s	T _m	m ₀ f _p	T _p	H _s	T _m	H _s	T _m	H _s	T _m	H _s	T _m	(cm)	(cm)	(cm)	• p0 (sn)	(sn)	
	(m)	(sn)			(s)	(cm)	(s)	(cm)	(s)	(cm)	(s)	(cm) (s)						
1	0.05	1.20	0.000156	0.833	1.14	4.71	0.96	4.94	0.96	4.75	0.97	5.00	0.98	5.22	6.43	3.60	1.14	0.98
2	0.07	1.20	0.000306	0.833	1.14	6.49	0.94	6.84	0.95	6.58	0.96	6.96	0.97	7.26	9.10	5.07	1.14	0.97
3	0.07	1.60	0.000306	0.625	1.60	7.08	1.17	7.18	1.18	6.80	1.17	7.09	1.20	7.75	9.42	5.33	1.60	1.20
4	0.11	1.60	0.000756	0.625	1.60	10.74	1.11	10.93	1.12	10.38	1.10	11.06	1.19	12.07	14.82	8.38	1.60	1.19
5	0.07	2.00	0.000306	0.500	2.00	7.33	1.36	7.33	1.39	6.92	1.35	6.95	1.42	7.47	8.93	5.08	2.00	1.42
6	0.09	2.00	0.000506	0.500	2.00	9.35	1.31	9.43	1.34	8.94	1.31	8.98	1.41	9.63	11.57	6.57	2.00	1.41
7	0.11	2.00	0.000756	0.500	2.00	11.18	1.25	11.43	1.29	10.91	1.25	10.98	1.41	11.75	14.37	8.12	2.00	1.41
8	0.09	2.60	0.000506	0.385	2.67	9.86	1.51	9.87	1.59	9.30	1.62	8.66	1.72	8.61	10.34	5.89	2.67	1.72

Çizelge 4.3 Ocean ve Wave kullanılarak seçilen ve farklı su derinliklerinde ölçülen dalga parametre değerleri
$$H_{1/3} = \begin{cases} K_{s}H'_{0} & :d/L_{0} \le 0.2\\ \min \left\{ (\beta_{0} H'_{0} + \beta_{1} d), \beta_{maks} H'_{0}, K_{s} H'_{0} \right\} & :d/L_{0} \le 0.2 \end{cases}$$

$$\beta_{0} = 0.028(H'_{0} + L_{0})^{-0.38} \exp \left\lfloor 20m^{1.5} \right\rfloor$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp[4.2m] \quad \beta_{\text{maks}} = \text{maks}\{0.92, \quad 0.32(\text{H}'_0/\text{L}_0)^{-0.29} \exp(2.4m)\}$$
(4.23)

(Goda [168]) yöntemiyle elde edilen düzensiz dalgalara ait derin su dalga karakteristikleri Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Düzensiz dalga kanalında d=60 cm su derinliğinde üretilmek istenilen H_s belirgin dalga yüksekliğinin, problar yardımıyla ölçülen belirgin dalga yüksekliği ile değişimi Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Şekilde düşey eksen wave yazılımına girilen dalga yüksekliği yani üretilmek istenilen dalga yüksekliğini yatay eksen ise dalga üreticinin ürettiği ve problar ile ölçülen dalga yüksekliklerini ifade etmektedir. Ayrıca girilen ve ölçülen dalga yüksekliklerini uyumlu oldukları da şekilden görülmektedir.



Şekil 4.13 Ölçülen dalga yüksekliğinin girilen dalga yüksekliği ile değişimi (d=60 cm)

4.3 Dalga Ölçümleri

Dalga kanalında üretilen dalga yükseklikleri ikiz çubuk elektrodlu problar vasıtası ile CLE3C30 model 8 kanallı bir dalga monitörü yardımıyla ölçülmüştür. İkiz çubuk elektrotlu prob sisteminin çalışması elektrodlar arasındaki suyun devreyi tamamlaması ve su seviyesinin alçalıp yükselmesi sırasında direncin değişmesi prensibine dayanmaktadır. Ölçümler, HR Wavedata programının 3.0 sürümü kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Dalga monitörü ve Hr Wavedata veri toplama sistemi

Dalga üretim kanalında doğru verileri elde etmek için probların kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Elektrodlar, üzerlerindeki su seviyeleri ile değişen akımı algılayarak HR Wavedata sistemiyle dalga karakteristiklerini bilgisayar ortamında düzenlemektedir. Probların kalibrasyonlarının yapılması için elektrodların farklı su seviyelerinde akım değerleri ölçülerek bu değerlere karşılık gelen su seviyesindeki artış grafiğinin $R^2=1$ gibi bir lineer doğru üzerinde olması istenmektedir. Her deneyden önce sakin su durumunda sistemin direnci dengeye getirilmek suretiyle kalibrasyon yapılmıştır.

HR Wavedata hidrolik modeller için kullanılan analog veri sinyallerinin elde edilmesi ve analizi için tasarlanmış bir programlar bütünüdür. Bu program özellikle dalga ölçüm probları için uygun olan bir kalibrasyon yöntemini, bir analiz paketleri takımını ve sınırlı sayıdaki parametrelerin gerçek zamanlı analizleri ile veri elde etme yöntemini kapsamaktadır. Bu analiz paketleri spektral ve istatiksel analiz yöntemlerini ayrıca yansıma analiz yöntemi ile bir çıktı veri değerlendirme yöntemini içermektedir. İstatiksel analiz yöntemi su seviyesinin sıfırı aşağı kesme yöntemine dayanmaktadır. Spektral analizi, ölçülen kalibre edilmiş belli zaman serilerindeki verileri, buna karşılık gelen spektrumu elde etmek için frekans alanına dönüştürmektedir.

Spektrumu hesaplamak için Hızlı Fourier Dönüşüm algoritması kullanılmaktadır. HR Wavedata ile H_s spektral dalga yüksekliği, f_p spektrumun pik dalga frekansı, T_p pik dalga periyodu, $T_{m(s)}$ spektral ortalama dalga periyodu gibi spektral parametreler elde edilmektedir. Şekil 4.3'de gösterildiği gibi tüm deney boyunca 4 nolu prob 60 cm su derinliğinde sabit olarak konuşlandırılmıştır. Ayrıca 3 nolu probun düzlem taban üzerine 1 ve 2 nolu problarında eğimli taban üzerine yerleştirilmesiyle sığlaşma tesiri belirlenmiştir.

Deneylerde, programa göre spektrum analizi için toplanacak veri sayısı 2ⁿ olarak 1024 adet alınmıştır. Ayrıca veri alma sıklığı 128 Hz ve veri alma süresi 8.5 dakika olarak seçilmiştir.

4.4 Boyut Analizi (Çevik [104])

Boyut analizinin esası, farklı değişkenleri kapsayan fiziksel sistemleri daha az sayıda boyutsuz gruplar halinde ifade etmektir. Değişkenlerin gruplar halinde düzenlenmesinde, her bir grubun fiziksel bir anlama sahip olmasına dikkat edilir.

Bütün fiziksel parametreler, mühendislikte [M] Kütle veya [K] Kuvvet, [L] Uzunluk, [T] Zaman temel boyutları olarak bilinen büyüklükler ile izah edilmektedir.

Deniz altı boru hatları altındaki yerel denge oyulma derinliği, boru-hareketli taban etkileşimini karakterize eden bazı bağımsız değişkenlere bağlıdır. Bu bağımsız değişkenler Çizelge 4.4'de gösterilmiştir (Çevik [104]).

	Parametre	Sembol	Birim	Boyut
Boruyu karakterize eden değişkenler	Boru çapı	D	m	L
Akışkanı karakterize eden	Akışkanın özgül kütlesi	ρ	kg/m ³	ML ⁻³
değişkenler	Akışkanın kinematik viskozitesi	ν	m ² /sn	L^2T^{-1}
	Su derinliği	d	М	L
	Yörüngesel hız	u _b	m/sn	LT^{-1}
Akımı karakterize eden	Dalga yüksekliği	Н	m	L
değişkenler	Dalga boyu	L	m	L
	Dalga periyodu	Т	sn	Т
Taban malzemesini karakterize	Katı madde özgül kütlesi	ρ_{s}	kg/m ³	ML ⁻³
eden	Tane çapı	d ₅₀	m	L
	Kıyı şev eğimi	m	m/m	-
Diğer değişkenler	Yerçekimi ivmesi	g	m/sn ²	LT^{-2}
	Oyulma derinliği	S	m	L

Çizelge 4.4 Etkili parametreler (Çevik [104])

Deniz altı boru hatları altındaki denge oyulma derinliği boru hattı, akım rejimi ve hareketli taban arasındaki etkileşim sonucunda birçok bağımsız değişkenin olayı etkileyeceği düşünülerek aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir.

S=f₁(D, ρ , ν , d, u_b, H, L, T, ρ _s, d₅₀, s, g)

(4.24)

Deneysel çalışmada olaya etkili olan değişkenlerin sayısını azaltmak ve bağımsız değişkenleri boyutsuz formda ifade edebilmek için yukarıdaki değişkenlerden D, u_b ve ρ tekrarlanan değişkenler olarak seçilerek boyut analizi uygulanmıştır (Çizelge 4.5).

	k_1	\mathbf{k}_2	k ₃	k_4	k ₅	k ₆	k ₇	k ₈	k9	k ₁₀	k ₁₁	k ₁₂	k ₁₃
	d	d ₅₀	ν	ρ	g	s	Н	Т	S	L	D	u _b	ρ
Μ	1	1	2	-3	1	0	1	0	1	1	1	1	-3
L	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Т	0	0	-1	0	-2	0	0	1	0	0	0	-1	0

Çizelge 4.5 Oyulma derinliğine etki eden parametreler için boyut analizi

Çizelge 4.5'den aşağıdaki bağıntılar yazılabilir;

k ₄ +k ₁₃ =0	(4.25)
$-k_3-2k_5+k_8-k_{12}=0$	(4.26)

$$k_{1}+k_{2}+2k_{3}+3k_{4}+k_{5}+k_{7}+k_{9}+k_{10}+k_{11}+k_{12}-3k_{13}=0$$
(4.27)

Bu üç denklem k₁₁, k₁₂, k₁₃ çözülürse;

(4.28)

$$k_{12} = k_8 - 2k_5 - k_3$$
 (4.29)

$$k_{11} = -k_1 - k_2 - k_3 - k_5 - k_7 - k_8 - k_9 - k_{10} \tag{4.30}$$

boyutsuz sayılar aşağıdaki Çizelge 4.6 yardımıyla elde edilir.

	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆	k ₇	k ₈	k ₉	k ₁₀	k ₁₁	k ₁₂	k ₁₃
	d	d ₅₀	ν	ρ	g	s	Н	Т	S	L	D	u _b	ρ
Π_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
Π_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
Π_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0
Π_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
Π_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	-2	0
Π_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Π_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0
Π_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	1	0
П9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0
Π_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0

Çizelge 4.6 Oyulma derinliğine etki eden boyutsuz parametreler

Yukarıdaki işlemler sonucunda oyulmaya etkili boyutsuz parametreler aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\Pi_{1} = \frac{d}{D}, \quad \Pi_{2} = \frac{d_{50}}{D}, \quad \Pi_{3} = \frac{v}{u_{b}D}, \quad \Pi_{4} = \frac{\rho_{s}}{\rho}, \quad \Pi_{5} = \frac{gD}{u_{b}^{2}}, \quad \Pi_{6} = s, \quad \Pi_{7} = \frac{H}{D}, \quad \Pi_{8} = \frac{u_{b}T}{D},$$
$$\Pi_{9} = \frac{S}{D}, \quad \Pi_{10} = \frac{L}{D}$$

O halde rölatif oyulma derinliği, S/D, diğer boyutsuzların fonksiyonu olarak aşağıdaki ifade ile

$$\frac{S}{D} = f_2(\frac{d}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{v}{u_b D}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{gD}{u_b^2}, m, \frac{H}{D}, \frac{u_b T}{D}, \frac{L}{D})$$
(4.31)

verilir.

4.31 fonksiyonel bağıntısında görülen boyutsuzlar sırasıyla (Çevik [104]);

- S/D rölarif oyulma derinliği,
- d/D rölatif su derinliği,
- d_{50}/D rölatif tane çapı,
- Re= u_bD/v boru Reynolds sayısı,
- ρ_s / ρ rölatif yoğunluk,
- $Fr^2 = u_b^2/gD$ boru Froude sayısı,
- m şev eğimi,
- H/D rölatif dalga yüksekliği,
- KC=u_bT/D Keulegan-Carpenter sayısı,
- L/D rölatif dalga boyu.

Olarak bilinmektedir.

Bu boyutsuz büyüklüklerin kendi aralarında bazı işlemlere tabi tutulması ile yeni boyutsuz büyüklükler elde edilebilir. Bu elde edilen yeni boyutsuz büyüklükler;

$$\frac{S}{D} = f_3(\text{Re,KC}, \theta, \xi, \frac{d}{H}, \frac{d}{D}, U_R, \frac{H}{L}, \frac{H}{D})$$
(4.32)

veya

$$\frac{S}{D} = f_4(\beta, KC, \theta, \xi, \frac{d}{H}, \frac{d}{D}, U_R, \frac{H}{L}, \frac{H}{D})$$
(4.33)

şeklinde yazılabilir. Sığlaşma bölgesini de içeren boru-hareketli deniz taban etkileşimini tanımlayan bu bağıntıdaki boyutsuz terimler sırasıyla incelenirse;

- $\beta = \frac{KC}{Re} = \frac{vT}{D^2}$, frekans parametresi, Re sayısı ile KC sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren bir boyutsuz sayı olup aynı zamanda periyot parametresi olarak da bilinir,
- $KC = \frac{u_b T}{D}$, Keulegan-Carpenter sayısı, yörüngesel yer değiştirmenin silindir boyutuna olan oranını göstermektedir. Bu sayı boru hatları arasındaki vorteks saçılımını çok iyi karakterize etmektedir,
- $\theta = \frac{u_*^2}{g(\Delta 1)d_{50}}$, Shields parametresi, tabanda hareketin başlamasını gösteren bu boyutsuz sayının tabanın hareketli olması durumunda boru hatları etrafındaki yerel oyulma olayına etkisinin olmadığı bulunmuştur,
- $\xi = \frac{s}{\sqrt{H_0/L_0}}$, surf parametresi, sığlaşma bölgesinde dalganın değişimini ve

kırılma tipini karakterize eden bir boyutsuz sayıdır. Bu parametre aynı zamanda kıyı bölgesinde profillerin oluşumunu da tanımlamaktadır,

- $\frac{d}{H}$, derinlik parametresi, geçiş derinliği bölgesinden itibaren dalganın değişiminin derinlikle olan etkilesimini karakterize eden bir parametredir,
- $\frac{d}{D}$, rölatif su derinliği, su derinliğinin boru çapı ile oranını gösteren bu parametre, su derinliğinin boru etrafındaki akım alanına, dolayısıyla taban hareketine olan etkisini göstermektedir,
- $U_R = \frac{HL^2}{d^3}$, Ursell sayısı, dalgaların doğrusal özelliğini karakterize eden bu sayı yörüngesel yerel ivmenin konvektif ivmeye olan oranı olarak da bilinmektedir.

Ursell sayısı bu özelliği ile değişen derinlikte dalga özelliklerinde meydana gelen değişimi tanımlayan bir boyutsuzdur,

- $\frac{H}{L}$, dalga dikliği,
- $\frac{H}{D}$, rölatif dalga yüksekliği, dalga yüksekliğinin boru çapına olan oranını gösteren bu boyutsuz, değişen boru çapının dalga yüksekliği ile olan etkileşimi ile boru hattı etrafındaki akım alanındaki değişimi tanımlamaktadır.

Görüldüğü gibi çok sayıda değişkenin etkili olduğu boru-hareketli deniz taban etkileşimi problemi bu anlamlı boyutsuzlar yardımıyla bir seri detaylı deneysel çalışma yapılarak çözümlenmeye çalışılacaktır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde gerek düzensiz dalga şartlarında elde edilen deneysel veriler kullanılarak gerekse düzenli (Çevik [104]) ve düzensiz dalga şartlarına ait deneysel veriler birlikte değerlendirilerek hareketli taban, boru ve dalga etkileşiminin rijit bir boru hattı altında meydana getirdiği oyulma derinliği farklı parametreler yardımıyla irdelenecektir.

Çalışmada deneysel verilerin değerlendirilmesi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama iki adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda düzensiz dalgaların ikinci adımda ise düzenli ve düzensiz dalgaların birlikte değerlendirilmesi ile rölatif oyulma derinliğinin, S/D, belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca her iki adım düzlem taban ve 1/10 eğimli taban şartları olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. İkinci aşamada deneysel veriler Yapay Sinir Ağları yöntemiyle üç adımda modellenmiştir. Birinci adımda sadece düzenli dalgalara ait deneysel veriler ikinci adımda sadece düzensiz dalgalara ait deneysel veriler ikinci adımda sadece veriler birlikte kullanılarak modelleme yapılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Deneysel verilerin değerlendirilmesinde izlenen adımlar

Düzensiz dalga etkisinde deniz altı boru hatları altında meydana gelen oyulmalar Bretschneider spektrum modeli ile üretilmiş fırtına şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bu düzensiz dalga şartları fırtınanın H_s , $H_{1/10}$, H_{rms} , T_m , T_p karakteristik parametreleri ile temsil edilmiştir.

5.1 Sığlaşmanın Akım Alanı Üzerine Etkisi

Dalgalar kıyıya doğru ilerledikçe azalan derinliğin etkisini hissetmeye başladıklarından dalgaların boyları kısalır ve dikleşirler. Bu olay sığlaşma olarak adlandırılmaktadır. Sığlaşma etkisi iki nedenle olmaktadır. Bunlardan ilki dalga boyunun kısalmasıdır. Dalgalar yavaşladıkça, dalga boyu kısalmakta ve dalga tepeleri birbirine yaklaşmaktadır. Dalga tepeleri arasındaki enerji sabit kaldığından ve su yüzeyinde daha kısa bir mesafede taşındığından dalga yüksekliği artmak zorundadır. Sığlaşmadaki ikinci faktör ise dalga yayılma hızının azalması ve dalga grup hızına ulaşmasıdır (Yüksel ve Çevik [166]). Dalgaların kıyıya daha da yaklaşması durumunda tabana yakın su partiküllerinin hareketleri yüzeydekilere nazaran gecikir, dalga yükseklikleri artmaya başlar, dalga tepelerindeki su partiküllerinin hızları dalga yayılma hızına hemen hemen eşit olur ve dalga maksimum yüksekliğine ulaştığında stabilitesi bozulur. Bu olay kırılma olarak adlandırılmaktadır. Bu olayla birlikte büyük enerji kayıpları meydana gelmektedir (Yüksel ve Çevik [166]).

Deneysel çalışmanın bu bölümünde dalga karakteristiklerinin sığlaşma bölgesinde değişiminin belirlenmesi ve bu değişimlerin akım alanı üzerine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Yukarıda bahsedil gibi dalgaların eğimli taban üzerinde ilerlemeleri sırasında dalga parametrelerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Yerel dalga karakteristikleri yaklaşan dalga özellikleri ve taban eğimi ile oldukça yakından ilgilidir. 1/10 kıyı şev eğimine sahip bir taban üzerinde dalgaların sığlaşması Şekil 5.2'de görülmektedir. Burada d/L₀, rölatif su derinliği, H_{s_1}/H_{s_0} sığlaşma katsayısıdır. Burada H_{s_1} yerel belirgin dalga yüksekliğini, H_{s_0} ise derin su belirgin dalga yüksekliğini ifade etmektedir. Şekil 5.2'de rölatif derinliğin azalmasıyla sığlaşmanın artma eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2 1/10 şev eğimli tabanda sığlaşma

Surf parametresi ξ , sığ suda dalga kırılma tipinin tanımlanması için kullanılan en yaygın parametredir (Novak [112]). Derin su dalga parametrelerinden elde edilen Surf parametresi;

$$\xi_0 = \frac{m}{\left(H_0/L_0\right)^{0.5}} \tag{5.1}$$

Burada, m taban eğimini, H_0/L_0 ise derin su dalga dikliğini ifade etmektedir. Surf parametresinin aldığı değerlere göre kırılma tipleri aşağıda;

- 1- $\xi_0 < 0.5$ spilling,
- 2- 0.5<ξ₀<3.3 plunging,
- 3- 3.3 $< \xi_0$ surging olarak sınıflandırılmaktadır.

Bir firtınada düzensiz dalgaları temsil eden farklı karakteristik düzensiz dalga parametreleri mevcuttur. Bu nedenle Çizelge 5.1'deki derin su surf parametresi elde edilirken dalga periyodu olarak pik periyot, T_p , derin su dalga boyu olarak, L_{p0} ve farklı derin su dalga yükseklikleri olarak H_{s0} , $H_{1/10,0}$ ve $H_{rms,0}$ kullanılmıştır. Deney verileri kullanılarak surf parametresi yardımıyla hesaplanan dalga kırılma tipleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Farklı karakteristik dalga parametreleri ile elde edilen dalga kırılma tipleri

Dalga Yükseklikleri	ξ_0 aralığı	Kırılma Tipi
H _s	$0.52 < \xi_0 < 1.14$	Plunging
H _{1/10}	0.47<ξ0<1.04	Spilling ve Plunging
H _{rms}	0.63<ξ ₀ <1.38	Plunging

1/10 şev eğimli kanalda yapılan deneylerde spilling ve plunging tipi dalga kırılmaları gözlemlenmiştir. Deney sisteminde boru yakınındaki dalga kırılmasına ait bir örnek Şekil 5.3'de görülmektedir.



a)



b)





Şekil 5.3 Dalga kırılması (d=23 cm, D=11.40 cm, H_s=13.96 cm, T_p=2.67s)

Sığlaşmanın genel özelliği bütün dalgalar için aynı karaktere sahip olsa da, farklı kırılma tipleri için dalga deformasyonu (H_i/H_{x0}), rölatif derinliğe, (d/L_0), bağlı olarak değişim göstermektedir. Burada H_{x0} farklı karakteristik dalga yüksekliklerini ifade edebilen derin su dalga yüksekliğidir. Dikliklerinin büyük olduğu dalgalar daha açıkta spilling tipinde kırılmaya başlamakta, dolayısıyla sürekli olarak küçülerek kıyıya doğru ilerlemektedir. Buna karşılık dalga dikliğinin daha küçük olduğu dalgalar kıyıya daha yakın olduğu bölgede maksimum büyüklüğe ulaştığında plunging tipinde kırılarak

küçülmektedir. Bu tip dalgalarda kırılmadan sonra enerji kaybı çok büyük olmaktadır. Şekil 5.4'de düzenli

ve düzensiz dalgaların 1/10 şev eğimindeki sığlaşma katsayıları birlikte görülmektedir. Şekilden düzenli (H_i) ve düzensiz (H_s) dalga şartlarında sığlaşmanın benzer davranış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.4 Düzenli ve düzensiz dalgalar için 1/10 şev eğimli tabanda sığlaşma

Iwagaki vd. [105], Swift ve Dixon [106] ve Kamphuis [107] dalga deformasyonları hakkında bir takım ifadeler vermişlerdir. Bu araştırmacılar rölatif derinliğin $d/L_0<0.1$ olduğu hallerde lineer dalga teorisinin geçersiz olduğunu ve Cnoidal teori ile lineer olmayan dalga teorilerinin uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

Rölatif derinliğin $d/L_0 < 1$ olması halinde artık lineer dalga teorisi geçerli değildir. Rölatif derinliğin bu sınırından sonra Cnoidal dalga teorisi daha gerçekçi sonuçlar verdiğinden bu teori uygulanmıştır (Yüksel ve Narayanan [108]). Bu çalışmada farklı H_x karakteristik düzensiz dalga yüksekliklerinde, L_x düzensiz dalga boylarının belirlenebilmesi için Battjes [180]'in önerdiği Cnoidal teori kullanılmıştır.

Sığ sulardaki kırılma şartları H_0 , L_0 derin su dalga parametrelerine ve m taban eğimine, bağlıdır. Surf bölgesinde düzensiz dalga deformasyonu ile değişen dalga karakteristiklerinin belirlenebilmesi için Goda [168], Van der Meer [181] ve Mendez vd. [120] çeşitli çalışmalar yapmıştır. Goda [168] ifadeleri bölüm 4.2.4.5'de verilmiştir.

5.2 Kıyı Profillerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada boru hatları altındaki oyulma özellikle sığlaşma bölgesi için araştırılmıştır. Oyulma ile ilgili deneylerin değerlendirilmesine geçilmeden önce kıyı profillerinin belirlenmesinin, bu profillerin boru hatları çevresindeki oyulma çukurları üzerine olan etkilerinin anlaşılması açısından son derece faydalı olacaktır. Sığlaşma bölgesinde deniz tabanında boru hattı olmaksızın kıyı profilinde meydana gelen değişim öncelikle belirlenmeye çalışılmıştır. Bu nedenle 1/10 kıyı eğiminde farklı fırtınalar altında kıyı profilleri elde edilmiştir (Şekil 5.5). Bu çalışmada kıyı profillerinin aldığı şekiller Horikawa [117] ve Dean [182]'nin vermiş olduğu ampirik ifadeler yardımıyla değerlendirilmiştir.

Horikawa [117] taban profilleri ile ilgili yapmış olduğu laboratuar çalışmasında normal ve fırtına profiline ilaveten birde geçiş profilinin olduğunu belirtmiş ve aşağıdaki ampirik ifadeyi vermiştir.

$$\frac{H_0}{L_0} = Cm^{-0.27} (d_{50}/L_0)^{0.67}$$
(5.2)

Burada, derin su dalga yüksekliği H_0 , derin su dalga boyu L_0 , taban eğimi m, tane çapı ise d_{50} ile temsil edilmektedir. C ampirik bir katsayı olup aldığı değerlere göre kıyı profilinin sınıflandırılması şu şekilde gerçekleşmektedir.

C>8 firtina profili

4<C<8 geçiş profili

C<4 normal profil

Ayrıca bu çalışmada kıyı profillerinin aldığı şekiller Dean [183]'nin elde ettiği parametre yardımıyla da değerlendirilmiştir. Denklem 5.3'de verilen parametre birden küçük oluğunda kıyıya doğru taşınım, birden büyük olduğunda ise açığa doğru taşınım meydana gelmektedir.

$$\frac{0.6\mathrm{H_{s0}gT_p}}{\pi\mathrm{L_0}\mathrm{w_s}} \tag{5.3}$$

Burada, derin su belirgin dalga yüksekliği H_{s0} , yer çekimi ivmesi g, pik dalga periyodu T_p , derin su dalga boyu L_0 , tanenin çökelme hızı w_s dir.



Şekil 5.5 Düzensiz dalga durumunda 1/10 kıyı şev eğiminde oluşan taban profilleri



Şekil 5.5 Devam

1/10 kıyı eğimindeki profil değişim ve katsayıları (Horikawa [117]) ve (Dean [183])'e göre değerlendirilerek Çizelge 5.2'de ayrı ayrı verilmiştir. Her iki değerlendirmeye göre de kıyıda yenileme görülmüştür. Burada X_m yatay mesafeyi, Y ise düşeydeki derinliği ifade etmektedir.

	Hor	ikawa (1978)		Dean (1973)	
Profil No	H _{s0} /L _{p0}	ξ0	С	$\frac{0.6H_sgT_p}{\pi L_0 w_s}$	Profil Tipi
1	0.026	0.623	1.93	0.41	Normal profil
2	0.036	0.528	2.68	0.57	Normal profil
3	0.019	0.718	2.29	0.43	Normal profil
4	0.030	0.575	3.56	0.68	Normal profil
5	0.012	0.914	1.90	0.33	Normal profil
6	0.015	0.805	2.45	0.43	Normal profil
7	0.019	0.729	2.99	0.53	Normal profil
8	0.008	1.137	1.81	0.29	Normal profil

Çizelge 5.2 Kıyı profil değişimi ve katsayıları

Şekillerden de görüldüğü gibi kıyı profillerinin sınıflandırılmasında dalga dikliği, H_0/L_0 , oldukça etkili bir boyutsuzdur. Dalga dikliğinin büyük olduğu şartlarda fırtına veya geçiş profili oluşurken küçük dalga dikliklerinde normal profil oluşmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar Dean [183], Horikawa [117], Çevik ve Yüksel [114]'un sonuçları ile oldukça benzerlik göstermektedir. Aynı dalga periyodu için dalga yüksekliğinin artması halinde normal profilden fırtına profiline doğru değişim gözlenmektedir. Bu da dalga yüksekliğinin kıyı profillerinin şekillenmesi üzerinde etkisinin olduğunu göstermektedir. Ancak derin su dalga dikliği kıyı eğimini içermediğinden kıyı profillerinin şekillenmesini tam olarak açıklamamaktadır.

Düzensiz dalgalar 1/10 eğimli kıyılarda plunging tipinde kırılmakta ve plunging tipi kırılmada geri dönüş akımı tam olarak çekilmeye fırsat bulamadan ardışık dalga yaklaşmaktadır, böylece askı modundaki katı madde kıyı çizgisinde yığılmaktadır. Surf parametresi (ξ) taban eğimini ve dalga dikliğini içerdiğinden kıyı çizgisinin şekillenmesini derin su dalga dikliğine göre daha iyi tanımlamaktadır.

Bu çalışma sadece 1/10 şev eğiminde gerçekleştirilmiştir ve oluşan profillerin tamamı normal profildir. Ayrıca hem düzenli hem de düzensiz dalga koşullarında 1/10 eğime sahip kıyılarda kıyı çizgisinde yığılma ile normal profil gözlenmiştir.

5.3 Düzlem Taban Halinde Yerel Oyulma Derinliğinin İncelenmesi

Bu çalışmada deneyler sarkma halinin söz konusu olmadığı rijit boru şartlarında gerçekleştirilmiştir. İlk önce boyutlu ifadeler kullanılarak bir fırtınadaki düzensiz dalga etkisinde oyulmaya neden olan parametrelerin etkisini görmek için oyulma derinliği S, ile boru çaplarının, dalga yüksekliklerinin ve dalga periyodlarının değişimleri ayrı ayrı irdelenmiştir. Daha sonra da boyutsuz ifadeler kullanılarak rölatif oyulma derinliği S/D, ile farklı parametrelerin ilişkileri tek tek incelenmiştir.

Deneylerde boru hatları, 35 cm su derinliğinde düzlem tabana, dalga yayılma doğrultusuna dik olarak yerleştirilmiştir. Deneyler esnasında kullanılan taban malzemesinin özellikleri Bölüm 4.1.2'de verilmiştir. Her bir deney şartı için aynı taban malzemesi kullanıldığından farklı büyüklükteki taban malzemelerinin etkisi dikkate alınmamıştır. Düzlem taban durumunda yapılan deneylerde dört farklı boru çapı kullanılarak değişken akım şartları etkisinde boru hatları altındaki yerel oyulma derinliği araştırılmıştır.

Shields tarafından elde edilen Shields parametresi, tabanda hareketin başlamasını gösteren bir boyutsuz sayıdır. Tabanın hareketli olması durumunda boru hatları etrafındaki yerel oyulma olayına etkisinin olmadığı bulunmuştur. Bu nedenle çalışmada Shields parametresinin oyulma derinliği üzerine olan etkisi dikkate alınmamıştır. Yasa [95] hem hareketli taban hem de temiz su koşulunda dalga etkisi altında hareketli bir taban üzerinde deniz altı boru hatları çevresindeki oyulmayı incelemiştir. Hareketli taban ve temiz su verilerini kullanarak her iki durumda oyulma derinliği tahmini için denklem 3.19'u önermiştir (Yasa [95]). Burada Shields parametresinin artmasıyla oyulma derinliğinin arttığı açıkça görülmektedir. Araştırmacı Sümer ve Fredsøe [80]'nin ifadelerinin aksine, Shields parametresi θ , arttığında oyulma derinliğinin gittikçe arttığını ifade etmiştir.

Bu çalışmanın amacı, düzensiz dalga etkisinde denizaltı boru hatları etrafındaki yerel oyulmanın belirlenmesidir. Çalışmada düzensiz bir deniz durumunun hangi dalga parametre/parametreleri ile tanımlanması gerektiği veya yerel oyulma derinliği üzerinde hangi dalga parametrelerinin daha etkili olabileceği araştırılmıştır. Düzensiz veya rasgele bir deniz durumunu ya da fırtınayı temsil eden dalga yüksekliği parametreleri $H_{1/10}$, H_s , H_{rms} , ve dalga periyodu parametreleri T_m , T_p olabilmektedir. Dolayısıyla yapılan deneylerde deniz durumunu temsil eden tüm dalga parametreleri değerlendirilmiştir.

5.3.1 Boyutlu parametrelerle oyulma derinliğinin incelenmesi

Bu bölümde bir fırtınadaki düzensiz dalga etkisinde oyulmaya etkili olan farklı boyutlu parametreler tek tek incelenecektir.

5.3.1.1 Boru çapı etkisinin incelenmesi

Düzensiz dalga etkisinde boru çapı değişiminin oyulma derinliğine olan etkisi belirgin dalga yüksekliği, H_s , 4.75 cm, pik dalga periyodu, T_p , 1.14 sn dalga şartı örnek olarak alınarak Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Şekilden aynı dalga şartında boru çapı arttıkça oyulma derinliğinin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni boru çapının artmasıyla şekillenen vorteks sistemlerinin akım çizgilerinde daha fazla sapmaya neden olmasıdır. Böylece oyulma hızı ve derinliği artmaktadır. Benzer bulgu düzenli dalga şartlarında yapılmış deneylerde (Çevik ve Yüksel [114]) tarafından da elde edilmiştir.



Şekil 5.6 Boru çapının oyulma derinliği üzerine etkisi (H_s =4.75 cm, T_p =1.14s) Boru hatları ile taban arasındaki etkileşim açıklık oranına da bağlıdır. Silindir etrafındaki oyulma çukurunun büyümesiyle birlikte, silindir ile taban arasındaki açıklık oranı artmaktadır. Açıklık oranının yeterince büyümesiyle art-iz vorteks sisteminin şiddeti azalmaktadır. Silindir çapına bağlı olarak şekillenen vorteks sistemi aynı oranda oyulma çukuru nedeniyle şiddetini kaybetmekte ve dinamik dengeye ulaşarak durmaktadır.

5.3.1.2 Dalga yüksekliği etkisinin incelenmesi

Dalga yüksekliğinin oyulma derinliği üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla 35 cm sabit su derinliğinde artan belirgin dalga yüksekliği, H_s, ile oyulma derinliği ilişkisi farklı boru çaplarında Şekil 5.7'de görülmektedir.

Şekilden görüldüğü gibi oyulma derinliği dalga yüksekliğinin bir fonksiyonu olup belirgin dalga yüksekliğinin artması ile artma eğilimi göstermektedir. Bunun nedeni dalga yüksekliğinin artması ile boru, akım ve taban etkileşiminin artmasıdır.



Şekil 5.7 Düzlem tabanda oyulma derinliğinin dalga yüksekliği ile değişimi

Düzensiz bir deniz durumunun hangi dalga yüksekliği parametresi/parametreleri ile tanımlanacağının veya oyulma derinliğinde hangi dalga yüksekliği parametresinin daha etkili olacağının belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerde deniz durumunu temsil eden tüm dalga yükseklikleri değerlendirilmiştir.

Düzensiz dalga etkisinde yapılan her deneyde fırtınaya ait $H_{1/10}$, H_s , H_{rms} , dalga yükseklik parametreleri elde edilmiştir. Tüm düzensiz dalga verileri kullanılarak oyulma üzerinde hangi dalga yüksekliği parametresinin daha etkin olduğunun belirlenebilmesi için her bir parametre ayrı ayrı incelenmiştir. Çizelge 5.3'de oyulma derinliğini belirlemede sadece dalga yüksekliğinin kullanılması durumunda farklı dalga yüksekliği parametreleri için korelasyon katsayılarının birbirleriyle aynı olduğu görülmektedir.

Oyulma	R-Korelasyon katsayıları					
	H _{1/10}	Hs	H _{rms}			
S	0.76	0.76	0.76			

Cizelge 5.3 Dalga parametrelerine ait korelasyon

Ayrıca oyulmanın başlaması, gelişmesi ve dinamik stabiliteye ulaşması belli bir sürede gerçekleşmektedir. Bu süre içinde yapı büyüklü küçüklü çok sayıda dalga ile karşılaşmaktadır. Tüm bu süreç içersinde görülebilecek tek bir maksimum dalga yüksekliğinin oyulma sürecini kontrol edecek bir parametre olmasını düşünmek de çok gerçekçi olmamaktadır. Bununla birlikte sabit bir dalga yüksekliğinde oyulmada saçılımların olması dalga yüksekliğinin tek başına etkili bir parametre olmadığını göstermektedir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Düzlem taban ve 1/10 şev eğiminde oyulma derinliğinin dalga yüksekliği ile değişimi

5.3.1.3 Dalga periyodu etkisinin incelenmesi

Dalga periyodu da firtina özelliklerini tanımlayan en önemli parametrelerdendir. Salınımlı akım yapısında dalga tepesi ve çukuru için geçen süre aynı olduğundan simetrik bir akım yapısı meydana gelmekte ve herhangi bir taşınım söz konusu olmamaktadır. Ancak sığlaşma bölgesinde asimetrik akım yapısı meydana gelmektedir. Bu durumda dalga tepeleri daha dik ve periyot daha küçük iken dalga çukurları daha yayvan ve geri dönüş periyot süresi daha uzundur. Dalga tepeleri daha şiddetli vorteks oluşmasına neden olarak askı haline geçen malzemeyi kıyıya doğru taşırken dalga çukurları daha az ve daha uzun süreli vorteks saçılımının neden olarak askı haline geçen taneleri kıyıdan açığa doğru taşımaktadır. Böylece asimetrik bir oyulma çukuru meydana gelmektedir.

Yine düzensiz dalga etkisindeki firtına şartlarında dalga periyodu için hangi periyot parametresinin daha etkin olduğunun belirlenebilmesi amacıyla Şekil 5.9'da oyulma derinliğinin dalga periyodu ile değişimi farklı boru çaplarında incelenmiştir. Şekilden görüldüğü gibi oyulma derinliği dalga periyodunun bir fonksiyonu olup bu parametrenin artması ile artma eğilimi göstermektedir. Periyodun süresi silindirlerin etrafındaki vortekslerin şekillenmesindeki en önemli etkenlerden birisidir. Bunun nedeni ise periyodun büyümesiyle vortekslerin gelişmeye fırsat bularak şiddetlerini artırmalarıdır. Artan boru çapı etkisi ile oyulma derinliğindeki artış da Şekil 5.9'da bir kez daha görülmektedir.



Şekil 5.9 Düzlem tabanda oyulma derinliğinin dalga periyodu ile değişimi

Düzensiz dalga spektrumundan elde edilebilen önemli bir periyot parametresi ise pik periyot T_p dir. Bu değer dalga enerji yoğunluk spektrumunun maksimum değerine karşılık gelen periyottur.

Düzensiz dalga etkisindeki firtina şartlarında pik dalga periyodu T_p'nin etkisinin araştırılması için deneysel çalışmadan elde edilen tüm düzensiz dalga verileri (düzlem taban ve 1/10 şev eğimi) kullanılarak oyulma derinliği ile değişimi Şekil 5.10'da incelenmiştir. Şekilden pik dalga periyodunun artmasıyla oyulma derinliğinin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Ayrıca sabit bir periyotta oyulma derinliğinin artmasının nedeni dalga yüksekliğinin artmasıyla yörüngesel yatay maksimum hızların artması, boru çapının artmasıyla vorteks şekillenmelerinin artması ve derinliğin azalmasıyla dalgaların taban yakınındaki tesirlerinin artmasıdır.



Şekil 5.10 Tüm düzensiz veriler kullanılarak oyulma derinliğinin pik periyot T_p ile değişimi

Dalga spektrumunun altında kalan alanın momentlerinden elde edilen spektral ortalama dalga periyodu T_m dir. Yine düzensiz dalga etkisindeki fırtına şartlarında T_m spektral ortalama dalga periyodunun etkisinin araştırılması için deneysel çalışmadan elde edilen tüm düzensiz dalga verileri kullanılarak oyulma derinliği ile değişimi Şekil 5.11'de araştırılmıştır. Şekilden ortalama dalga periyodunun T_m 'nin artmasıyla oyulma derinliğinde artma eğilimi görülmektedir.



Şekil 5.11 Tüm düzensiz veriler kullanılarak oyulma derinliğinin ortalama periyot, T_m, ile değişimi

Düzensiz dalga periyodları olan T_p ve T_m 'nin oyulma derinliği ile iyi bir uyuma sahip oldukları görülmektedir. Ancak T_p pik periyot kullanılması durumunda daha yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Bu nedenle bundan sonraki düzensiz dalga değerlendirilmelerinde dalga periyodu olarak T_p kullanılacaktır. Benzer şekilde Sümer ve Fredsøe [103, [79] düzensiz dalga ile yaptıkları çalışmalarda T_p 'nin verilerle daha iyi bir uyum sağladığını belirtmişlerdir.

5.3.2 Boyutsuz parametrelerle rölatif oyulma derinliğinin incelenmesi

Bu bölümde bir fırtınadaki düzensiz dalga etkisinde rölatif oyulmaya neden olan farklı boyutsuz parametreler ayrı ayrı irdelenecektir.

5.3.2.1 Frekans parametresi etkisinin incelenmesi

Tek yönlü akım halinde rölatif oyulma derinliği Re sayısı ile değişmekte ve vorteks saçılım frekansı oyulma derinliği ile yüksek korelasyon katsayısına sahiptir. Oyulma derinliği Re sayısının belirli aralıklarında farklı şekillenen vorteks yapısıyla

değişmektedir. Sırf dalga etkisinde oyulma derinliği KC sayısıyla ve oyulma çukurunun şekli üzerine dalga periyodunun önemli bir etkisi vardır. Oyulma çukuru dalga periyoduna bağlı olarak şekillenen art-iz vorteks yapısından kaynaklanan şiddetli türbülans sonucunda meydana gelmektedir (Çevik ve Yüksel [199]). Periyodik akım alanında boru hatları çevresinde şekillenen akım yapısında meydana gelen değişimler ve bu değişimlerin sonucunda oluşan yerel oyulma çukuruna KC ve Re sayılarının birlikte olan etkisini araştırmak amacıyla, rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresiyle olan değişimi incelenmiştir.

KC ve Re sayılarının birbirine oranıyla frekans parametresi, β , elde edilmektedir (5.4).

$$\beta = D^2 / vT$$

$$\beta_p = D^2 / vT_p$$
(5.4)
(5.4a)

Frekans parametresi boru çapı D, kinematik viskozite v ve pik periyot, T_p,'yi

içermektedir. Düzensiz dalga etkisindeki fırtına şartlarında pik dalga periyodu kullanılarak düzlem tabanda rölatif oyulma derinliği S/D ile frekans parametresinin değişimi Şekil 5.12'de irdelenmiştir. Düzlem tabanda artan frekans parametresi ile rölatif oyulma derinliğinin azalma eğilimi görülmektedir.

Benzer etki Çevik ve Yüksel [114]'in düzenli dalga ile yaptığı deneysel çalışmada da görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi rölatif oyulma derinliği S/D ile frekans parametresi β arasındaki korelasyon katsayısı yüksek değildir. Çünkü Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de dalga yüksekliğinin oyulma derinliği üzerinde etkili parametre olduğu görüldüğü halde frekans parametresi dalga yüksekliğini içermemektedir.



Şekil 5.12 Düzlem tabanda frekans parametresinin rölatif oyulma derinliği ile değişimi

5.3.2.2 Dalga dikliği etkisinin incelenmesi

Buraya kadar yapılan değerlendirmelerde düzlem tabanda oyulma derinliğinin hem artan dalga yüksekliği hem de artan dalga periyoduyla artma eğiliminde olduğu ve saçılımların fazla olduğu şekillerden görülmüş olsa da dalga dikliğinin etkisi de Şekil 5.13'de araştırılmıştır. Dört farklı boru çapında dalga dikliğinin 0.001-0.006 aralığında değiştiği deneylerde genel olarak artan dalga dikliği ile rölatif oyulma derinliği azalma eğilimi göstersede saçılım çok fazladır. Bununla birlikte sabit bir boru çapında daha uzun dalgalar daha büyük oyulmaya neden olmaktadır.



Şekil 5.13 Düzlem tabanda rölatif oyulma derinliğinin dalga dikliği ile değişimi

5.3.2.3 Derinlik parametresi etkisinin incelenmesi

Düzlem tabanda düzensiz dalga etkisindeki firtina şartlarında rölatif oyulma derinliği S/D'nin derinlik parametresi, H_s/d, ile değişimi Şekil 5.14'de incelenmiştir. Şekilden dört farklı boru çapında rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresinin artması ile artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Ayrıca artan boru çapı ile rölatif oyulma derinliğinin azaldığı da söylenebilmektedir. Derinliğin azalması artan dalga yüksekliğinin tabandaki anlık kayma gerilmesi ve hızların artmasına neden olarak taban hareketinin verlestirilen boru hatları etrafındaki ve vorteks sistemlerinin şiddetlenmesine yol açmaktadır. Derinliğin azalmasıyla dalga-taban etkileşimi artmaktadır.



Şekil 5.14 Düzlem tabanda rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi

5.3.2.4 Ursell sayısı etkisinin incelenmesi

Ursell sayısı dalgaların lineerliğinin bir ölçüsüdür ve genellikle dalga teorilerini seçmekte kullanılmaktadır. Ayrıca dalganın sahip olduğu enerjiyi ve tabana iletilen enerjinin büyüklüğünü tanımlamaktadır (İbrahim ve Nalluri [88]). Böylece bu parametre hem dalga özelliklerindeki değişimi belirtmekte hem de tabanda etkili olacak akım yapısını da karakterize edebilmektedir. U_R sayısı(HL²/d³) dalga yüksekliğinin kendisi, dalga boyunun karesi (dolaylı olarak dalga periyodu) ile doğru orantılı ve derinliğin küpü ile ters orantılıdır. Şekil 5.15'de 35 cm su derinliğinde rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi her bir boru çapı için ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 5.15 Düzlem taban durumunda S/D'nin Ursell parametresi ile değişimi (H_s-T_p) Her bir boru çapı için ayrı ayrı çizilen eğrilerden rölatif oyulma derinliğinin Ursell parametresi U_R ile oldukça yüksek bir korelasyon katsayısı ile arttığı görülmektedir. Bu

sonuç (Çevik ve Yüksel [114])'ın düzenli dalga ile yaptığı deneysel çalışma sonuçları ile oldukça uyumludur. Su derinliğinin (sığlaşma) etkisini oldukça iyi bir şekilde ifade eden bu parametre oyulma derinliği üzerinde etkili olan boru çapını içermemektedir. Oysa Şekil 5.6'da görüldüğü gibi oyulma boru çapı ile de ilişkilidir. Çünkü boru çapının artması ile daha da şiddetlenen bir türbülanslı akım alanı yaratılmakta ve bu da oyulma derinliğini artırmaktadır. Bu durumda boru çapının etkisini dikkate almayan Ursell parametresi tek başına oyulma derinliğinin belirlenmesinde yeterli görülmemiştir (Çevik ve Yüksel [114]).

Çevik ve Yüksel [114] düzenli dalgalarla yapmış oldukları çalışmada boru etkisini de içeren ve daha yüksek bir korelasyona sahip olan Boru Ursell sayısını, U_{RB} , önermişlerdir (Denklem 5.5). Boru Ursell sayısı;

$$U_{RB} = U_R \left(\frac{H}{D}\right)^2 = \left(\frac{HL^2}{d^3}\right) \left(\frac{H}{D}\right)^2 = \frac{H^3 L^2}{d^3 D^2}$$
(5.5)

5.3.2.5 Boru Ursell sayısının incelenmesi

Düzlem tabanda Boru Ursell sayısının etkisini düzensiz dalga şartlarında daha iyi görebilmek için dalga yüksekliği H_s ve pik dalga periyodu T_p kullanılarak, rölatif oyulma derinliği ile değişimi araştırılmıştır. Şekil 5.16'da düzlem tabanda tüm boru çapları için rölatif oyulma derinliğinin değişimi Ursell parametresi ile gösterilirken Şekil 5.17'de Boru Ursell sayısı ile gösterilmiştir.



Şekil 5.16 Düzlem tabanda S/D'nin U_R ile değişimi (H_s-T_p)



Şekil 5.17 Düzlem tabanda S/D'nin U_{RB} ile değişimi (H_s-T_p)

Düzlem taban halinde rölatif oyulma derinliğinin, Ursell sayısı ile değişimine ait korelasyon katsayısı 0.83 ve saçılım fazla iken, boru etkisinin ilavesi ile türetilen Boru Ursell sayısı ile değişimine ait korelasyon katsayısı 0.96 olarak elde edilmiştir. Düzensiz dalga etkisinde de Boru Ursell sayısının çok daha yüksek bir korelasyon katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni bu parametrenin yaklaşan dalganın özelliklerinin boru etrafındaki akım yapısına olan etkisini yeterince içermesidir.

5.4 1/10 Kıyı Eğiminde Yerel Oyulma Derinliğinin İncelenmesi

Dalgalar kıyıya doğru ilerlerken deniz tabanından etkilenmektedirler. Dalga yükseklikleri sığlaşma ve sapma olayları nedeniyle değişmektedir. Derin denizde dalga yüksekliği dağılımı Rayleigh dağılımına uymakta ancak sığ suda Rayleigh dağılımından sapmaktadır. Sığ su dalgaları için evrensel olarak kabul edilmiş bir dağılım yoktur (Yüksel ve Çevik [166]).

Düzensiz dalga deneyleri düzlem tabanda, 35 cm su derinliğinde gerçekleştirilmiş ve sonuçları Bölüm 5.3'de değerlendirilmiştir. 1/10 kıyı eğiminde ise deneyler 31 cm, 23 cm su derinliklerinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde de ilk önce boyutlu parametrelerle daha sonrada boyutsuz parametrelerle 1/10 kıyı eğiminde bir fırtınadaki oyulma derinliği farklı parametreler için tek tek incelenecektir.

5.4.1 Boyutlu parametrelerle oyulma derinliğinin incelenmesi

Bu bölümde bir fırtınadaki düzensiz dalga etkisinde oyulmaya neden olan farklı boyutlu parametreler ayrı ayrı irdelenecektir.

5.4.1.1 Dalga yüksekliği etkisinin incelenmesi

Su derinliğinin dalga boyunun yarısından büyük olduğu derinlikler derin su bölgeleri olarak bilinmekte ve dalgalar tabandan etkilenmeden yayılmaktadırlar. Bununla birlikte dalgalar sığ su derinliklerine girdiğinde tabanı hissetmekte ve dalga yükseklikleri değişmektedir. Şekil 5.18'de 1/10 eğimli tabanda dört farklı boru çapında oyulma derinliği ile H_s belirgin dalga yüksekliğinin değişimi irdelenmiştir.

Şekilde düzlem tabanda olduğu gibi dalga yüksekliğinin artmasıyla oyulma derinliğindeki artma eğilimi görülmekle birlikte saçılım fazladır. Ayrıca artan boru çapı etkisiyle oyulma derinliğindeki artış da şekilden görülmektedir. Tek başına dalga yüksekliğinin oyulma derinliğini ifade etmede uygun olmadığı bir kez daha görülmektedir.



Şekil 5.18 1/10 kıyı eğiminde oyulma derinliğinin dalga yüksekliği ile değişimi

1/10 eğimli tabanda düzensiz dalga etkisindeki fırtına şartlarında sabit bir boru çapı ve farklı su derinliklerinde oyulma derinliği ile H_s belirgin dalga yüksekliğinin değişimi Şekil 5.19'da araştırılmıştır. Şekilde artan dalga yüksekliği ve azalan su derinliği ile oyulma derinliğindeki artma eğilimi görülmektedir. Bu da oyulma üzerinde dalga yüksekliği, su derinliği ve boru çapının etkili değişkenler olduğunu ifade etmektedir. Ancak her bir değişken oyulmayı ifade etmede tek başına yeterli değildir.



Şekil 5.19 1/10 eğimli tabanda sabit boru çapında, D=11.40 cm, oyulma derinliğinin dalga yüksekliği ve su derinliği ile değişimi

5.4.2 Boyutsuz parametrelerle rölatif oyulma derinliğinin incelenmesi

Bu bölümde rüzgâr firtinası etkisinde boru hattı altında meydana gelen oyulma boyutsuz parametreler yardımıyla araştırılacaktır.

5.4.2.1 Frekans parametresinin incelenmesi

Frekans parametresinin silindirik yapılar etrafındaki akım alanını iyi tariflediği daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Frekans parametresi, Re sayısının etkisini de içeren dalga periyoduna bağlı bir parametredir. Düzlem tabandakine benzer şekilde 1/10 şev eğimi için de Şekil 5.20'de dört farklı boru çapında rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresi ile değişimi incelenmiştir. Bölüm 5.3'de düzlem tabanda elde edilen sonuca benzer şekilde artan frekans parametresi ile rölatif oyulma derinliğinin azaldığı görülmektedir. Frekans parametresi dalga periyodunu, boru çapını ve viskoziteyi içermektedir. Bu parametre, oyulma üzerinde etkili olduğu görülmüş olan dalga yüksekliğini içermediğinden tek başına yeterli bir parametre değildir.



Şekil 5.20 1/10 eğimli tabanda rölatif oyulma derinliğinin frekans parametresi ile değişimi

1/10 kıyı eğiminde kullanılan tüm boru çapları için rölatif oyulma derinliğinin farklı su derinliklerinde frekans parametresi ile değişimi Şekil 5.21'de incelenmiştir. Frekans parametresi su derinliğini içermediğinden her bir derinlik için ayrı ayrı eğriler oluşturulmuştur. Derinliğin azalmasıyla rölatif oyulma derinliğinin arttığı şekilden açıkça görülmektedir. Bu da oyulma üzerinde su derinliğininde etkili olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 5.21 Rölatif oyulma derinliğinin 1/10 eğimli şevde farklı su derinliklerinde frekans parametresi ile değişimi

5.4.2.2 Dalga dikliğinin incelenmesi

Şekil 5.22'de 1/10 eğimli tabanda 31 cm ve 23 cm su derinliklerinde rölatif oyulma derinliğinin dalga dikliği ile değişimi incelenmiştir. Dalga dikliğinin artması ile rölatif

oyulma derinliğinde azalma eğilimi görülmekle birlikte saçılım çok fazladır. Düzlem taban ile Çevik [104]'in deneylerinde de benzer sonuç elde edilmiştir.



Şekil 5.221/10 şev eğiminde farklı su derinliklerinde rölatif oyulma derinliğinin dalga dikliği ile değişimi

5.4.2.3 Derinlik parametresinin incelenmesi

Düzlem tabandakine benzer şekilde 1/10 eğimli şevde farklı su derinliklerinde rölatif oyulma derinliğinin derinlik parametresi ile değişimi Şekil 5.23'de irdelenmiştir. Şekilden derinlik parametresinin artmasıyla oyulma derinliğindeki artma eğilimi görülmekle birlikte düzlem tabandakine benzer bir şekilde saçılım çok fazladır.



Şekil 5.23 1/10 şev eğiminde farklı su derinliklerinde rölatif oyulma derinliğinin dalga dikliği ile değişimi

5.4.2.4 Ursell parametresinin incelenmesi

Şekil 5.24'de 1/10 eğimli tabanda farklı su derinliklerinde ve boru çaplarında düzensiz dalga parametreleri olan H_s ve T_p değerleri kullanılarak rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi irdelenmiştir. Düzlem tabanda olduğu gibi Ursell sayısının artmasıyla rölatif oyulma derinliğindeki artma eğilimi açıkça görülmektedir. Ayrıca her bir boru çapının etkisi de şekilden görülmektedir.



Şekil 5.24 1/10 şev eğiminde rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısı ile değişimi (H_s, T_p)

1/10 kıyı eğiminde düzensiz dalga etkisindeki fırtına şartlarında farklı karakteristik dalga yükseklikleri H_{1/10}, H_s, H_{rms} ve pik dalga periyodu T_p kullanılarak hesaplanan rölatif oyulma derinliğinin Ursell sayısına karşı değişimi sırasıyla Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de incelenmiştir.



Çizelge 5.4'de farklı karakteristik dalga yüksekliği parametreleri ile pik periyot, T_p ve ortalama periyot T_m dalga parametreleri kullanılarak elde edilen Ursell sayılarının rölatif oyulma derinliği ile değişiminin korelasyon katsayıları verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi farklı karakteristik dalga yüksekliği ve dalga periyodu ile ifade edilen Ursell sayıları yüksek bir korelasyon katsayısına sahiptir. Çizelge 5.4'de düzensiz dalga halinde pik periyot T_p ile elde edilen Ursell sayılarının ortalama periyot T_m ile elde edilen Ursell sayılarından daha yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Şekillerin birlikte değerlendirilmesi ile S/D'nin belirlenmesinde kullanılan değişik dalga yüksekliklerinin bir fark yaratmadığı ancak periyodun korelasyon katsayısını az da olsa değiştirdiği görülmektedir.

Çizelge 5.4 /10 kıyı eğiminde farklı karakteristik dalga parametrelerinin kombinasyonu ile elde edilen U_R sayıları ile rölatif oyulma derinliği değişiminin korelasyon katsayıları (R)

Periyot Dalga yüksekliği	T _p	T _m
H _s	0.78	0.76
H _{1/10}	0.78	0.76
H _{rms}	0.78	0.76

5.4.2.5 Boru Ursell parametresinin incelenmesi

1/10 kıyı eğiminde bir firtinayı temsil eden dalga yükseklik parametreleri H ve periyot parametreleri T kullanılarak rölatif oyulma derinliğinin U_R sayısı ile değişiminden, her bir boru çapı için oyulma derinliğinin U_R sayısı ile oldukça yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu daha önce bulunmuştur. Çevik ve Yüksel [114] boru çapını da içeren boru Ursell sayısını (U_{RB}) elde ederek rölatif oyulma derinliğinin yüksek bir korelasyon katsayısı ile belirlenmesini sağlamıştır (Denklem 5.5).

Düzensiz dalga halinde de benzer uyumu araştırmak için Çevik ve Yüksel [114]'in önerdiği Boru Ursell sayısı kullanılarak dalga yükseklik parametreleri H ve periyot T parametreleri için rölatif oyulma derinliğinin değişimi Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30'da irdelenmiştir.



Şekil 5.30 1/10 kıyı eğiminde S/D'nin U_{RB} ile değişimi

1/10 şev eğiminde farklı karakteristik düzensiz dalga parametreleri kullanılarak elde edilen Boru Ursell sayıları U_{RB} ile rölatif oyulma derinliğinin S/D korelasyon katsayıları Çizelge 5.5'de görülmektedir. Çizelge 5.5'de pik dalga periyodu T_p kullanılarak elde edilen Boru Ursell sayılarının rölatif oyulma derinliği ile daha yüksek bir korelasyon katsayısı verdiği görülmekle birlikte ortalama dalga periyodu T_m kullanılarak elde edilen korelasyon katsayıları ile de çok yakındır.

Çizelge 5.5 1/10 şev eğiminde farklı karakteristik dalga parametrelerinin kombinasyonu ile elde edilen U_{RB} sayıları ile rölatif oyulma derinliği değişiminin korelasyon katsayıları (R)

Periyot Dalga yüksekliği	T _p	T _m
H _{1/10}	0.97	0.96
H _s	0.97	0.96
H _{rms}	0.97	0.96

5.5 Düzlem Taban ile 1/10 Şevin birlikte değerlendirilmesi

Bölüm 5.3'de düzlem taban ve Bölüm 5.4'de 1/10 kıyı eğimi şartlarında rölatif oyulma derinliğinin farklı boyutsuz parametrelerle değişimi incelenmişti. Örnek olarak düzensiz dalga parametrelerinden belirgin dalga yüksekliği H_s ve pik dalga periyodu T_p dikkate alındığında S/D rölatif oyulma derinliğinin Boru Ursell sayısı ile değişimine ait korelasyon katsayısının hem düzlem tabanda (R=0.96) hem de 1/10 kıyı eğiminde (R=0.97) yüksek olduğu görülmektedir.

Gerek geçiş derinliği gerekse sığ su şartları bir arada düşünülerek Boru Ursell sayısının rölatif oyulma derinliği üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla bu bölümde düzlem taban ve 1/10 kıyı eğimindeki deneysel veriler birlikte değerlendirilmiştir.

5.5.1 Boru Ursell parametresinin incelenmesi

Geçiş ve sığ su şartlarında düzensiz dalga etkisindeki fırtına şartlarında benzer uyumu araştırmak için farklı dalga yükseklik parametreleri H_x ve pik dalga periyodu T_p kullanılarak elde edilen, Çevik ve Yüksel [114]'in önerdiği, Boru Ursell sayısı ile rölatif oyulma derinliğinin değişimi Şekil 5.31, Şekil 5.32, Şekil 5.33'de irdelenmiştir.


Şekil 5.31 Düzlem ve eğimli tabanda S/D'nin U_{RB} ile değişimi (H_{1/10}-T_p)



Şekil 5.32 Düzlem ve eğimli tabanda S/D'nin U_{RB} ile değişimi (H_s-T_p)



Şekil 5.33 Düzlem ve eğimli tabanda S/D'nin U_{RB} ile değişimi (H_{rms}-T_p)

Düzlem taban ve 1/10 şev eğiminde farklı düzensiz dalga parametreleri birlikte kullanılarak elde edilen U_{RB} Boru Ursell sayılarının rölatif oyulma derinliği S/D ile değişiminin korelasyon katsayıları Çizelge 5.6'da görülmektedir. Rölatif oyulma derinliğinin belirlenmesinde değişik dalga yüksekliklerinin bir fark yaratmadığı ancak dalga periyodunun korelasyon katsayısını az da olsa değiştirdiği görülmektedir. Denklemlerin tamamı yüksek bir korelasyon katsayısına sahiptir. Düzensiz dalga şartlarında yatay taban ile 1/10 eğimli tabanda gerçekleştirilen tüm deney verileri dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Deneylerden elde edilen farklı düzensiz karakteristik dalga parametreleri H_{1/10}, H_s, H_{rms}, T_m, T_p ile yüksek korelasyon katsayısına sahip olan Boru Ursell sayısını içeren denklemler elde edilmiştir.

Periyot Dalga yüksekliği	T _p	T _m
H _s	0.96	0.95
H _{1/10}	0.96	0.95
H _{rms}	0.96	0.95

Çizelge 5.6 Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı karakteristik dalga parametrelerinin kombinasyonu ile elde edilen U_{RB} sayıları ile rölatif oyulma derinliği değişiminin korelasyon katsayıları (R)

5.6 Düzensiz ve Düzenli dalgaların birlikte incelenmesi

Deniz dalgalarından en çok görüleni ve en önemlisi rüzgâr dalgalarıdır. Rüzgâr dalgaları düzenli dalgalardan çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Rüzgâr dalgaları rüzgâr olmadan üretilemezler ve kendilerini üreten rüzgâr etkisiyle hareket ederler. Rüzgâr etkisiyle oluşan dalgaların "dalga üretim bölgesinde" çok farklı boya, yüksekliğe ve periyoda sahip oldukları bilinir ve genellikle kısa dalga tipindedirler. Gelişmekte olan dalgalar fırtına bölgesinde olduklarından dolayı fırtına dalgası olarak adlandırılmaktadır. Kıyıdaki fırtına dalgaları ise göreceli olarak kısa süreli fırtınalara aittir.

Rüzgâr dalgalarının en karakteristik özellikleri düzensiz olmaları ve lineer dalga teorisinde kabul edildiği gibi sinüzoidal formda olmayışlarıdır.

Üretildikleri alan dışına çıkmış olan ve ilerlemeleri sırasında küçülme eğilimi gösteren göreceli olarak uzun dalgalara soluğan dalgaları (ölüdeniz, swell) adı verilir. Daha düzenli ve rüzgâr dalgalarına göre daha uzun süre özelliklerini korumalarına rağmen kıyıya ilerlemeleri esnasında dalga yükseklikleri ve periyodları rastgele değişmektedir.

Doğadaki dalgalar dalga teorilerinde olduğu gibi düzenli değildirler. Uzun mesafeli fırtınaların yaratmış olduğu ölü deniz dalgaları oldukça düzgün olsa da yine düzensizdir. Bu nedenle rüzgâr dalgası ve ölü deniz dalgasının oluşturmuş olduğu bir deniz durumunun modellenmesinde düzensiz dalgalar kullanılmalıdır (Yüksel ve Çevik [166]).

Bu bölümde düzensiz dalga etkisindeki fırtınalarda oluşacak oyulma derinlikleri ile Çevik ve Yüksel [114]'in düzenli dalga şartlarında gerçekleştirmiş olduğu deney verileri birlikte değerlendirilecektir. Bu nedenle düzenli dalga şartları altında meydana gelen oyulma derinliği ile aynı oyulma derinliğine neden olan düzensiz dalga etkisindeki bir fırtınayı temsil edecek karakteristik dalga parametrelerinin neler olması gerektiği araştırılacaktır.

5.6.1 Dalga yüksekliği

Düzlem taban ve 1/10 kıyı şev eğiminde gerek düzensiz gerekse düzenli dalgalar ile gerçekleştirilen oyulma deneylerinde, düzensiz dalga etkisindeki fırtınayı hangi karakteristik dalga yüksekliği parametresinin temsil etmesi gerektiğinin belirlenmesi için Bretschneider spektrumu ile üretilen fırtınayı temsil eden dalga yükseklik parametreleri H_{1/10}, H_s, H_{rms}, ayrı ayrı düzenli dalga yükseklikleri ile birlikte oyulmaya karşı çizilmiştir.

Şekil 5.34'de $H_{1/10}$ dalga yüksekliği ile temsil edilen düzensiz dalga etkisindeki fırtınada oluşan oyulma derinliği, düzenli dalga etkisindeki oyulma derinliği ile birlikte değerlendirilmiştir. Benzer şekilde Şekil 5.35'de H_s ile düzenli dalga ve Şekil 5.36'da H_{rms} ile düzenli dalga birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 5.34 Oyulma derinliğinin dalga yüksekliği parametresi H_{1/10} ile değişimi



Şekil 5.35 Oyulma derinliğinin dalga yüksekliği parametresi H_s ile değişimi



Şekil 5.36 Oyulma derinliğinin dalga yüksekliği parametresi, H_{rms}, ile değişimi

Düzlem taban ve 1/10 kıyı şev eğiminde farklı dalga yüksekliklerinin oyulma derinliği S ile değişimine ait korelasyon (R) katsayıları Çizelge 5.7'de gösterilmiştir. Düzenli dalgaların neden olduğu oyulma ile H_{rms} ve H_s dalga yüksekliği ile ifade edilen düzensiz dalgaların neden olduğu oyulmanın korelasyon katsayılarının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.7 Farklı dalga yüksekliklerinin kombinasyonu ile elde edilen oyulma ile dalga yüksekliklerinin korelasyon katsayıları

Sıra No	Dalga Yükseklikleri	R
1	$H_i + H_{1/10}$	0.55
2	$H_i + H_s$	0.68
3	H _i +H _{rms}	0.70

5.6.2 Dalga periyodu

Bilindiği gibi vorteks saçılımlarının gelişimi dalga periyotları tarafından kontrol edilmektedir. Bir önceki bölümde de dalga periyodunun oyulma derinliği üzerinde etkili bir parametre olduğu görülmüştü. Ancak burada düzensiz dalga şartlarındaki hangi dalga periyot parametresinin düzenli dalga şartındaki dalga periyoduna eş değer olacağı araştırılacaktır. Şekil 5.37 düzenli dalga periyodu ile düzensiz dalgaları temsil eden ortalama dalga periyodu T_m ilişkisini göstermekte iken Şekil 5.38 düzenli dalga periyodu ile düzensiz dalgaları temsil eden pik dalga periyodu T_p ilişkisini göstermektedir.



Şekil 5.37 Oyulma derinliğinin dalga periyot parametresi, T_m, ile değişimi



Şekil 5.38 Oyulma derinliğinin dalga periyot parametresi, T_p, ile değişimi

Düzlem taban ve 1/10 şev eğiminde gerçekleştirilen düzenli ve düzensiz dalga şartlarındaki deneylerde oyulma derinliği S ile dalga periyodlarının değişimine ait korelasyon katsayıları Çizelge 5.8'de gösterilmiştir. Burada düzenli dalgaların periyodları ile düzensiz dalgaların ortalama periyodlarının T_m daha yüksek bir korelasyon katsayısına sahip oldukları görülmektedir.

Çizelge 5.8 Farklı dalga periyodlarının kombinasyonu ile elde edilen oyulma/dalga periyot korelasyon katsayıları

Sıra No	Dalga Periyotları	R
1	$T_i + T_m$	0.74
2	$T_i + T_p$	0.54

5.6.3 Boru Ursell sayısı

Bir önceki bölümde Ursell sayısına boru çapının ilavesi ile elde edilen Boru Ursell sayısının rölatif oyulma derinliği S/D ile daha yüksek bir korelasyon katsayısına sahip olduğu görülmüştü. Burada düzensiz dalga şartlarında farklı karakteristik dalga yükseklik ve periyot parametrelerinin kombinasyonu ile elde edilen Boru Ursell sayılarının düzenli dalga şartlarından elde edilen Boru Ursell sayıları ile olan uyumları için Şekil 5.39, Şekil 5.40, Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'de ayrı ayrı Boru Ursell sayılarının rölatif oyulma derinliği ile değişimleri araştırılmıştır.



Şekil 5.39 S/D'nin Boru Ursell sayısı ile değişimi (H_s, T_m)



Şekil 5.40 S/D'nin Boru Ursell sayısı ile değişimi (H_{rms}, T_m)



Şekil 5.41 S/D'nin Boru Ursell sayısı ile değişimi (H $_{1/10}$, T $_m$)



Şekil 5.42 S/D'nin Boru Ursell sayısı ile değişimi (H_{rms}, T_p)

Düzlem taban ve 1/10 şev eğiminde düzenli, düzensiz ve düzenli/düzensiz dalga şartlarında rölatif oyulma derinliğinin farklı karakteristik dalga parametrelerinin kullanılmasıyla elde edilen Boru Ursell sayılarının korelasyon katsayıları ve denklem katsayıları Çizelge 5.9'da gösterilmiştir. Çizelge 5.9'da düzensiz dalga etkisindeki rölatif oyulma derinliğinin, farklı karakteristik dalga parametreleri kombinasyonu kullanılarak elde edilen Boru Ursell sayıları ile bulunan ifadelerin her birinde yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Sadece ifadedeki a katsayı ve b üstel değerler farklıdır. Bu nedenle düzensiz dalga etkisinde oyulma derinliği hesabında bu ifadelerin herhangi biri kullanılabilir.

$$S/D = aU_{RB}^{b}$$
(5.6)

Çizelge 5.9 Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı karakteristik dalga parametrelerinin kombinasyonu ile elde edilen U_{RB} sayıları ile rölatif oyulma derinliği değişiminin korelasyon katsayıları (R)

Sıra	Dalga	Donklom	S/D		D	Denklem
No	koşulu	Delikielii	а	b	ĸ	No
1	Düzensiz	$H_{1/10}$ - T_p	0.041	0.289	0.96	5.7
2		H _s -T _p	0.049	0.302	0.96	5.8
3		H _{rms} -T _p	0.069	0.299	0.96	5.9
4		$H_{1/10}$ - T_m	0.047	0.327	0.95	5.10
5		H _s -T _m	0.058	0.341	0.95	5.11
6		H _{rms} -T _m	0.083	0.336	0.95	5.12
7	Düzenli	H _i -T _i	0.042	0.410	0.91	5.13
8	Düzenli	H _s -T _m	0.055	0.353	0.93	5.14
9	ve Düzensiz	H _{rms} -T _p	0.062	0.328	0.93	5.15

Ayrıca düzenli ve düzensiz dalga etkisindeki oyulma derinliklerinin birlikte değerlendirilmesi halinde düzenli dalga şartları altında meydana gelen oyulma derinliği ile aynı oyulma derinliğine neden olan düzensiz dalga etkisindeki bir fırtınayı temsil edecek karakteristik dalga parametrelerinin neler olması gerektiği incelenmiştir.

Seçilen su derinliği, boru çapı, dalga yüksekliği, dalga periyodu, dalga boyu parametreleri kullanılarak düzenli dalga ifadesinden elde edilen rölatif oyulma derinliğine karşı düzensiz dalga şartlarındaki fırtına için farklı karakteristik dalga parametreleri ile elde edilen rölatif oyulma derinliği değişimleri değerlendirilmiştir. Şekil 5.43a'da düzenli dalga ifadesi denklem 5.13'den elde edilen S/D ile H_s-T_m kullanılarak düzensiz dalga ifadesi denklem 5.13'den elde edilen S/D değişimi, Şekil 5.43b'de ise düzenli dalga ifadesi denklem 5.13'den elde edilen S/D ile H_s-T_p

kullanılarak düzensiz dalga ifadesi denklem 5.8'den elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 5.43 Düzensiz denklem ile Düzenli denklem değişimi (H_s)

Benze şekilde Şekil 5.44a'da denklem 5.13 ile denklem 5.10'dan elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin değişimi, Şekil 5.44b'de ise denklem 5.13 ile denklem 5.7'den elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 5.44 Düzensiz denklem ile Düzenli denklem değişimi (H_{1/10})

Benze şekilde Şekil 5.45a'da denklem 5.13 ile denklem 5.12'den elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin değişimi, Şekil 5.45b'de ise denklem 5.13 ile denklem 5.9'dan elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 5.45 Düzensiz denklem ile Düzenli denklem değişimi (H_{rms})

Şekil 5.43b, Şekil 5.44a ve Şekil 5.44b'de düzenli dalga etkisi altındaki fırtınaların yaratmış olduğu oyulma derinliklerine (denklem 5.13) karşı Hs-Tp, H1/10-Tm, H1/10-Tp dalga parametreleri ile temsil edilen eşdeğer düzensiz firtina dalgalarının neden olduğu oyulma derinlikleri (denklem 5.8, denklem 5.10, denklem 5.7) görülmektedir. Şekillerde düzenli ve düzensiz fırtına dalgaları için elde edilmiş denklemlerden hesaplanan küçük oyulma derinlikleri yakın değerler alırken, daha büyük oyulma derinliklerinde eşdeğer dalga için düzenli dalga oyulma derinlikleri daha büyük elde edilmektedir. Şekil 5.45a'da yukarıda bahsedilenlerin tam tersine H_{rms}-T_m dalga parametreleri ile ifade edilen düzensiz firtinanın yarattığı oyulma derinlikleri eşdeğer düzenli dalganın yaratmış olduğu oyulma derinliklerinden daha büyük elde edilmektedir. Şekil 5.45b'de H_{rms}-T_p ile temsil edilen düzensiz fırtınaya ait oyulma derinliklerinin eşdeğer düzenli dalga etkisindeki firtinanın yaratmış olduğu oyulma derinliği ile benzer davranış göstermelerine rağmen, en iyi değişimin Şekil 5.43a'da görülen ve H_s-T_m dalga parametreleri ile temsil edilen düzensiz fırtınanın yaratmış olduğu oyulma derinlikleri ile temsil edildiği görülmektedir. Şekillerden Hs-Tm ve Hrms-Tp parametreleri ile ifade edilen düzensiz dalga firtinası etkisindeki oyulma derinliği ile bunlara eşdeğer düzenli dalga firtinası etkisindeki oyulmaların gerek küçük gerekse büyük oyulma derinlikleri için son derece uyumlu oldukları görülmektedir.

5.7 Beta Ursell parametresi $(U_{R\beta})$

Bölüm 5.3'de rölatif oyulma derinliğinin, boru çapı karesinin viskozite ve periyoda oranıyla verilen frekans parametresi ile değişimi incelenmiş ve aralarında belli bir korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Ancak aynı bölümde oyulma derinliğinin dalga yüksekliği ve diğer parametrelerle de ilişkili olduğu gösterilmişti.

Ursell sayısı ise daha önce tanımlandığı gibi dalga yüksekliğini, dalga boyunu ve su derinliğini içeren yerel bir boyutsuz olup tabana aktarılan dalga enerjisi miktarıdır. Frekans parametresi D^2/vT ve U_R Ursell parametresinin oranıyla elde edilen Beta Ursell parametresi aşağıda tanımlanmıştır.

$$U_{R\beta} = \beta_{p} \left(\frac{1}{U_{R}}\right) = \left(\frac{D^{2}}{\nu T}\right) \left(\frac{d^{3}}{HL^{2}}\right) = \left(\frac{d^{3}D^{2}}{HL^{2}\nu T}\right)$$
(5.16)

5.7.1 Düzensiz dalga etkisinde Beta Ursell sayısının incelenmesi

Bir firtinadaki düzensiz dalga şartlarında S/D rölatif oyulma derinliğinin Beta Ursell sayısı $U_{R\beta}$ ile değişimi farklı karakteristik dalga parametreleri için araştırılmıştır. Şekil 5.46'da $H_{1/10}$ - T_p , Şekil 5.47'de H_s - T_p ve Şekil 5.48'de H_{rms} - T_p karakteristik dalga parametreleri ile hesaplanan Beta Ursell sayısı ($U_{R\beta}$) ile rölatif oyulma derinlikleri (S/D) değişimleri a şıklarında, ölçüm ve denklemden elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin karşılaştırılmaları ise b şıklarında görülmektedir. Farklı düzensiz dalga yükseklikleri ve pik dalga periyodu kullanılmasıyla elde edilen Beta Ursell sayılarının korelasyon katsayılarının aynı derecede yüksek olduğu ancak denklemlerde farklı katsayılara sahip oldukları görülmektedir (R=0.93).



Şekil 5.46 S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H_{1/10}, T_p)



Şekil 5.47 S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H_s, T_p)



Şekil 5.48 S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H_{rms}, T_p)

5.7.2 Düzenli dalga etkisinde Beta Ursell sayısının incelenmesi

Düzlem taban ve 1/10 şev eğiminde düzenli dalga parametreleri (Çevik ve Yüksel [114]) kullanılarak elde edilen Beta Ursell sayısı ile rölatif oyulma derinliğinin değişimi Şekil 5.49'da gösterilmiştir. Beta Ursell sayısının düzenli dalga şartlarındada rölatif oyulma derinliği ile yüksek bir korelasyon katsayısına sahip olduğu görülmektedir (R=0.92)



Şekil 5.49 S/D'nin U_R ile değişimi (H_i, T_i)

5.7.3 Düzensiz ve Düzenli dalgaların birlikte Beta Ursell sayılarının incelenmesi

Düzlem taban ve 1/10 şev eğiminde düzenli ve düzensiz dalga şartlarında S/D rölatif oyulma derinliğinin Beta Ursell sayısı $U_{R\beta}$ ile değişimi yine düzenli dalgalar ile birlikte düzensiz dalgalar için farklı karakteristik dalga parametrelerinin kullanılması ile incelenmiştir. Şekil 5.50'de $H_{1/10}$ -T_m, Şekil 5.51'de H_s -T_m, Şekil 5.52'de H_{rms} -T_m karakteristik dalga parametreleri ile elde edilen Beta Ursell sayısı $U_{R\beta}$ ile S/D rölatif oyulma derinlikleri değişimleri a şıklarında, ölçüm ve denklemlerden elde edilen rölatif oyulma derinliklerinin karşılaştırılmaları ise b şıklarında verilmiştir.



Şekil 5.50 S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H_{1/10}, T_m)



Şekil 5.51 S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H_s, T_m)



Şekil 5.52 S/D'nin $U_{R\beta}$ ile değişimi (H $_{rms},\,T_m)$

Düzlem taban ve 1/10 kıyı eğiminde düzenli, düzensiz ve düzenli/düzensiz dalga şartlarında rölatif oyulma derinliğinin farklı karakteristik dalga parametrelerinin kullanılmasıyla elde edilen Beta Ursell sayılarının korelasyon katsayıları ve denklem katsayıları Çizelge 5.10'da gösterilmiştir. Çizelge 5.10'da düzensiz dalga etkisinde farklı karakteristik dalga parametreleri kombinasyonu kullanılarak elde edilen Beta Ursell sayıları ile ifade edilen rölatif oyulma derinliklerinin her birinde yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiş ve dalga periyodunun az da olsa bir fark yarattığı görülmüştür. Sadece ifadedeki katsayı ve üstel değerler farklıdır. Bu nedenle düzensiz dalga etkisinde oyulma derinliği hesabında bu ifadelerin herhangi biri kullanılabilir.

$$S/D = cU_{R\beta}^{a}$$

(5.17)

Sıra	Dalga	Donklam	S/D		D	Denklem
No	koşulu	Denklem	с	d	ĸ	No
1	- Düzensiz	$H_{1/10}$ - T_p	0.558	-0.318	-0.93	5.18
2		H _s -T _p	0.631	-0.325	-0.93	5.19
3		H _{rms} -T _p	0.720	-0.327	-0.93	5.20
4		$H_{1/10}$ - T_m	1.105	-0.370	-0.90	5.21
5		H _s -T _m	1.265	-0.376	-0.90	5.22
6		H_{rms} - T_m	1.468	-0.379	-0.90	5.23
7	Düzenli	H_i - T_i	1.476	-0.404	-0.92	5.24
	Düzenli					
8	ve	H_s-T_m	1.414	-0.395	-0.93	5.25
	Düzensiz					

Çizelge 5.10 Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı karakteristik dalga parametrelerinin kombinasyonu ile elde edilen $U_{R\beta}$ sayıları ile S/D değişiminin korelasyon katsayıları (R)

Seçilen su derinliği, boru çapı, dalga yüksekliği, dalga periyodu, dalga boyu parametreleri kullanılarak düzenli dalgalar için elde edilen Beta Ursell ifadesinden elde edilen rölatif oyulma derinliğine karşı düzensiz dalga şartlarındaki firtına için farklı karakteristik dalga parametrelerinden elde edilen Beta Ursell ifadesi ile elde edilen rölatif oyulma derinliği değişimleri değerlendirilmiştir. Şekil 5.53'de düzenli dalga ifadesi denklem 5.24'den elde edilen S/D ile H_s-T_m kullanılarak düzensiz dalga ifadesi denklem 5.22'den elde edilen S/D rölatif oyulma derinliğinin değişimi görülmektedir. Şekilden H_s-T_m parametreleri ile ifade edilen düzensiz dalga firtınası etkisindeki oyulma derinliği ile bunlara eşdeğer düzenli dalga firtınası etkisindeki oyulmaların gerek küçük gerekse büyük oyulma derinlikleri için son derece uyumlu oldukları görülmektedir.



Şekil 5.53 Düzensiz denklem ile Düzenli denklem değişimi (H_s)

BÖLÜM 6

YAPAY SİNİR AĞLARI

Esnek programlamayı oluşturan yapay sinir ağları, bulanık mantık ve evrim algoritmalarından bir veya birkaçının birlikte kullanılması ile oluşan yöntemlerin uygulanması son yıllarda gittikçe önem kazanmaktadır. Bu yöntemlerden evrim algoritmaları doğal genetiği, yapay sinir ağları insanın sinir ve öğrenme yapısını, bulanık mantık ise insanın düşünme biçimini modelleyerek çözüm aramaktadır.

YSA, biyolojik sinir ağlarından esinlenerek modellenmiş olup, onlardan çok daha basit bir yapıya sahiptir. O nedenle de anlaşılması daha kolaydır. Yapay Sinir Ağları, basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şeklini simule etmek için tasarlanan programlardır.

Biyolojik sinir sistemi, merkezinde sürekli olarak bilgiyi alan, yorumlayan ve uygun bir karar üreten beynin (merkezi sinir ağı) bulunduğu üç katmanlı bir sistem olarak açıklanmaktadır. Alıcı sinirler (receptor) organizma içerisinden ya da dış ortamlardan algıladıkları uyarıları, beyine bilgi ileten elektriksel sinyallere dönüştürmektedir. Tepki sinirleri (effector) ise, beyinin ürettiği elektriksel darbeleri organizma çıktısı olarak uygun tepkilere dönüştürmektedir (Fırat vd. [184]). Şekil 6.1'de bir sinir sisteminin blok gösterimi verilmektedir.



Şekil 6.1 Biyolojik sinir sisteminin blok gösterimi (Fırat vd. [184])

Merkezi sinir ağında bilgiler, alıcı ve tepki sinirleri arasında ileri ve geri besleme yönünde değerlendirilerek uygun tepkiler üretmektedir. Bu yönüyle biyolojik sinir sistemi, kapalı çevrim denetim sisteminin karakteristiklerini taşımaktadır. Merkezi sinir sisteminin temel işlem elemanı, sinir hücresidir (nöron) ve insan beyninde yaklaşık 15 milyar sinir hücresi olduğu tahmin edilmektedir. Sinir hücresi, hücre gövdesi, dendritler ve aksonlar olmak üzere üç bileşenden meydana gelmektedir. Dendritler, diğer hücrelerden aldıkları bilgileri hücre gövdesine bir ağaç yapısı şeklinde ince yollarla iletmektedir. Aksonlar ise elektriksel darbeler şeklindeki bilgiyi hücreden dışarı taşıyan daha uzun bir yoldur. Aksonların bitimi, ince yollara ayrılabilmekte ve bu yollar, diğer hücreler için dendritleri oluşturmaktadır (Fırat vd. [184]). Şekil 6.2'de görüldüğü gibi akson-dentrit bağlantı elemanı sinaps olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 6.2 Sinir hücresi (Takçı [185])

İnsan beyninin, 15 milyar sinir hücresinden ve 60 trilyon sinaps bağlantısından oluştuğu düşünülürse son derece karmaşık ve etkin bir yapı olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan bir sinir hücresinin tepki hızı, günümüz bilgisayarlarına göre oldukça yavaş olmakla birlikte duyusal bilgileri son derece hızlı değerlendirebilmektedir. Bu nedenle insan beyni, öğrenme, birleştirme, uyarlama ve genelleştirme yeteneği nedeniyle son derece karmaşık, doğrusal olmayan ve paralel dağılmış bir bilgi işleme sistemi olarak tanımlanmaktadır (Tavşanoğlu [186]).

Beynin üstün özellikleri, bilim adamlarını üzerinde çalışmaya zorlamış ve beynin nörofiziksel yapısından esinlenerek matematiksel modeli çıkarılmaya çalışılmıştır. Beynin bütün davranışlarını tam olarak modelleyebilmek için fiziksel bileşenlerinin doğru olarak modellenmesi gerektiği düşüncesi ile çeşitli yapay hücre ve ağ modelleri geliştirilmiştir. Böylece Yapay Sinir Ağları denen yeni ve günümüz bilgisayarlarının algoritmik hesaplama yönteminden farklı bir bilim alanı ortaya çıkmıştır. Yapay sinir ağları, yapısı, bilgi işleme yöntemindeki farklılık ve uygulama alanları nedeniyle çeşitli bilim dallarının da kapsam alanına girmektedir (Tavşanoğlu [186]).

Genel anlamda YSA, beynin bir işlevi yerine getirme yöntemini modellemek için tasarlanan bir sistem olarak tanımlanmaktadır. YSA, yapay sinir hücrelerinin birbirleri

ile çeşitli şekillerde bağlanmasından oluşmakta ve genellikle katmanlar şeklinde düzenlenmektedir. Donanım olarak elektronik devrelerle ya da bilgisayarlarda yazılım olarak gerçeklenmektedir. Beynin bilgi işleme yöntemine uygun olarak YSA, bir öğrenme sürecinden sonra bilgiyi toplama, hücreler arasındaki bağlantı ağırlıkları ile bu bilgiyi saklama ve genelleme yeteneğine sahip paralel dağılmış bir işlemcidir. Öğrenme süreci, arzu edilen amaca ulaşmak için YSA ağırlıklarının yenilenmesini sağlayan öğrenme algoritmalarını içermektedir (Tavşanoğlu [186]).

Biyolojik Sinir Sistemi ile Yapay Sinir Sistemi karşılaştırılması Çizelge 6.1'de gösterilmektedir (Uğur ve Kıncı [187]).

Biyolojik Sinir Sitemi	Yapay Sinir Sitemi
Nöron	İşlemci Eleman
Dendrit	Girdiler
Hücre Gövdesi	Transfer Fonksiyonu
Aksonlar	Yapay Nöron Çıkışı
Sinapslar	Ağırlıklar

Çizelge 6.1 BSS ve YSS karşılaştırılması

6.1 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri

YSA'lar genel olarak canlı beyninin yapısını gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Aşağıda belirtilen genel özellikleri taşımaktadırlar (Öztemel [188]).

- Programları çalışma stili bilinen programlama yöntemlerine benzememekte,
- Makine öğrenmesi gerçekleştirme,
- Lineer olmayan özelliğe sahip olmakta,
- Bilgi, ağın bağlantılarının değerleri ile ölçülmekte ve bağlantılarda saklanmakta,
- Örnekleri kullanarak öğrenmekte,
- Görülmemiş örnekler hakkında bilgi üretebilmekte,
- Kendi kendini organize etme ve öğrenebilme yeteneğine sahip olmakta,
- Eksik bilgi ile çalışabilmekte,
- Hata toleransına sahip olmakta,
- Hata toleransına sahip olmaları dereceli bozulma gösterebilmelerini sağlamakta,

- Ani bozulma göstermemekte,
- Belirsiz ve tam olmayan bilgileri işleyebilmekte,
- Dağıtık bilgiye sahiptirler. Ağın bilgisi bağlantılara yayılmakta,
- Sadece nümerik bilgiler ile çalışabilmekte,
- Klasik yöntemlerle çözülmesi zor olan problemleri çözmekte,
- Doğrusal değildirler bu nedenle de hemen hemen her problemin çözümü için kullanılabilirler.

Bunlara ilave olarak YSA'lar öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, tahmin, özellik belirleme, optimizasyon özelliklerine de sahiptirler. Bu özelliklerle birlikte literatürde 100'den fazla yapay sinir ağı modeli bulunmaktadır.

6.2 Yapay Sinir Ağlarının Avantajları

Bilindiği gibi YSA modelleri biyolojik sinir ağlarının çalışmasından esinlenerek ortaya çıkarılmıştır. Canlılarda bulunan sinir sisteminin modellenmesi sayesinde yapay sinir ağları biyolojik sinir sisteminin üstünlüklerine sahip olmuştur (Kakıcı [189]). Bu avantajlar (Elmas [190]):

- Yapay sinir ağları özellikle doğrusal olmayan sistemlerde tahmin yapma açısından, istatistik hesaplamalara göre daha kolay ve daha doğru sonuç vermesi nedeniyle çok sık kullanılan bir yöntemdir. Yapay sinir ağlarının temel elemanlarından olan yapay sinir hücrelerinin (nöron) doğrusal sonuçlar vermemesi özelliği ağa da yansımaktadır. Doğrusal olmama özelliği YSA'ların karmaşık problemlerin çözümünde sıkça kullanılmalarına neden olmaktadır.
- Klasik problem çözme algoritmalarının aksine YSA paralel çalışmaya uygun bir yapıya sahiptir. Bu özelliği sayesinde çok daha hızlı problem çözebilme yetenekleri vardır.
- Bilgisayar üzerinde çalışan bir elemanın zarar görüp devre dışı kalması o elemanın içinde bulunduğu sistemin çalışmamasına neden olmaktadır. Ancak paralel çalışabilme özelliği ve yapay sinir hücrelerinin bağımsız çalışabilme yeteneğinden dolayı yapay sinir ağında herhangi bir elaman zarar gördüğünde ağın geri kalanı sorunsuz bir şekilde çalışmaya devam etmektedir. Başlangıçta

yanlış sonuçlar verse de daha sonra yeni yapısını öğrenerek eski performansında çalışmaya devam etmektedir.

- Klasik algoritmaların çoğu verilen formüllerin hesaplanması ile aynı girdiler için daima aynı çıktıları üretmektedir. Lineer olan bu algoritmaların aksine yapay sinir ağları sayesinde programlar öğrenme yeteneği de kazanmaktadır.
- YSA üzerinde çalıştığı probleme göre eğitildikten sonra eğitim sırasında karşılaşmadığı durumlar içinde yanıt vermektedir. Örneğin bir satranç taşının görüntüsünün tanıtılmasından sonra bu taşın görüntüsünü içeren ancak gürültülü bir görüntü verildiğinde bile YSA bu taşı tanıyabilmektedir.
- Bir problemi çözmek için eğitilen yapay sinir ağı herhangi bir başka problemde kolaylıkla kullanılabilmektedir. Bunun için gereken tek şey yeni problemin girdi ve çıktılarıyla ağın tekrar eğitilmesidir.
- Yapay sinir ağları paralel yapısı nedeniyle hızlı bir şekilde çalışmakta ve problemi çözmektedir.
- Kural tabanı kullanımı gerektirmezler.
- Matematiksel olarak modellenmesi zor olan yada mümkün olmayan problemleri rahatlıkla çözümleyebilirler.
- Yapay sinir ağları hem pratik hem de ekonomiktir.

6.3 Yapay Sinir Ağlarının Dezavantajları

Yapay sinir ağlarının bir takım dezavantajları aşağıda sıralanmıştır (Elmas [190]);

- Uygun ağ yapısının belirlenmesinde belli bir kural yoktur.
- Ağın parametre değerlerinin belirlenmesinde belli bir kural yoktur.
- Öğrenilecek problemin ağa gösterimi önemli bir problemdir.
- Ağın eğitiminin ne zaman bitirilmesi gerektiğine ilişkin belli bir yöntem yoktur.
- Yapay sinir ağları başlangıç koşullarından bağımsız olarak çok kolay dahi olsa herhangi bir problemi çözemezler. Karar verme anında sadece daha önce öğrendiği koşullara göre sonuç üretmektedir. Eğitim sırasında verilen örnekler ağın sonraki problemleri çözmesinde de etkilidir.

- Bazen eğitim gerçekleşmesi uzun zaman alabilir.
- Bulunan çözümün en uygun çözüm olduğunu söylemek mümkün değildir. Sadece iyi çözümlerden biri olduğu söylenebilir. Oysa geleneksel yöntemler en uygun çözümler üretebilir.

6.4 Yapay Sinir Ağlarının Topolojisi

Basit bir şekilde YSA yapısı girdi, gizli (ara) ve çıktı tabakalarındaki sinir hücreleri ile bunlar arasındaki bağlantılardan ve sabit katkısı olan bir hücreden meydana gelmektedir. Gizli tabaka hücrelerinin iki görevi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi girdi tabakası hücrelerinin her birinden gelen ağırlıklı kısımların toplanması yani hücrenin solunda bir toplayıcı işlemcisi ve daha sonra bu toplanan bilginin eğriselleştirilme (doğrusallığın bozulması) işlemcisi (aktivasyon fonksiyonu) olarak aynı hücrenin sağ tarafında bir başka işlemcinin bulunmasıdır. Bu işlemcinin görevi toplayıcı işlemcisinden aldığı doğrusal bilgileri eğriselleştirerek gizli hücrenin çıkışına bırakmaktır. Daha sonra bu bilgiler gizli tabaka ile çıktı tabaka arasındaki ağırlıklar vasıtası ile çıktı hücreleri arasında paylaştırılmaktadır. O halde her bir çıktı hücresinde sadece kendisine gelen sinyalleri algılayarak toplayacak bir doğrusal işlemcinin bulunması gerekmektedir (Şen [191]). Bu durumda bir YSA girdi tabakasındaki hücrelerde hiç işlemci bulunmazken gizli tabaka hücrelerinde toplayıcı işlemciler bulunmaktadır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 YSA topolojisi (Uğur ve Kıncı [187])

Bir YSA'ya girdi verileri girildiğinde ilk eğitmeden sonra 'en dik eğim azalımı' (steepest descend) yöntemi ile ağırlıkların yenilenmesi (artırılması veya azaltılması), çıktı verileri ile bunlara karşı gelmesi beklenen değerler arasındaki hata kareleri ortalamasının (HKO) en küçüklenmesi ile yapılmaktadır. HKO istenilen bir seviyeden daha küçük değilse geri besleme yöntemi ile YSA şebekesindeki ağırlıklar yenilenmektedir. HKO tatmin edici bir seviyeye inene kadar geri besleme ağ bağlantı değerlerinin yenilenmesine devam edilmektedir. YSA hesaplamaları arasında bir ileriye doğru girdileri çıktılar haline dönüştürmek, diğeri de hataların azaltılması için ağırlıkları geriye doğru yenilemek olmak üzere iki aşama bulunmaktadır (Şen [191]).

6.5 Yapay Sinir Ağlarının Temel Elemanları

Yapay sinir ağlarının temel elemanları girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılardan meydana gelmektedir (Uğur ve Kıncı [187]).

6.5.1 Girdiler

Yapay sinir ağlarına dışarıdan verilen bilgilerdir.

6.5.2 Ağırlıklar

Hücreler arasındaki bağlantıların sayısal değeridir. Bir hücrenin üzerine gelen bilginin değerini ve hücre üzerindeki etkisini göstermektedir. Başlangıç ağırlık değerleri küçük rastgele sayı olarak atanmaktadır (-0.05, +0.05 gibi).

6.5.3 Toplama Fonksiyonu

Hücreye gelen net girdinin hesaplanmasını sağlayan fonksiyondur. En yaygın kullanımı her girdi değerinin kendi ağırlığıyla çarpılarak toplanması şeklindedir.

6.5.4 Aktivasyon (Transfer) Fonksiyonu

YSA mimarisi belli olduktan sonra tabakalar arasındaki bağlantı ve sabit girdi değerleri ile gizli tabakadaki hücrelere konulacak işlemci şekillerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu tespit ile YSA kendisine verilecek girdileri algılayarak ileriye doğru işlemler yapabilecektir. Çok tabakalı YSA'larda gizli tabaka hücrelerinde kullanılacak bazı işlemci fonksiyonları aşağıda tanımlanacaktır. Aksi gerekmedikçe gizli tabaka

hücrelerinde hep aynı işlemciler kullanılması gerekmektedir. Aynı zamanda aktivasyon fonksiyonlarına işlemci veya transfer fonksiyonları da denmektedir. Bu fonksiyon hücreye gelen net girdinin işlenmesiyle hücrenin bu girdiye karşılık üretileceği çıktıyı belirlemesini sağlamaktır. En yaygın olarak sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır. Gizli tabakada kullanılabilecek bazı aktivasyon fonksiyonları aşağıda verilmiştir (Takçı [185]).

6.5.4.1 Basamak (Step, Threshold) aktivasyon fonksiyonu

Literatürde adım, eşik fonksiyonları olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 6.4 Basamak işlemcisi

Tüm girdi değerlerine karşılık sadece iki çeşit çıktı vermektedir. Burada c eşik dir.

6.5.4.2 Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu

- S şekilli,
- Sürekli ve her bir değer diğerinden farklı,
- Bazı noktalarda (net=c) dönüşlü olarak simetrik,
- Asimptotik olarak doygun noktalara yaklaşan, $\lim_{n \to -\infty} f(net) = a$, $\lim_{n \to \infty} f(net) = b$,
- Türevi alınabilen,
- Çıkış değerleri 0 ile 1 arasında değişen,
- Doğrusal olmayışı dolayısıyla yapay sinir ağı uygulamalarında en sık kullanılan fonksiyondur.



Şekil 6.5 Sigmoid işlemcisi

6.5.4.3 Rampa aktivasyon fonksiyonu

Doğrusal ve eşik işlemcilerinin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan bir fonksiyondur.





6.5.4.4 Doğrusal (Identity) Aktivasyon Fonksiyonu

Literatürde doğrusal işlemci olarak da adlandırılmaktadır. f(net)=net'dir.

6.5.4.5 Sabit (Constant) Aktivasyon Fonksiyonu

f(net)=c'dir.

6.5.4.6 Gauss Aktivasyon Fonksiyonu

- Çan şekilli (radial basis),
- Sürekli,
- |net| büyük olduğunda f(net) asimptotik olarak sıfır veya bazı sabit değerlere yakınsar,
- Tekil maksimum (net=µ),
- Normal dağılımda; $\mu=0$ ve $\sigma=1$ alınır,
- Türevi alınabilen bir fonksiyondur.



Şekil 6.7 Gauss fonksiyonu

6.5.4.7 Hiperbolik Aktivasyon Fonksiyonu

Tanjant hiperbolik işlemci fonksiyonunun hiç parametresi bulunmamakta ve türevi kolayca alınabilmektedir. Ancak parametresi olmadığından sigmoid işlemcisi kadar elastik değildir. Çıkış değerleri -1 ila +1 arasında değişmektedir.

Sigmoid, Gauss, Hiperbolik aktivasyon fonksiyonları sürekli olduklarından türev alınması gereken analitik çalışmalarda kullanılmaktadırlar. Hataların geri yayılması işleminde en küçük kareler ilkesine göre gerekli uygulama denklemlerinin geliştirilmesi için bunlardan bir tanesi kullanılabilir.

Girişleri ve ağırlıkları verilmiş olan bir yapay sinir hücresinin, yukarıda bahsedilen aktivasyon fonksiyonlarından bir tanesi kullanılarak Şekil 6.8'de çalışma prensibi gösterilmiştir (Öztemel [188], Elmas [190]).





Şekil 6.8 Bir Yapay Sinir Ağı hücresinin çalışma örneği

Hücreye gelen net girdi, ağırlıklarla çarpılarak hesaplanır.

Net Girdi= $0.7 \times 0.2 + 0.4 \times (-0.2) + 0.3 \times 0.1 = 0.09$ dur. Hücrenin sigmoid tipli aktivasyon fonksiyonuna göre çıkışı y=f(net) ise;

 $y=f(net)=(1/1+e^{-0.09})=0.52$ dir. Verilen girdilere karşılık yukarıdaki işlemler sonucunda y çıkış değeri bulunur.

6.6 Tekli Doğrusal Algılayıcı

YSA'ların ilk tek sinirli, basit mimarili ve doğrusal küme ayırımları yapabilen türü olan tekli doğrusal algılayıcı, TDA, literatürde "perceptron" olarak da adlandırılmaktadır. TDA'nın en büyük mahzuru sadece doğrusal çok boyutlu düzlem ile ayrılabilen sorunlara çözüm üretirken eğrisel (doğrusal olmayan) sorunlara çözüm üretememesidir (veya'lama/XOR problemi).

6.7 XOR Problemi

TDA'lar doğrusal olan olayları çözebilmelerine karşın doğrusal olmayan olayları çözememektedirler. Bu nedenle XOR problemini açıklamak gerekmektedir. Perceptronlar XOR problemi gibi doğrusal olarak sınıflandırılamayan problemleri çözmede başarısız olmaktadır. Başka bir deyişle çıktıların arasına bir doğru veya doğrular çizerek onları iki veya daha fazla sınıfa ayırmak mümkün değildir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9 XOR problemi (ikinci girdi kümesi için hatalı)

XOR problemini çözmek için yapılan çalışmalar sonucu çok katmanlı algılayıcı modeli geliştirilmiştir. Rumelhart ve arkadaşları tarafından geliştirilen bu modele hata yayma modeli veya geriye yayılım modeli (back propagation model) de denilmektedir.

Bu özellikle sınıflandırma, tanıma ve genelleme yapmayı gerektiren problemler için çok önemli bir çözüm aracıdır. Bu model delta öğrenme kuralı denilen bir öğrenme yöntemini kullanmaktadır. Bu kural aslında ADALINE ve basit algılayıcı modeli öğrenme kurallarının geliştirilmiş bir şeklidir.

6.8 Çok Tabakalı Yapay Sinir Ağları

TDA'lardan en önemli farkı giriş ve çıkış arasında en azından saklı veya ara/gizli denilen bir tane daha tabakanın bulunmasıdır. Bu nedenle bunlara çok tabakalı YSA'lar veya çok tabakalı algılayıcılar denmektedir. Böyle bir yapılanmada genel olarak saklı tabaka hücrelerinin hepsinde aynı işlemci kullanılmaktadır. Genelde kullanılan işlemci sigmoid şeklindedir. ÇTA için en popüler ağ yapısı Back Propagation (geri yayılım) ağıdır. Temel amacı ağın beklenilen çıktısı ile ürettiği çıktı arasındaki hatayı en aza indirmektir (Şen [191]).

Giriş ve çıkış tabakaları arasında en az bir ara tabakaya sahip ileri beslemeli bir ağdır. Ara/gizli/saklı tabakalar, giriş ve çıkış tabakalarındaki sinir hücreleri ile doğrudan bağlantısı olan gizli hücre adı verilen sinir hücrelerinden meydana gelmektedir. Gizli hücrelerin meydana getirdiği bu tabakalara gizli tabaka adı verilmektedir. Çok tabakalı YSA'nın yeteneği tabakalı bir yapıya sahip olması ve ara tabaka sinir hücre çıkışlarında doğrusal olmayan işlemcilerin bulunmasıdır. Girdi tabakası hücrelerinin saklı tabaka hücrelerine ve saklı tabaka hücrelerinin de çıktı tabakası hücrelerine birer ağırlık katsayısı takımları ile bağlanmasıyla meydana gelen çok tabakalı YSA yapısı Şekil 6.10'da görülmektedir. Gizli tabakalar sadece giriş tabakası ile çıkış tabakası arasında bilgi taşımaktadır. Şekilde her ne kadar gizli tabakadaki sinir hücreleri sadece bir sonraki gizli tabakadaki sinir hücrelerine bilgi aktarıyorsa da, tabakalar arası bilgi aktarımı da mümkündür. Ara tabakaların ve bu tabakalardaki hücre sayısının artması hesaplama karmaşıklığını ve süresini artırmasına rağmen yapay sinir ağlarının daha karmaşık problemlerin çözümünde de kullanılabilmesini sağlamaktadır (Şen [191]).



Şekil 6.10 YSA topolojisi (Şen [191])

İki tabakalı YSA bir tek giriş ve çıkış tabakasından meydana gelmektedir. Eğriselliği temin edecek gizli tabakanın bulunmaması nedeniyle bu mimari yapı daha doğrusal tasvirler için kullanılmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalardan varılan genel kanaat iki tabakalı YSA'nın doğrusal ve çok tabakalı YSA'nın da eğrisel (doğrusal olmayan) tasvirlerde iyi sonuçlar vereceği yönündedir.
6.9 Ağ tipleri

Yapay sinir ağları içerdiği hücrelerin birbirine bağlanış şekline göre ileri ve geri beslemeli olarak ikiye ayrılmaktadır.

6.9.1 İleri Hesaplamalar (İleri besleme)

İlk önce veriler, giriş tabakasına aktarılmakta sonra doğrusal bir işlemci yardımıyla bağlantı ağırlıkları toplanarak gizli tabaka hücresine iletilmektedir. Bu tabakadaki aktivasyon fonksiyonu yardımıyla eğrisel (doğrusal olmayan) dönüşümler yapılmaktadır. Bu arada varsa sabit değerlerde işleme ilave edilmektedir. Gizli tabaka hücresi çıkışındaki veriler yine atanmış bağlantı ağırlıkları yardımıyla çıkış tabakasına iletilmektedirler. Böylece bir çıkış hücresinde yapılan toplama sonrasında çıkış değerleri hesaplanır.

6.9.2 Geri Hesaplamalar (Geri besleme)

Çıkış değerlerinin önceden beklenen değerlerden farklı olması durumunda YSA'nın bağlantı ağırlıklarını yenilemesi gerekmektedir. YSA hesaplamasında en fazla zaman alan kısım ağırlıkların yenilenmesi işlemidir. Bu işlem için her çıktı hücresinde ortaya çıkan hataların karelerinin aritmetik ortalaması (HKO) alınarak bir hata değeri elde edilmektedir. Bu hatanın tüm bağlantılara giriş verileri büyüklükleri ile orantılı şekilde dağıtılması gerekmektedir. Düğüm fonksiyonu (türevi alına bilen) her hangi bir fonksiyon olabilir fakat en sık tercih edileni sigmoid fonksiyonudur. Öğrenim kuralı genişletilmiş delta kuralıdır. Ağırlık güncelleme kuralı ise eğim düşümü (gradient descent) kuralıdır.

BÖLÜM 7

OYULMANIN YAPAY SİNİR AĞALARI İLE MODELENMESİ

Deniz altı boru hatları altında meydana gelen yerel oyulmanın YSA yöntemi ile modellenebilmesi için laboratuar şartlarında gerçekleştirilmiş olan Bölüm 5'de değerlendirilen düzensiz dalga deneysel verileri ve Çevik [104]'in düzenli dalga verileri kullanılmıştır. Bu veriler ile modelleme işlemi üç aşamada gerçekleştirilmiş ve oyulma derinliğini en yüksek korelasyon katsayısında ifade edebilen model veya modeller araştırılmıştır. İlk aşamada düzenli dalga şartları ikinci aşamada ise düzensiz dalga şartları birlikte değerlendirilerek modeller kurulmuştur (Şekil 7.1).



Şekil 7.1 Modelleme akış şeması

İlk aşamada düzenli dalga deneyinden elde edilen 112 adet veri (Çevik ve Yüksel [114]), ikinci aşamada düzensiz dalga deneyinden elde edilen 94 adet veri kullanılarak yerel oyulma her iki şart için ayrı ayrı modellenmiştir. Üçüncü aşamada ise hem düzenli hem de düzensiz dalga şartlarının birlikte kullanılması halinde 206 adet veri ile boru hattı altındaki oyulma için modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tüm modeller tek gizli katmanlı İleri Beslemeli Geri Yayılım, İBGY, algoritması ile üretilmiştir. Modelin eğitilmesi için oldukça hızlı sonuca ulaşan Levenberg-Marquard, LM, Geri Besleme yöntemi kullanılmıştır (Levenberg [192], Marquardt [193]). Modellerde kullanılmasına karar verilen fonksiyonlar Çizelge 7.1'de görülmektedir.

Eğitim Şeması	Levenberg-Marquard geri beslemesi (trainlm)
Aktivasyon Fonksiyonu (Gizli katman)	Tanjant-Sigmoid
Aktivasyon Fonksiyonu (Çıkış katmanı)	Lineer
Performans Fonksiyonu	Ortalama kare hata (OKH)

Çizelge 7.1 Seçilen model fonksiyonları

Yapay sinir ağları modelinin kurulumunda İBGY algoritması, yaygınlığı, hızı ve kullanım kolaylığı açısından tercih edilmiştir. Bu yöntemle modelin çeşitli girdi verilerine ve girdi verilerinin çeşitli kombinasyonlarına karşı hassasiyetinin incelenmesi ve gerek derin su gerekse yerel dalga parametreleri kullanılarak en uygun veri seti kombinasyonuna karar verilmesi amaçlanmıştır. Yapay sinir ağları modelinin girdi seçiminde en önemli nokta tüm veri setinde en küçük hatayı ve en yüksek korelasyon katsayısını elde etmektir (Aydoğan [194]).

Her modelden elde edilen kontrol veri setleri için korelasyon katsayıları R, ortalama kare hatalar OKH, saçılım indeksi SI, ayrı ayrı elde edilmiştir. Ayrıca en iyi modeller için ortalama hatalarda artı veya eksi yönde tahmin sapması OH dikkate alınmıştır.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$
(1)

$$OKH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - x_i)^2$$
(2)

$$SI = \frac{OKHK}{y}$$
(3)

$$OH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)$$
(4)

Burada, x_i ve y_i sırasıyla tahmin edilen ve ölçülen değerleri ve n ise ölçüm değerlerinin sayısını göstermektedir. \overline{x} ve \overline{y} ise tahmin edilen ve ölçülen parametrelerin ortalama değerlerini vermektedir. OKHK ise ortalama kare hataların karekökünü ifade etmektedir (OKHK = \sqrt{OKH}).

Modellerde kullanılacak gizli katmandaki sinir hücre sayısını belirlemek için bir, iki, üç ve dört hücreli modeller üretilerek en yüksek kontrol korelasyon katsayına ve en düşük

ortalama kare hataya (OKH) sahip sinir hücresi dikkate alınmıştır. Modellerde kullanılan Yapay Sinir Ağı topolojisi şematik olarak Şekil 7.2'de gösterilmiştir.



Şekil 7.2 YSA topolojisinin şematik gösterimi

Bu bölümdeki modelleme işlemi üç aşamada yapılmıştır. Sadece düzenli dalga etkisinde, sadece düzensiz dalga etkisinde ve düzenli/düzensiz dalga etkisinde oyulma modelleri kurulmuştur. Düzenli dalga etkisinde kurulan oyulma modelleri "R", düzensiz dalga etkisinde "IR" ve düzenli/düzensiz dalgaların birlikte etkisindeki oyulma modelleri "RIR" olarak adlandırılmışlardır. R'den sonraki ilk indis modeldeki girdi sayısını ikinci indis ise modelin sıra numarasını ifade etmektedir.

7.1 Düzenli Dalga Modelleri

Düzenli dalga durumunda (Çevik ve Yüksel [114])'in yapmış olduğu deneylerden elde edilen ölçüm değerleri girdi verileri olarak kullanılmıştır. Düzlem taban ve 1/10 şev eğimine ait toplam 112 veri setinin %55'i eğitim (62 veri), %35'i kontrol (39 veri) ve %10'u test (11 veri) veri setleri rastgele olarak ayrılmıştır. Tüm modellerde aynı eğitim, kontrol ve test veri setleri kullanılmıştır.

Düzenli dalga etkisinde denizaltı boru hatları altındaki oyulmanın tahmini S, için kurulan modellerde derin su dalga parametreleri olarak; dalga yüksekliği H₀, dalga boyu L₀, yerel dalga parametreleri olarak; yerel dalga yüksekliği H_i, yerel dalga boyu L_i, yerel su derinliği d_i, ile dalga periyodu T ve boru çapı D verileri kullanılmıştır. Burada derin su dalga parametreleri yerel ölçülmüş dalga parametrelerinden elde edilmiştir. Tasarlanan model ve tüm modellerde kullanılan farklı girdiler Şekil 7.3'de görülmektedir. Tüm modellerde girdi ve çıktı veri setleri cm olarak ifade edilmiştir.

Gizli tabakadaki en uygun sinir hücre sayısını elde etmek için tek girdili veri setleri kullanılarak Çizelge 7.2'de verilen modeller geliştirilmiştir. Çizelge 7.2'de en yüksek kontrol korelasyon katsayısı ve minimum ortalama kare hata değerlerinin gizli katman

tabakasında dört adet sinir hücresi olması halinde meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle bundan sonraki düzenli dalgalara ait tüm modellerde gizli katmanda dörder adet sinir hücresi kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 7.3 Model alanı ve oyulma üzerinde etkili parametreler

Darametra	Model	Cirdi	1 Hücre		2 Hücre		3 Hücre		4 Hücre	
Farametre	No	Gilui	R	OKH	R	OKH	R	OKH	R	OKH
Derin su dalga	R.1.1	H ₀	0.57	0.387	0.58	0.361	0.61	0.293	0.80	0.221
parametreleri	R.1.2	L ₀	0.77	0.216	0.81	0.197	0.83	0.163	0.90	0.102
	R.1.3	H _i	0.52	0.383	0.59	0.372	0.60	0.372	0.63	0.255
Yerel dalga	R.1.4	L	0.74	0.229	0.82	0.229	0.84	0.138	0.91	0.117
parametreleri	R.1.5	di	0.17	0.493	0.19	0.477	0.21	0.462	0.23	0.410
	R.1.6	Т	0.75	0.268	0.81	0.222	0.81	0.181	0.86	0.113
Diğer parametreler	R.1.7	D	0.04	0.558	0.05	0.522	0.09	0.512	0.13	0.468

Çizelge 7.2 Sinir hücre sayısının belirlenmesi

Düzenli dalga koşullarında deniz altı boru hatları altındaki oyulmayı S, belirlemek için kurulan modellerde oyulmayı minimum sayıda parametre kullanarak en yüksek korelasyon katsayısı, en düşük ortalama kare hata (OKH) ve en düşük saçılım indeksi SI, ile elde etmek için ilk önce tek girdili modellerle başlanmış ve daha sonra girdi sayısı artırılarak iki, üç, dört, beş girdiye kadar çeşitli modeller kurulmuştur (Çizelge 7.3, Çizelge 7.4, Çizelge 7.5, Çizelge 7.6).

Her bir değişkenin ayrı ayrı ifade edildiği tek girdili veri setleri ile elde edilen (dalga yüksekliği, dalga boyu, dalga periyodu, su derinliği ve boru çapı) modeller Çizelge 7.3'de görülmektedir. Farklı parametre etkilerinin kolayca irdelenebilmesi için bu parametreler derin su dalga parametreleri (H₀, L₀, T), yerel dalga parametreleri (Hi, Li, T) ve diğer parametreler (D) olarak gruplandırılmıştır. Çizelge 7.3'de korelasyon katsayıları 0.13≤R≤0.91 aralığında değişen yedi adet tek girdili modeller görülmektedir. Dalga parametrelerinin korelasyon katsayılarının büyük olduğu ancak diğerlerinin de bir korelasyon katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Bu da parametrelerin her birinin

oyulma üzerinde etkili olduklarını ancak tek başlarına yeterli olmadıkları sonucunu vermektedir.

Parametreler	Model No	Girdi	R	ОКН	SI %
Derin su dalga	R.1.1	H_0	0.80	0.221	27.14
parametreleri	R.1.2	L ₀	0.90	0.102	18.44
	R.1.3	H _i	0.63	0.255	29.16
Yerel parametreler	R.1.4	Li	0.91	0.117	19.75
dalga parametreleri	R.1.5	di	0.23	0.410	36.97
	R.1.6	Т	0.86	0.113	19.41
Diğer parametreler	R.1.7	D	0.13	0.468	39.50

Çizelge 7.3 Tek girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri

En yüksek korelasyon katsayısına sahip tek girdili model sonuçları dikkate alınarak türetilen dokuz adet farklı iki girdili model kombinasyonları Çizelge 7.4'de verilmiştir. Farklı parametre etkilerinin kolayca irdelenebilmesi için bu parametreler derin su ve yerel dalga parametreleri olarak gruplandırılmıştır. Ayrıca modellerdeki girdi sayısı arttıkça korelasyon katsayılarının arttığı ve ortalama kare hataların azaldığı çizelgeden görülmektedir. Gerek derin su dalga parametrelerinin gerekse yerel dalga parametrelerin kullanılması durumunda su derinliğinin, d, oyulma üzerinde boru çapından, D, daha etkili olduğu da görülmektedir. Tüm modellerdeki korelasyon katsayıları 0.78≤R≤0.94 aralığında değişmektedir.

Parametreler	Model No	Girdi	R	OKH	SI %
	R.2.1	H ₀ -T	0.93	0.079	16.23
Derin su dalga	R.2.2	H_0-L_0	0.91	0.091	17.42
	R.2.3	L ₀ -T	0.88	0.098	18.07
parametrelen	R.2.4	H ₀ -d	0.84	0.194	25.43
	R.2.5	H ₀ -D	0.78	0.218	26.96
	R.2.6	H _i -T	0.94	0.079	16.23
Yerel dalga	R.2.7	H _i -L _i	0.92	0.074	15.71
parametreleri	R.2.8	H _i -d	0.83	0.183	24.70
	R.2.9	H _i -D	0.78	0.232	27.81

Çizelge 7.4 İki girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri

En yüksek korelasyon katsayısına sahip iki girdili modeller kullanılarak elde edilen yedi adet üç girdili modeller Çizelge 7.5'de görülmektedir. Derin su ve yerel dalga parametreleri ile kurulan modeller yüksek korelasyon katsayısına sahiptir. Modeldeki girdi sayısı arttıkça korelasyon katsayıları artmakta ve ortalama kare hatalar ise azalmaktadır. Tüm modellerdeki korelasyon katsayıları 0.89≤R≤0.95 aralığında değişmektedir.

Parametreler	Model No	Girdi	R	OKH	SI %
Derin su dalga parametreleri	R.3.1	H_0-L_0-d	0.93	0.079	16.23
	R.3.2	H ₀ - L ₀ -T	0.92	0.089	17.22
	R.3.3	H_0-L_0-D	0.90	0.090	17.32
	R.3.4	H ₀ -T-D	0.89	0.083	16.63
V1.1.1.	R.3.5	H _i - L _i -T	0.95	0.058	13.90
Yerel dalga	R.3.6	H _i -L _i -d	0.94	0.089	17.22
parametreleri	R.3.7	H _i -L _i -D	0.91	0.099	18.17

Çizelge 7.5 Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri

En yüksek korelasyona sahip üç girdili modeller kullanılarak elde edilen sekiz adet farklı dört girdili modeller Çizelge 7.6'da görülmektedir. Çizelgenin incelenmesi durumunda girdi parametrelerinin artması ile modellerin korelasyon katsayılarının arttığı görülmektedir. Derin su dalga parametrelerinin kullanılması halinde R.4.1 modelinin yerel dalga parametreleri kullanılması halinde ise de R.4.5 modelinin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca tüm modellerdeki korelasyon katsayılarının 0.91≤R≤0.95 aralığında değiştiği de açıkça görülmektedir. Ancak en iyi model yerel dalga parametrelerinin kullanılması ile elde edilmiştir.

Parametreler	Model No	Girdi	R	ОКН	SI %	ОН
	R.4.1	H_0-L_0-d-D	0.94	0.076	15.92	0.007
Derin su dalga	R.4.2	H_0-L_0-T-d	0.93	0.059	14.02	0.005
parametreleri	R.4.3	H ₀ -T-d-D	0.91	0.075	15.81	0.000
	R.4.4	H_0-L_0-T-D	0.91	0.102	17.80	-0.002
	R.4.5	H _i - L _i -T-D	0.95	0.057	13.78	0.001
Yerel dalga	R.4.6	H _i - L _i -T-d	0.95	0.065	14.72	0.001
parametreleri	R.4.7	H _i -L _i -d-D	0.94	0.075	15.81	-0.003
	R.4.8	H _i -T-d-D	0.93	0.056	13.66	-0.003

Çizelge 7.6 R ,OKH, SI ve OH değerleri

Yeni adımda parametre sayısı beşe çıkartılmıştır. Ancak korelasyon katsayılarının azaldığı ve ortalama kare hataların ise arttığı görülmüştür. Bu nedenle sonuçlarına burada yer verilmemiştir.

Çizelge 7.7'de tek girdili modellerden başlanarak girdi sayısının artırılması ile elde edilen modellerin tamamında korelasyon katsayılarında giderek artma, ortalama kare hatalarda, OKH ve saçılım indekslerinde, SI, giderek azalma görülmektedir.

Biri derin su dalga parametrelerini diğeri yerel dalga parametrelerini içeren en iyi iki model düzenli dalgalar için kullanılabilecektir. Bu nedenle model, R.4.1 ve R.4.5 sonuçları kullanılarak ölçümlerden elde edilen rölatif oyulma derinliğine karşılık

modellerden elde edilen rölatif oyulma derinlikleri Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'de gösterilmiştir. Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'de verilerin uyum içinde olduğu görülmektedir.

Modeller	Korelasyon Katsayıları	Ortalama Kare Hatalar	Saçılım İndeksi SI%
R.1	0.13≤R≤0.91	0.102≤OKH≤0.468	18.44≤SI≤39.50
R.2	0.78≤R≤0.94	0.074≤OKH≤0.232	15.71≤SI≤26.96
R.3	0.89≤R≤0.95	0.058≤OKH≤0.123	13.90≤SI≤18.17
R.4	0.91≤R≤0.95	0.056≤OKH≤0.102	13.78≤SI≤17.80

Çizelge 7.7 Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri



7.2 Düzensiz Dalga Modelleri

Bu çalışma kapsamında düzlem taban ve 1/10 şev eğiminde düzensiz dalga şartlarında yapılan deneylerden elde edilen ölçüm değerleri modellerde girdi verileri olarak kullanılmıştır. Toplam 94 veri setinin %55'i eğitim (52 veri), %35'i kontrol (33 veri) ve %10'u test (9 veri) veri setleri rastgele olarak ayrılmıştır. Tüm modellerde aynı eğitim, kontrol ve test veri setleri kullanılmıştır.

Düzensiz dalga etkisinde denizaltı boru hatları altındaki oyulmanın, S, tahmini için kurulan modellerde derin su dalga parametreleri olarak; dalga yükseklikleri, H_{s0} , $H_{1/10,0}$, $H_{rms,0}$, dalga boyları, L_{p0} , L_{m0} , yerel dalga parametreleri olarak; yerel dalga yükseklikleri, H_s , $H_{1/10}$, H_{rms} , yerel dalga boyları, $L_{s,m}$, $L_{1/10,m}$, $L_{rms,m}$, $L_{s,p}$, $L_{1/10,p}$, $L_{rms,p}$, su derinliği, d_i, ve dalga periyotları, T_m , T_{m0} , T_p , T_{p0} , ve boru çapı, D verileri kullanılmıştır. Tasarlanan modellerde kullanılan çeşitli girdiler Şekil 7.6'da görülmektedir.



Şekil 7.6 Model alanı ve oyulma üzerinde etkili parametreler

Gizli tabakadaki en uygun sinir hücre sayısını elde etmek için Çizelge 7.8'de yerel parametreler kullanılarak farklı yedi adet tek girdili modeller elde edilmiştir. En yüksek kontrol korelasyon katsayısı ve minimum ortalama kare hata (OKH) değerlerinin gizli katman tabakasında iki ve üç adet sinir hücresi olması halinde meydana geldiği görülmektedir. Ancak hücreler arasında belirgin bir değişiklik görülmediğinden modelde daha az ve daha hızlı işlem tercih edildiğinden gizli katmanda iki adet sinir hücresi kullanılması tercih edilmiştir. Bundan sonraki tüm modellerde gizli katmanda ikişer adet sinir hücresi kullanılacaktır.

Düzensiz dalga koşullarında kurulan modellerde oyulmayı, S, minimum parametre kullanarak ve en yüksek korelasyon katsayısıyla elde etmek için ilk önce tek girdili

modellerle başlanmış ve daha sonra iki, üç, dört, beş girdili modellere kadar Çizelge 7.9, Çizelge 7.10, Çizelge 7.11, Çizelge 7.12'de verilen çeşitli modeller geliştirilmiştir.

Domomotro	Model	Cinti	1 Hücre		2 Hücre		3 Hücre		4 Hücre	
Parametre	No	Girai	R	OKH	R	OKH	R	OKH	R	OKH
	IR.1.1	H _s	0.86	0.049	0.91	0.047	0.91	0.045	0.87	0.042
	IR.1.2	H _{1/10}	0.85	0.049	0.89	0.045	0.90	0.046	0.89	0.044
Varal	IR.1.3	H _{rms}	0.83	0.045	0.86	0.044	0.91	0.038	0.84	0.044
rerei	IR.1.4	di	0.37	0.147	0.41	0.136	0.48	0.139	0.35	0.124
	IR.1.5	T _m	0.81	0.059	0.86	0.050	0.85	0.043	0.84	0.049
	IR.1.6	T _p	0.83	0.051	0.88	0.046	0.87	0.046	0.83	0.046
Diğer	IR.1.7	D	0.45	0.132	0.49	0.115	0.46	0.121	0.44	0.104

Çizelge 7.8 Sinir hücre sayısının belirlenmesi

Modellemede dalga parametreleri, su derinliği, boru çapı etkileri ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Dalga parametreleri; derin su dalga parametreleri, yerel dalga parametreler ve diğer parametreler olarak gruplandırılmıştır. Çalışmanın bu aşamasında düzensiz dalga etkisinde yerel oyulma derinliği çalışıldığından fırtınanın hangi karakteristik dalga parametre veya parametreleri ile temsil edilmesi gerektiği söz konusudur. Bu nedenle dalga yüksekliği için H_{1/10}, H_s, H_{rms}, dalga boyu için L_p, L_m, dalga periyodu için T_p, T_m gibi çeşitli karakteristik dalga parametreleri ile kurulanılarak her bir parametre için ayrı ayrı modeller kurulmuştur. Dalga parametreleri ile kurulan yirmi adet tek girdili modelin hemen hepsi oldukça yüksek korelasyon değerleri vermiştir. Dalga parametrelerinin korelasyon katsayıları 0.77<R<0.9 aralığında değişirken su derinliği (IR.1.17) ve boru çapının (IR.1.20) korelasyonkatsayıları 0.4<R<0.5 aralığında değişmektedir. Ayrıca pik periyoda sahip modeller daha yüksek korelasyon katsayısı ve daha düşük ortalama kare hatalar derin su parametreleri için 0.044≤OKH≤0.048 ve yerel parametreler için 0.039≤OKH≤0.136 aralığında değişmektedir (Çizelge 7.9).

Çizelge 7.10'da oyulma derinliğinin belirlenebilmesi için dalga yüksekliği ve dalga boyu, H-L, dalga yüksekliği ve dalga periyodu, H-T, gibi farklı iki parametreli kombinasyonlar ile kurulan on sekiz adet model daha yüksek korelasyon katsayısına ve daha düşük ortalama kare hataya sahiptir. Modellerdeki korelasyon değerleri 0.84≤R≤0.91 arasında ve ortalama kare hatalar ise 0.029≤OKH≤0.043 aralığında değişmektedir. Ayrıca pik dalga periyodu değerlerinden elde edilen modellerin daha yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle bundan sonraki modellemelerde pik periyot parametreleri kullanılacaktır.

Parametreler	Model No	Girdi	R	ОКН	SI %
	IR.1.1	H _{1/10,0}	0.89	0.047	20.95
	IR.1.2	H _{rms0}	0.88	0.045	20.50
D 11	IR.1.3	H _{s0}	0.88	0.046	20.72
Derin su dalga	IR.1.4	L _{p0}	0.89	0.044	20.27
parametrelett	IR.1.5	L _{m0}	0.87	0.048	21.17
	IR.1.6	T _{p0}	0.88	0.046	20.72
	IR.1.7	T _{m0}	0.82	0.044	20.27
	IR.1.8	H _{1/10}	0.88	0.039	19.08
	IR.1.9	H _{rms}	0.86	0.044	20.27
	IR.1.10	H _s	0.86	0.044	20.27
	IR.1.11	L _{s,p}	0.85	0.051	21.82
	IR.1.12	L _{rms,p}	0.84	0.054	22.45
Yerel dalga	IR.1.13	L _{1/10,p}	0.83	0.052	22.03
parametreleri	IR.1.14	L _{s,m}	0.84	0.059	23.47
	IR.1.15	L _{rms,m}	0.80	0.060	23.67
	IR.1.16	L _{1/10,m}	0.78	0.053	22.24
	IR.1.17	di	0.41	0.136	35.63
	IR.1.18	T _{pi}	0.88	0.046	20.72
	IR.1.19	T _{mi}	0.86	0.050	21.60
Diğer	IR.1.20	D	0.49	0.115	32.76

Çizelge 7.9 Tek girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri

Çizelge 7.10 İki girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri

Parametreler	Model No	Girdi	R	OKH	SI %
	IR .2.1	H_{s0} - L_{p0}	0.91	0.038	18.83
	IR .2.2	H _{rms0} -L _{p0}	0.88	0.037	18.58
Derin su dalga	IR .2.3	H _{1/10,0} -L _{p0}	0.88	0.040	19.32
parametreleri	IR .2.4	H_{s0} - T_{p0}	0.90	0.037	18.58
	IR .2.5	H _{rms0} -T _{p0}	0.89	0.038	18.83
	IR .2.6	$H_{1/10,0}$ - T_{p0}	0.87	0.038	18.83
	IR .2.7	H _s -T _p	0.91	0.040	19.32
	IR .2.8	$H_{1/10-}T_{p}$	0.90	0.036	18.33
	IR .2.9	H_{rms} - T_p	0.90	0.033	17.55
	IR .2.10	H _{rms} -L _p	0.90	0.041	19.56
	IR .2.11	$H_{1/10}$ - L_{1p}	0.88	0.038	18.83
Yerel dalga	IR .2.12	H_s - L_p	0.86	0.043	20.04
parametreleri	IR .2.13	$H_{1/10}$ - T_{mi}	0.90	0.039	19.08
	IR .2.14	H _{rms} -T _{mi}	0.90	0.038	18.83
	IR .2.15	H _s -T _{mi}	0.87	0.037	18.58
	IR .2.16	H _s -L _m	0.87	0.042	19.80
	IR .2.17	$H_{1/10}$ - L_m	0.84	0.042	19.80
	IR .2.18	H _{rms} -L _m	0.84	0.042	19.80

En yüksek iki girdili modellere bir parametre daha eklenerek elde edilen çeşitli üç girdili on iki adet model geliştirilmiştir. Girdi sayısı arttıkça korelasyon katsayıları artmakla birlikte farklı karakteristik dalga parametrelerinin dikkate alınması ile kurulan model sonuçları birbirlerine oldukça yakındır. Ortalama kare hatalar ise ~0.03 civarında değişmektedir (Çizelge 7.11).

Parametreler	Model No	Girdi	R	OKH	SI %
	IR .3.1	H_{s0} - T_{p0} -d	0.92	0.033	17.55
	IR .3.2	$H_{1/10,0}$ - T_{p0} -d	0.85	0.034	17.82
Derin su dalga	IR .3.3	H _{rms,0} -T _{p0} -d	0.90	0.037	18.58
parametreleri	IR .3.4	$H_{s0,} - L_{p0} - d$	0.95	0.028	16.17
	IR .3.5	$H_{1/10,0}$ - L_{p0} -d	0.93	0.036	18.33
	IR .3.6	H _{rms,0} -L _{p0} -d	0.91	0.034	17.82
	IR .3.7	H _s -T _p -d	0.92	0.036	18.33
	IR .3.8	$H_{1/10}-T_{p}-d$	0.92	0.036	18.33
Yerel dalga	IR .3.9	H _{rms} -T _p -d	0.91	0.030	16.73
parametreleri	IR .3.10	$H_{s,}$ - L_p -d	0.94	0.031	17.01
	IR .3.11	H _{rms} -L _p -d	0.93	0.033	17.55
	IR .3.12	H _{1/10,0} -L _p -d	0.91	0.031	17.01

Çizelge 7.11 Üç girdili modeller için R ve OKH değerleri

Farklı karakteristik dalga yükseklikleri, pik periyot, su derinliği ve boru çapı kullanılarak derin su ve yerel dalga parametreleri için dört girdili farklı kombinasyonlu on beş adet model geliştirilmiştir. Düzensiz dalga etkisinde, denizaltı boru hatları altındaki oyulma derinliğinin belirlenebilmesi için farklı dört girdili modellerin hemen hemen tamamı oldukça yüksek bir korelasyon katsayısı vermiştir. Bir firtınayı temsil eden $H_{1/10}$, H_s , ve H_{rms} dalga yükseklikleri ile elde edilen tüm modeller yüksek bir korelasyon katsayısına (R=0.99) ve düşük ortalama kare hataya (~0.006) sahiptirler (Çizelge 7.12).

Parametreler	Model No	Girdi	R	OKH	SI %	ОН
	IR .4.1	H _{rms0} -T _p -d-D	0.99	0.007	8.08	0.001
	IR .4.2	H _{so} -T _p -d-D	0.98	0.007	8.08	-0.001
	IR .4.3	H _{1/10,0} -T _p -d-D	0.98	0.008	8.64	0.002
D 1 11	IR .4.4	H _{s0} -L _{p0} - T _p -D	0.94	0.022	14.33	0.000
Derin su dalga parametreleri	IR .4.5	H _{1/10,0} -L _{p0} - T _p -D	0.94	0.020	13.66	-0.002
	IR .4.6	H_{rms0} - L_{p0} - T_p -D	0.96	0.016	12.22	0.001
	IR .4.7	H_{s0} - L_{p0} -d-D	0.99	0.006	7.48	0.000
	IR .4.8	H _{1/10,0} -L _{p0} -d-D	0.98	0.006	7.48	0.001
	IR .4.9	H _{rms,0} -L _{p0} -d-D	0.98	0.006	7.48	0.000
	IR .4.10	H _{rms} -T _p -d-D	0.99	0.006	7.48	0.000
	IR .4.11	H _s -T _p -d-D	0.99	0.006	7.48	-0.001
Yerel dalga	IR .4.12	$H_{1/10}-T_{p}-d-D$	0.98	0.009	9.17	-0.001
parametreleri	IR .4.13	H _{rms} -L _p -T _p -D	0.99	0.007	8.08	0.002
	IR .4.14	H _s -L _p -T _p -D	0.99	0.007	8.08	0.000
	IR 415	H1/10-L -T -D	0.99	0.008	8 64	0.001

Çizelge 7.12 Dört girdili modeller için R, OKH, SI ve OH değerleri

Parametre sayısının beşe yükselmesi ile kurulan modellerde daha iyi sonuç alınmamıştır. Bu nedenle burada sonuçlarına yer verilmemiştir.

Çizelge 7.13'de tek girdili modellerden başlanarak girdi sayısının artırılması ile elde edilen modellerin tamamında korelasyon katsayılarında giderek artma ortalama kare hatalarda ve saçılım indekslerinde ise giderek azalma görülmektedir.

Modeller	Korelasyon Katsayıları	Ortalama Kare Hatalar	Saçılım Indeksi %
IR.1	0.41≤R≤0.89	0.039≤OKH≤0.136	19.08≤SI≤35.63
IR.2	0.84≤R≤0.91	0.033≤OKH≤0.043	17.55≤SI≤20.04
IR.3	0.85≤R≤0.95	0.028≤OKH≤0.037	16.17≤SI≤18.58
IR.4	0.94≤R≤0.99	0.006≤OKH≤0.020	7.48≤SI≤14.33

Çizelge 7.13 Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri

Bir firtinadaki oyulmayı ifade eden düzensiz dalga karakteristik yükseklikleri, H_s , H_{rms} , $H_{1/10}$, ve pik dalga periyodu, T_p , pik dalga boyu, L_p , kombinasyonları kullanılarak elde edilen modellerin tamamı düzensiz dalgalar için kullanılabilecektir.

Model, IR.4.1 ve IR.4.10 kullanılarak ölçümlerden elde edilen rölatif oyulma derinliğine karşılık modellerden elde edilen rölatif oyulma derinlikleri Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de gösterilmiştir.

Sümer ve Fredsøe [69], [80] düzensiz dalga şartlarında silindirik düşey kazıklar, boru hatları altındaki oyulma derinliği ve genişliği ile yaptıkları çalışmalarda düzensiz dalga parametrelerinden dalga yüksekliği için H_{rms} ve dalga periyodu için T_p parametrelerinin verilerle daha iyi uyum sağladığını deneme yanılma yoluyla bulmuşlardır. Düzensiz dalga şartlarında yapılan modelleme çalışmalarında ise pik dalga periyodunu T_p içeren tüm modellerin yüksek korelasyon katsayısına sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 7.7 IR4.1 (H_{rms,0}-T_p-d-D)



7.3 Düzenli ve Düzensiz Dalga Modelleri

Bölüm 6.1'de düzenli ve Bölüm 6.2'de düzensiz dalga şartlarına ait ayrı ayrı kullanılan veriler burada birlikte girdi verileri olarak değerlendirilmiştir. Düzlem taban ve 1/10 şev eğimine ait toplam 206 veri setinin %55'i eğitim (113 veri), %35'i kontrol (72 veri) ve %10'u test (21 veri) veri setleri her modelde rastgele olarak ayrılmıştır. Tüm modellerde aynı eğitim, kontrol ve test veri setleri kullanılmıştır.

Gizli tabakadaki en uygun sinir hücre sayısını elde etmek için tek girdili modeller kullanılarak beş adet model geliştirilmiştir. Modellerden en yüksek kontrol korelasyon katsayısı ve minimum ortalama kare hatanın (OKH) gizli katman tabakasında iki adet sinir hücresi olması halinde meydana geldiği görülmektedir. Bundan sonraki tüm modellerde gizli katmanda ikişer adet sinir hücresi kullanılacaktır (Çizelge 7.14).

Doromotro	Model	Girdi	1 H	Iücre	2]	Hücre	3 H	Hücre 4 OKH R 5 0.165 0.82 5 0.217 0.70 5 0.165 0.79 6 0.104 0.89	4 H	Hücre	
Falametre	No	Ollui	R	OKH	R	OKH	R	OKH	R	OKH	
Yerel dalga parametreleri	RIR.1.1	H _s	0.76	0.194	0.81	0.164	0.75	0.165	0.82	0.142	
	RIR.1.2	H _{1/10}	0.67	0.3144	0.74	0.199	0.75	0.217	0.70	0.218	
	RIR.1.3	H _{rms}	0.72	0.232	0.75	0.150	0.76	0.165	0.79	0.146	
	RIR.1.4	T _m	0.85	0.134	0.86	0.096	0.86	0.104	0.89	0.112	
	RIR.1.5	T _p	0.57	0.245	0.68	0.232	0.69	0.193	0.74	0.152	

Çizelge 7.14 Sinir hücre sayısının belirlenmesi

Düzenli ve düzensiz dalga koşullarının birlikte değerlendirilmesi ile kurulan modellerde oyulmayı, S, minimum parametre kullanarak ve en yüksek korelasyon katsayısı ile elde etmek için ilk önce tek girdili modellerle başlanmış ve daha sonra iki, üç, dört, beş girdili modeller elde edilmiştir (Çizelge 7.15, Çizelge 7.16, Çizelge 7.17, Çizelge 7.18).

Çalışmanın bu aşamasında düzensiz dalga şartlarında hangi karakteristik dalga parametre veya parametrelerinin düzenli dalga şartındaki dalga parametresine eş değer olacağı modellenerek araştırılacaktır. Bu nedenle dalga yüksekliği için $H_{1/10}$, H_s , H_{rms} , dalga boyu için $L_{1/10}$, L_s , L_{rms} , ve dalga periyodu için T_p , T_m , parametreleri derin su ve yerel dalga parametreleri için ayrı ayrı dikkate alınarak on sekiz adet model gerçekleştirilmiştir. Düzensiz dalga şartındaki ortalama dalga periyodunun T_m düzenli dalga şartındaki dalga periyodunu daha yüksek korelasyon katsayısı ile, RIR.1.17, temsil ettiği görülmektedir (Çizelge 7.15). Bundan sonraki adımlarda dalga periyodu girdi parametresi olarak kullanıldığında ortalama dalga periyodu T_m tercih edilecektir.

Oyulma derinliğinin belirlenebilmesi için en yüksek tek girdili modeller kullanılarak on iki adet değişik iki girdili modeller elde edilmiştir (Çizelge 7.16). Dalga yüksekliğidalga periyodu, H-T ile dalga yüksekliği-dalga boyu, H-L, gibi çeşitli kombinasyonlar modellerde girdi olarak kullanılmıştır. Derin su dalga parametrelerinin kullanılması durmunda Model RIR.2.4 daha yüksek bir korelasyon katsayısına (R=0.92) ve daha düşük ortalama kare hataya (=0.072) sahip iken yerel dalga parametrelerinin kullanılması durumunda ise Model RIR.2.7 (R=0.92) daha yüksek bir korelasyon katsayısına ve daha düşük ortalama kare hataya (=0.076) sahiptir.

Parametreler	Model No	Girdi	R	ОКН	SI %
	RIR.1.1	H _{rms0}	0.81	0.192	30.99
	RIR.1.2	H _{s0}	0.80	OKH SI % 1 0.192 30.99 0 0.166 28.81 9 0.235 34.28 3 0.131 25.60 3 0.223 33.40 2 0.108 23.24 8 0.232 34.06 1 0.164 27.39 5 0.150 28.64 4 0.199 31.55 1 0.231 33.99 4 0.229 33.84 3 0.212 32.56 1 0.144 26.84 8 0.141 26.56 2 0.205 32.02 5 0.096 21.91 8 0.232 34.06	
D 11	RIR.1.3	H _{1/10,0}	R OKH S1 % 0.81 0.192 30.99 0.80 0.166 28.81 0.69 0.235 34.28 0.83 0.131 25.60 0.63 0.223 33.40 0.82 0.108 23.24 0.68 0.232 34.06 0.81 0.164 27.39 0.75 0.150 28.64 0.74 0.199 31.55 0.71 0.231 33.99 0.64 0.229 33.84 0.63 0.212 32.56 0.81 0.144 26.84 0.78 0.141 26.56 0.72 0.205 32.02 0.86 0.096 21.91 0.68 0.232 34.06		
Derin su dalga	RIR.1.4	L _{m0}	0.83	0.131	25.60
parametreleri	RIR.1.5	L _{p0}	0.63	0.223	33.40
	RIR.1.6	T _{m0}	0.82	0.108	23.24
	RIR.1.7	T _{p0}	0.68	0.232	34.06
	RIR.1.8	H _s	0.81	0.164	27.39
	RIR.1.9	H _{rms}	0.75	0.150	28.64
	RIR.1.10	H _{1/10}	0.74	0.199	31.55
	RIR.1.11	L _{s,p}	0.71	0.231	33.99
	RIR.1.12	L _{1/10,p}	0.64	0.229	33.84
Yerel dalga	RIR.1.13	L _{rms,p}	0.63	0.212	32.56
parametreleri	RIR.1.14	L _{s,m}	0.81	0.144	26.84
	RIR.1.15	L _{1/10,m}	0.78	0.141	26.56
	RIR.1.16	L _{rms,m}	0.72	0.205	32.02
	RIR.1.17	T _m	0.86	0.096	21.91
	RIR.1.18	T _p	0.68	0.232	34.06

Çizelge 7.15 Tek girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri

Çizelge 7.16 İki girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri

Parametreler	Model No	Girdi	R	ОКН	SI %
	RIR .2.1	H_{s0} - L_{m0}	0.88	0.086	20.74
	RIR .2.2	H _{rms0} -L _{m0}	0.88	0.087	20.86
Derin su dalga parametreleri	RIR .2.3	$H_{1/10,0}$ - L_{m0}	0.88	0.099	22.25
	RIR .2.4	H_{s0} - T_{m0}	0.92	0.072	18.98
	RIR .2.5	$H_{1/10,0}-T_{m0}$	0.91	0.096	21.91
	RIR .2.6	H_{rms0} - T_{m0}	0.90	0.088	20.98
	RIR .2.7	H _s -T _m	0.92	0.076	19.50
	RIR .2.8	$H_{1/10}-T_m$	0.91	0.076	19.50
Yerel dalga parametreleri	RIR .2.9	H_{rms} - T_m	0.91	0.083	20.37
	RIR .2.10	H _s -L _m	0.87	0.099	22.25
	RIR .2.11	$H_{1/10}-L_m$	0.86	0.119	24.40
	RIR .2.12	H _{rms} -L _m	0.85	0.116	24.09

Yüksek korelasyona sahip iki girdili modellere su derinliği ve boru çapı değişkenlerinin ayrı ayrı ilavesiyle on beş adet çeşitli üç girdili modeller kurulmuştur. Düzenli ve düzensiz dalga etkisinde denizaltı boru hatları altındaki oyulma derinliğinin belirlenebilmesi için elde edilen üç girdili modellerin hepsi oldukça yüksek bir korelasyon katsayısı vermiştir ($0.86 \le R \le 95$). Girdi sayısı arttıkça korelasyon katsayıları artmakta ve ortalama kare hatalar azalmaktadır. Ayrıca su derinliğinin, d, oyulma üzerinde boru çapından, D, daha etkili olduğu da görülmektedir (Çizelge 7.17).

Parametreler	Model No	Girdi	R	OKH	SI %
	RIR .3.1	H _{rms,0} -T _{m0} -d	0.95	0.057	16.88
	RIR .3.2	$H_{s0}-T_{m0}-d$	0.93	0.061	17.47
Derin su dalga	RIR .3.3	H _{1/10,0} -T _{m0} -d	0.92	0.073	19.11
parametreleri	RIR .3.4	H _{rms,0} -L _{m0} -d	0.93	0.057	16.88
-	RIR .3.5	H_{s0} , - L_{m0} -d	0.92	0.070	18.71
	RIR .3.6	$H_{1/10,0}$ - L_{m0} -d	0.91	0.078	19.75
	RIR .3.7	$H_{1/10}-T_m-d$	0.95	0.059	17.18
	RIR .3.8	H _s -T _m -d	0.94	0.060	17.32
	RIR .3.9	H _{rms} -T _m -d	0.93	0.067	18.31
	RIR .3.10	$H_{1/10,0}$ - L_m -d	0.93	0.079	19.88
Yerel dalga	RIR .3.11	$H_{s,}$ - L_m -d	0.92	0.071	18.84
parametreleri	RIR .3.12	H _{rms} -L _m -d	0.90	0.084	20.50
	RIR .3.13	H_{rms} - L_m - D	0.90	0.086	20.74
	RIR .3.14	$H_{s,}$ - L_m -D	0.90	0.101	22.48
	RIR .3.15	H _{1/10,0} -L _m -D	0.86	0.102	22.59

Çizelge 7.17 Üç girdili modeller için R, OKH ve SI değerleri

Modellerdeki girdi sayısı artırılarak farklı dört girdili on yedi adet model geliştirilmiştir. Düzensiz dalga şartını temsilen belirgin dalga yüksekliği H_s ve ortalama dalga periyodu T_m parametreleri ile düzenli dalga parametrelerinin birlikte kullanılması halinde yüksek korelasyon katsayısına sahip RIR4.1 ve RIR.4.10 modelleri elde edilmiştir (Çizelge 7.18).

Parametreler	Model No	Girdi	R	OKH	SI %	ОН
	RIR .4.1	H _{so} -T _m -d-D	0.95	0.049	15.65	SI % OH 15.65 0.001 16.43 0.004 18.84 -0.003 17.47 -0.001 19.88 0.005 20.00 0.002 16.28 0.001 18.31 0.002 20.74 0.003 17.32 0.001 17.18 0.003 17.32 0.000 18.98 -0.006 17.75 -0.002
	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0.93	0.054	16.43	0.004	
		0.071	18.84	-0.003		
Derin su dalga parametreleri	RIR .4.4	H_{s0} - L_{m0} - T_m -D	0.91	0.061	17.47	-0.001
	RIR .4.5	$H_{1/10,0}$ - L_{m0} - T_m - D	0.91	0.079	19.88	0.005
	RIR .4.6	H_{rms0} - L_{m0} - T_m - D	0.90	0.080	20.00	0.002
	RIR .4.7	H_{s0} - L_{m0} -d-D	0.95	0.053	16.28	0.001
	RIR .4.8	H _{rms0} -L _{m0} -d-D	0.92	0.067	18.31	0.002
	RIR .4.9	$H_{1/10,0}$ - L_{m0} - d - D	0.89	0.086	20.74	0.003
	RIR .4.10 H _s -T _n	H _s -T _m -d-D	0.96	0.060	17.32	0.001
	RIR .4.11	$H_{1/10}-T_m-d-D$	0.95	0.059	17.18	0.003
	RIR .4.12	H _{rms} -T _m -d-D	0.93	0.060	17.32	0.000
Yerel dalga	RIR .4.13	H _{rms} -T _p -d-D	0.91	0.072	18.98	-0.006
parametreleri	RIR .4.14	$H_s-L_m-T_m-D$	0.96	0.063	17.75	-0.002
	RIR .4.15	H _{rms} -L _m -T _m -D	0.95	0.060	17.32	0.008
	RIR .4.16	$H_{1/10}$ - L_m - T_m - D	0.93	0.063	17.75	-0.002
	RIR .4.17	H _{rms} -L _{rmsp} -T _p -D	0.94	0.065	18.03	0.006

Çizelge 7.18 Dört girdili modeller için R, OKH, SI ve OH değerleri

Parametre sayısının beşe yükselmesi ile kurulan modellerde daha iyi sonuç alınmamıştır. Bu nedenle burada sonuçlarına yer verilmemiştir.

Çizelge 7.19'da tek girdili modellerden başlanarak girdi sayısının artırılması ile elde edilen modellerin tamamında korelasyon katsayılarında giderek artma ortalama kare hatalarda ve saçılım indekslerinde ise giderek azalma görülmektedir.

Modeller	Korelasyon Katsayıları	Ortalama Kare Hatalar	Saçılım Indeksi %
RIR.1	0.63≤R≤0.86	0.096≤OKH≤0.235	21.95≤SI≤34.28
RIR.2	0.85≤R≤0.92	0.072≤OKH≤0.119	18.98≤SI≤24.40
RIR.3	0.86≤R≤0.95	0.057≤OKH≤0.102	16.88≤SI≤22.59
RIR.4	0.89≤R≤0.96	0.049≤OKH≤0.086	15.65≤SI≤20.74

Çizelge 7.19 Tüm modeller için R, OKH ve SI değerleri

Derin su dalga parametreleri ile elde edilen en iyi model RIR.4.1 ve yerel dalga parametreler ile elde edilen en iyi model RIR.4.10 sonuçları kullanılarak ölçümlerden elde edilen rölatif oyulma derinliğine karşılık modellerden elde edilen rölatif oyulma derinlikleri Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da gösterilmiştir.





Şekil 7.10 RIR.4.10 (H_s-T_m-d-D)

7.4 Yapay Sinir Ağları ile Kurulan Modellerin Genel Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalardan elde edilen düzenli dalgalara ait 112 adet, düzensiz dalgalara ait 94 adet, düzenli/düzensiz dalgalara ait 206 adet veri Matlab 7.7 programı kullanılarak farklı girdi kombinasyonları için 200'den fazla model geliştirilmiştir.

Düzenli dalga şartları, düzensiz dalga şartları, düzenli ve düzensiz dalga şartlarının birlikte değerlendirilmesi ile kurulan en iyi model sonuçları özet olarak Çizelge 7.20'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Yapay Sinir Ağları ile farklı koşullarda kurulan tüm modellerde en yüksek korelasyon, en düşük ortalama kare hata ve en düşük saçılım indeksi dört girdili modellerde sağlanmıştır.

Gerek derin su dalga parametrelerinin gerekse yerel dalga parametrelerinin kullanılması durumunda boru hattı altındaki oyulma derinliği tahmini tüm modeller ile elde edilebilecektir.

Düzensiz dalga şartlarında farklı karakteristik dalga yükseklikleri ile kurulan modellerin bir fark yaratmadığı sadece dalga periyodunun etkili olduğu görülmüştür.

Koşullar	Modeldeki Girdi parametre koşulları	Girdi Kombinasyonları	R	ОКН	SI %	ОН
Düzenli	Derin su dalga arametreleri	H_0-L_0-d-D	0.94	0.076	15.92	0.007
Dalga	Yerel dalga parametreleri	H _i - L _i -T-D	0.95	0.057	13.78	0.001
	Derin su dalga arametreleri	H_{x0} - T_{p0} - d - D	0.99	0.007	8.08	0.001
Düzensiz	Yerel dalga parametreleri	H_i - L_i -T-D 0.95 0.057 13.78 0 i H_{x0} - T_{p0} -d-D 0.99 0.007 8.08 0 i H_{xi} - T_p -d-D 0.99 0.006 7.48 0 i H_{x0} - L_{p0} -d-D 0.99 0.006 7.48 0 i H_{x0} - L_{p0} -d-D 0.99 0.006 7.48 0 i H_{x0} - L_{p0} -d-D 0.99 0.007 8.08 0 i H_{x0} - L_{p-} -D 0.99 0.007 8.08 0 i H_{x0} - L_{p-} -d-D 0.99 0.007 8.08 0 i H_{s0} - T_{m0} -d-D 0.95 0.049 15.65 0	0.000			
Dalga	Derin su dalga arametreleri	H_{x0} - L_{p0} -d-D	0.99	0.006	7.48	0.000
	Yerel dalga parametreleri	parametreleri H_{xi} - T_p -d-D 0.99 0.006 7 ga arametreleri H_{xi} - L_{p0} -d-D 0.99 0.006 7 parametreleri H_{xi} - L_p -d-D 0.99 0.006 7 parametreleri H_{xi} - L_p - T_p -D 0.99 0.007 8 ga arametreleri H_{xo} - T_{m0} -d-D 0.95 0.049 1	8.08	0.002		
	Derin su dalga arametreleri	H _{so} -T _{m0} -d-D	0.95	0.049	15.65	0.001
Düzenli	Yerel dalga parametreleri	H_s - T_m - d - D	0.96	0.060	17.32	0.001
Düzensiz	Derin su dalga arametreleri	H_{so} - L_{m0} - d - D	0.95	0.053	16.28	0.001
	Yerel dalga parametreleri	Girdi KombinasyonlarıROKHSI % H_0 -L_0-d-D0.940.07615.920 H_i - L_i-T-D0.950.05713.780 H_{x0} -T _{p0} -d-D0.990.0078.080 H_{xi} -T_p-d-D0.990.0067.480 H_{x0} -L _{p0} -d-D0.990.0067.480 H_{xi} -Lp-Tp-D0.990.0078.080 H_{xi} -Lp-Tp-D0.990.0067.480 H_{so} -Lm0-d-D0.990.0078.080 H_{so} -Tm0-d-D0.950.04915.650 H_{so} -Lm0-d-D0.950.05316.280 H_{s} -L_m-Tm-D0.960.06317.75-	-0.002			

Ω^{*} 1	7 00 1	11	1 1	1 .	•	1 11		1 1	4 1	1
(17elge	1201	≺arklı	kosiil	lar 10	nı	model	lerin	karsi	astiri	Imasi
ÇIZCIGC	1.201	unni	noşui	Iui iv	,	mouch		Kuişii	uşunn	iniusi

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

Düzensiz dalga etkisindeki firtina şartlarında denizaltı boru hatları altında meydana gelen yerel oyulma derinliğinin belirlenmesi amacıyla YTÜ Hidrolik ve Kıyı-Liman Mühendisliği Laboratuvarında 20 m uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 1 metre derinliğindeki dalga kanalında deneyler yapılmıştır. Kanal içerisine 1/10 eğime sahip bir şev yerleştirilerek üzerine 25 cm kalınlığında aynı granülometreye sahip taban malzemesi serilmiştir. Deneyler, düzlem tabanda d=35 cm ve şev üzerinde d=31 cm, d=23 cm su derinliklerinde 8 farklı dalga şartında gerçekleştirilmiştir. Eksenleri dalga ortagonallerine dik olarak rijit/sabit ve dört farklı çapa sahip, D=11.40, 7.70, 4.90, 3.23 cm, silindirlerin hareketli tabana yerleştirilmesiyle toplam 94 adet deney yapılmıştır. Deneylerde kullanılan düzensiz dalgalar Bretschneider spektrumu ile üretilmiştir.

Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Düzensiz dalga etkisinde yapılan deneysel çalışmada 1/10 şev eğiminde gelişen tüm profillerin kıyı çizgisinde yığılma ile normal profil olduğu gözlemlenmiştir.
- 2) Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda farklı boyutlu düzensiz dalga parametreleri H_x, T_x, ile d ve D her birinin oyulmayla ilişkili olduğu görülmekle birlikte tek başlarına kullanılmaları durumunda saçılımların fazla olduğu ve oyulmayı ifade etmede yetersiz oldukları görülmüştür. Düzensiz dalga etkisine maruz kalan boru hatları etrafında meydana gelen yerel oyulma derinliği artan boru çapı ile artma eğilimi göstermiştir. Çünkü boru çapının artmasıyla şekillenen vorteks sistemleri ile daha büyük türbülanslı bir akım alanı yaratılmaktadır. Boru hatları çevresinde meydana gelen yerel oyulma derinliği dalga yüksekliği ile artma eğilimi göstermiştir. Bunun nedeni dalga yüksekliğinin artmasıyla tabandaki anlık kayma gerilmesi ve yörüngesel hızların artması dolayısıyla boru, akım ve

taban etkileşiminin artmasıdır. Dalga karakteristik periyodları olan ortalama dalga periyodu, T_m , ve pik dalga periyodu, T_p 'nin artmasıyla düzlem ve 1/10 eğimli tabanda oyulma derinliği artma eğilimi göstermiştir. Çünkü periyodun süresi silindirlerin etrafındaki vortekslerin şekillenmesindeki en önemli etkenlerden birisidir. Düzlem ve 1/10 eğimli taban şartlarının birlikte değerlendirilmesiyle düzensiz dalga periyotlarının oyulma derinliği ile iyi bir uyuma sahip oldukları görülmüştür. Ancak bir fırtınayı temsil eden düzensiz dalga parametrelerinden pik dalga periyodunun, T_p , kullanılması durumunda daha yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir.

- 3) Ortalama dalga periyodu, T_m, dikkate alındığında düzensiz dalga şartlarında yapılan deneylerde denizaltı boru hattı altındaki oyulmanın yaklaşık 1000 dalga etkisinde dinamik dengeye ulaştığı ve 1000 dalgadan sonra oyulma derinliğinde ciddi bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla farklı su derinliklerinde ve farklı çaptaki denizaltı boru hatları 1000 dalga etkisine maruz bırakılarak deneysel çalışma yapılmıştır. Benzer etki Çevik (1997)'in düzenli dalga etkisinde yaptığı deneylerde de gözlemlenmiştir.
- 4) Farklı boyutsuz düzensiz dalga parametreleri H_x/gT_x^2 , H_x/d , β , U_R , her birinin oyulmayla ilişkili olduğu görülmekle birlikte tek başlarına kullanılmaları durumunda saçılımların fazla olduğu ve oyulmayı ifade etmede yetersiz oldukları görülmüştür.
- 5) Frekans parametresi, Re sayısı ile KC sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren boyutsuz bir sayıdır. Düzlem taban halinde olduğu gibi 1/10 eğimli tabanda da frekans parametresinin, β, artan değerlerinde rölatif oyulma derinliğinde (S/D) azalma eğilimi meydana gelmektedir. Frekans parametresi sadece periyodun ve boru çapının fonksiyonu olması nedeniyle oyulma derinliğini düşük korelasyon katsayısı ile temsil etmektedir. Frekans parametresi akım rejimini ifade etmekte olup periyot parametresi olarak da bilinmektedir.
- 6) Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda dalga tarafından üretilen ve tabana iletilen enerjinin büyüklüğünü gösteren farklı karakteristik dalga yüksekliği ve dalga periyotları ile ifade edilen Ursell sayısı, rölatif oyulma derinliğini oldukça iyi bir korelasyon katsayısı ile temsil etmektedir. Rölatif oyulma derinliğinin belirlenmesinde kullanılan Ursell sayılarında farklı karakteristik dalga

yüksekliklerinin bir fark yaratmadığı sadece periyodun korelasyon katsayısını az da olsa değiştirdiği anlaşılmıştır. Ancak boru çapını içermeyen bu parametre her boru çapı için aynı oyulma derinliğini vermektedir.

- 7) Boru çapını da içeren boru Ursell sayısı (U_{RB}) rölatif oyulma derinliğini yüksek bir korelasyon katsayısı ile ifade etmektedir. Düzlem taban ve 1/10 kıyı eğimindeki verilerinin birlikte değerlendirilmesi durumunda farklı karakteristik dalga parametrelerinin kombinasyonu ile elde edilen U_{RB} sayıları ile bulunan denklemlerin her biri rölatif oyulma derinliğini yüksek bir korelasyon katsayısıyla vermiştir. Ayrıca farklı karakteristik dalga yüksekliklerinin (H_s, H_{1/10}, H_{rms}) her birinin ayrı ayrı kullanılmasıyla elde edilen farklı katsayılara sahip denklemlerin tamamının rölatif oyulma derinliğini ifade edebileceği belirlenmiştir. Artan U_{RB} değerlerinde S/D'de artmaktadır. Ayrıca rölatif oyulma derinliğinin belirlenmesinde kullanılan farklı karakteristik dalga yüksekliklerinin bir fark yaratmadığı sadece periyodun korelasyon katsayısını az da olsa değiştirdiği anlaşılmıştır.
- 8) Seçilen su derinliği, boru çapı, dalga yüksekliği, dalga periyodu, dalga boyu parametreleri kullanılarak düzenli dalga ifadesinden (5.13) elde edilen rölatif oyulma derinliğine karşı düzensiz dalga şartlarındaki fırtına için farklı karakteristik dalga parametreleri ile elde edilen denklemlerin her birinin ayrı ayrı rölatif oyulma derinliği değişimleri değerlendirildiğinde düzensiz dalga parametreleri ile elde edilen H_s-T_m ve H_{rms}-T_p denklemlerinin düzenli dalga denklemi ile daha uyumlu oldukları görülmüştür. En iyi S/D değişimi H_s-T_m dalga parametreleri ile elde edileniştir.
- 9) Su derinliği ve dalga yüksekliği etkisini içermeyen düşük korelasyon katsayısına sahip frekans parametresine Ursell sayının ilavesi ile Beta Ursell parametresi elde edilmiştir. Düzlem ve 1/10 eğimli tabanda gerçekleştirilen bir firtınadaki düzensiz dalga şartlarında rölatif oyulma derinliğinin Beta Ursell sayısı, U_{Rβ}, ile değişimi, farklı karakteristik dalga parametreleri (H_x, T_x) için aynı derecede yüksek korelasyon katsayısı verdiği ancak denklemlerde farklı katsayılara sahip oldukları görülmüştür. Artan U_{Rβ} ile S/D azalmaktadır.
- 10) Farklı düzensiz dalga parametrelerinin kullanılmasıyla elde edilen (H_x-T_x) Beta Ursell sayılarının düzenli dalga şartlarından elde edilen Beta Ursell sayıları ile

birlikte ayrı ayrı değerlendirilmesiyle rölatif oyulma derinliği her bir denlem için yüksek bir korelasyon vermiştir. Ancak seçilen su derinliği, boru çapı, dalga yüksekliği, dalga periyodu, dalga boyu parametreleri kullanılarak düzenli dalgalar için elde edilen Beta Ursell ifadesinden elde edilen rölatif oyulma derinliğine karşı düzensiz dalga şartlarındaki fırtına için farklı karakteristik dalga parametrelerinden elde edilen Beta Ursell ifadesi ile elde edilen rölatif oyulma derinliği değişimleri incelendiğinde düzensiz dalga parametreleri ile elde edilen H_s-T_m denkleminin düzenli dalga denklemi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

- 11) Bir firtinayı temsil eden düzensiz dalga parametrelerinden belirgin dalga yüksekliği, H_s ve ortalama dalga periyodu, T_m, ikilisinin düzenli dalga şartlarını daha iyi temsil ettiği görülmüştür.
- 12) Düzenli dalga şartlarında Yapay Sinir Ağları yöntemiyle tek girdili modeller incelendiğinde dalga parametrelerinin daha (H, L, T) yüksek korelasyon katsayısı verdiği bununla birlikte d\D'nin de korelasyona sahip oldukları görülmüştür.
- 13) YSA'da tek girdili modellerden başlanarak modellerdeki girdi sayısının artırılmasıyla korelasyon katsayılarının (R) arttığı, ortalama kare hata (OKH) ve saçılım indeksinin (SI) azaldığı görülmüştür. Oyulma derinliğinin tahmini için geliştirilen en iyi modeller dört girdili modeller ile elde edilmiştir.
- 14) Düzenli dalga etkisinde hem derin su hem de yerel dalga parametreleriyle kurulan modellerde en yüksek korelasyon katsayısı ve en düşük hatalar H-L-T-D (R.4.5) modelinde elde edilmiştir.
- 15) Bir firtinayi temsil eden her bir düzensiz dalga parametresinin kullanılmasıyla elde edilen tek girdili modellerin tamamı yüksek bir korelasyon katsayısı vermiştir. Bu modellerde farklı karakteristik dalga yüksekliklerinin etkisi değişmezken dalga periyodlarında pik dalga periyodu, T_p, daha iyidir.
- 16) Düzensiz dalga şartlarında derin su ve yerel dalga parametreleri kullanılarak elde edilen dört girdili modellerin tamamı çok iyi olmasına rağmen derin su dalga parametreleri için H_{s0}-L_{p0}-d-D (IR.4.7) ve yerel dalga parametreler için H_{rms}-T_p-d-D (4.10) modellerinin daha iyi olduğu görülmüştür.

- 17) Düzenli ve düzensiz dalga şartlarındaki verilerin birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen tek girdili modeller yüksek bir korelasyon katsayısı vermiştir. Tek girdili modellerde farklı karakteristik dalga periyodlarından ortalama dalga periyodu, T_m, daha yüksek korelasyon katsayısına sahiptir.
- 18) Düzenli ve düzensiz dalga şartlarında derin su ve yerel dalga parametreleri kullanılarak elde edilen dört girdili modeller iyi olmasına rağmen derin su dalga parametreleri için H_{so}-T_m-d-D (RIR.4.1) ve yerel dalga parametreler için H_s-T_md-D (4.10) modellerinin daha iyi olduğu görülmüştür.
- 19) YSA ile geliştirilen modeller boru hattı altındaki oyulmayı tahmin etmede ampirik denklemlere göre daha yüksek korelasyona sahiptir.

Gelişen denizaltı teknolojileri ile birlikte denizaltı boru hatları uygulamaları kıyı mühendisliği çalışmalarının önemli konularından birini oluşturmaktadır. Düzensiz dalga etkisinde denizaltı boru hatları altında meydana gelen yerel oyulma derinliği karmaşık dalga-taban-boru etkileşimi nedeniyle halen üzerinde çalışılması gereken bir konu olup problemin çözümü için yeni yöntemlerin araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada sunulan denklem ve modellerin oyulma derinliğinin değerlendirilmesi çalışmalarında yapılacak mühendislik uygulamalarına ışık tutacağı düşünülmektedir. Yapılanlara ilave olarak aşağıdaki öneriler sıralanmıştır;

- a) Sığlaşma bölgesinde boru hatlarının dalga ortagonallerine belli bir açı ile yerleştirilmesi halinde oyulma çukurunun değişimi,
- b) Farklı dalga spektrumlarının oyulma derinliği üzerindeki etkisinin incelenmesi,
- c) HDPE gibi günümüzde yaygın olarak kullanılan esnek boru hatlarının altında oluşacak oyulma probleminin incelenmesi,
- d) Taban malzemesi olarak daha iri taneli (kum, çakıl) malzeme kullanılması halinde boru hatları etrafındaki oyulma çukurunun belirlenmesi,
- e) Modellerdeki girdi sayısı artırılarak farklı eğim şartlarını tahmin edebilecek modellerinin kurulması,
- f) Oyulma derinliği üzerinde değişik etkenleri (sıcaklık, tuzluluk gibi) ifade edebilecek farklı algoritmaların da modelleme çalışmalarında kullanılarak sonuçların YSA ile karşılaştırılması.

KAYNAKLAR

- [1] Yüksel, Y. ve Üç, S., (1993). "Akıma Yerleştirilen Engelden Dolayı Oluşan Türbülansın Tabana Etkisi", YÜD 3-4:51-62.
- [2] Prandtl, L. (1904). "In Verhandlungen des Dritten Internationalen Mathematiker-Kongress in Heidelberg", A. Krazer, ed., Teubner, Leipzig, Germany, 1905, 484.
- [3] Yüksel, Y., (2008). Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik, 3, Beta Yayınları, İstanbul.
- [4] Batchelor, G.U., (1967). An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press.
- [5] Williamson, C.H.K., (1988). "The existence of Two Stages in The Transition to Three Dimensionality of a Cylinder Wake", Phys. Fluid, 31(11):3165-3168.
- [6] Bloor, M.S., (1964). "The Transition to Turbulance in the Wake of a Circular Cylinder", J. Fluid Mech., 19:290-304.
- [7] Sümer, B.M., Jensen, B.L. ve Fresøe, J., (1991). "Effect of a Plane Boundary on Oscilatory Flow Around a Circular Cylinder", J. Fluid Mech., 225:271-300.
- [8] Gerrard, J.H., (1978). "The Wakes of Cylinder Bluff Bodies at Low Reynolds Number", Phil. Transaction of the Royal Soc., 288(A 1354):351-362.
- [9] Schewe, G., (1983). "On The Force Fluctuations Acting on a Circular Cylinder in Cross-Flow from Subcritical Up to Transcritical Reynolds Number", J.Fluid Mech., 133:285.
- [10] Hughes, W.F. ve Bringhton, J.A., (1990). "Fluid Dynamics", Schaums Outlines, Mc Graw-Hill, London.
- [11] Blevins, R.D., (1977). "Flow-induced Vibrations", Von Nostrand.
- [12] Achenbach, E. ve Heinecke, E., (1981). "On vortex Shedding from Smoth and Rough Cylinders in The Range of Reynolds Number $6x10^3$ to $5x10^6$, J Fluid Mech., 109:239-251.
- [13] Cheung, J.C.K. ve Melbourne, W.H., (1983). "Turbulance Effects on Some Aerodynamic Parameters of a Circular Cylinder at Supercritical Reynolds Number", J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 14:399-410.
- [14] Kwok, K.C.S., (1986). "Turbulance Effect on Flow Around Circular Cylinder", J.Engineering Mech., ASCE, 112(11):1181-1197.

- [15] Norberg, C. ve Sunden, B., (1987). "Turbulance and Reynols Number Effects on The Flow and Fluids Forces on a Single Cylinder in Cross-Flow", Fluid and Structures, 1:337-357.
- [16] Griffin, O.M., (1985a). "Vortex Shedding from Bluff Bodies in a Shear Flow: a Review", Trans. ASCE, J Fluids Eng., 107:278-306.
- [17] Griffin, O.M., (1985b). "The Effect of Current Shear on Vortex Shedding", Proc. Int. Symp. on Separated Flow Around Marine Structures, the Norwegian Inst. Of Technology, Trondheim, 26-28 June 1985, 91-100, Norway.
- [18] Kiya, M., Tamura, H. ve Arie, M., (1980). "Vortexs Shedding from Circular Cylinder in Moderate Reynolds Number Shear Flow", J. Fluid Mech., 141:721-735.
- [19] Maull, D.J. ve Young, R.A., (1973). "Vortex Shedding from Bluff Bodies in a Shear Flow", J. Fluid Mech., 60:401-409.
- [20] Bearman, P.W. ve Zdravkovich, M.M., (1978). "Flow Around a Circular Cylinder Near a Plane Boundary", J. Fluid Mech., 89(1):33-48.
- [21] Jensen, B.L. ve Sümer, B.M., (1986). "Boundary Layer a Cylinder Placed Near a Wall", ISVA, 64:31-39.
- [22] Grass, A.J., Raven, P.W.J., Stuart, R.J. ve Broy, J.A., (1984). "The Influence of Boundary Layer Velocity Gradients and Bed Proximity on Vortex Shedding from Free Spanning Pipelines", J. of Energy Res. Technology, 106:70-78.
- [23] Raven, P.W.C., Stuart, R.J. ve Littlejohns, P.S., (1985). "Full-Scale Dynamic Testing of Submarine Pipeline Span", 17rd. Annual OTC in Houston, 6-9 Mayıs 1985, Texas, 5005.
- [24] Angrilli, F., Bergamaschi, S. ve Cossalter, V. (1982). "Investigation of Wall-Induced Modifications to Vortex Shedding from a Circular Cylinder", J. Fluid Eng., 104:518-522.
- [25] Jensen, B.L., Sümer, B.M., Jensen, H.R. ve Fredsøe, J., (1990). "Flow Around and Forces on a Pipeline Near a Sourced Bed in Steady Current", J. of Offshore Mech. Artic Engrg., 112:206-213.
- [26] Lei, C., Cheng, L. ve Kavanagh, K. (1999). "Re-Examination of The Effect of a Plane Boundary on Force and Vortex Shedding of a Circular Cylinder", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 80:263-286.
- [27] Choi, J.H. ve Lee, S., J., (2000). "Ground Effect of FLow Around on Elliptic Cyliner in a Turbulent Boundary Layer", Journal of Fluids and Structures, 14:697-709.
- [28] Zovatto, L. ve Pedrizzetti, G., (2001). "Flow About a Circular Cylinder Between Parallel Walls", Journal of Fluid Mech., 440:1-25.
- [29] Price, S.J., Sumner, D., Smith, J.G., Leong, K. ve Paidoussis, M.P., (2002). "Flow Visualizatio Around a Circular Cylinder Near to a Plane Wall", Journal of Fluids and Structures, 16:175-191.
- [30] Hatipoğlu, F. ve Avcı, İ., (2003). "Flow Around a Partly Buried Cylinder in a Steady Current", Ocean Engineering, 30:239-249.

- [31] Straatman, A.G. ve Martinuzzi, R.J., (2004). "An Examination of The Effect Boundary Layer Thickness on Vortex Shedding from Square Cylinder Near a Wall", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91:1023-1037.
- [32] Wu. M.H., When, C.Y., Yen, R.H., Weng, M.C. ve Wang, A.B., (2004). "Experimental and Numerical Study of The Seperation Angle for Flow Around a Circular Cylinder at Low Reynolds Number", J. Fluid Mech., 515:233-260.
- [33] Testik, F.Y., Voropayev, S.I., Fernando ve H.J.S., (2005). "Flow Around a Short Horizontal Bottom Cylinder Under Steady and Oscillatory Flows", American Institute of Physics, 17(047103):1-12.
- [34] Achenbah, E. ve Heinecke, E., (1981). "On Vortex shedding from Smooth and Rough Cylinders in The Range of Reynolds Numbers 6x10³ to 5x10⁶", J. Fluid Mech., 109:239-251.
- [35] Öner, A.A., (2007). Dairesel Kesitli Yatay Elemanlar etrafındaki Akımın Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [36] Sarpkaya, T., (1976a). "In-Line and Transverse Forces on Smooth and Sand-Roughened Cylinders in Oscillatory Flow at High Reynolds Number. Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- [37] Sarpkaya, T. ve Rajabi, F., (1979). "Hydrodynamic Drag on bottom Mounted Smooth and Rough Cylinders in Periodic Flow", OTC, 3761:219-226.
- [38] Lundgren, H., Mathiesen, B. ve Gravesen, H., (1976). "Wave Loads on Pipelines on The Seafloor", Proc. 1st. Intl. Conf. on The Behaviour of Offshore Structures, 1976.
- [39] Jacobsen, V., Bryndum, M.B. ve Fredsøe, J., (1984). "Determination of Flow Kinematics Close to Marine Pipelines and Their Use in Stability Calculations", Proc. Annual Offshore Tech. Conf., England, 1984, 4833.
- [40] Ali, N. ve Narayanan, R., (1986). "Forces on Cylinder Oscillating Near a Plane Boundary", Proc. 5th. Intl. Offshore Mech. and Arctic Eng. (OMHAE) Symp., Tokyo, Japan, 3:613-619.
- [41] Justesen, P., (1989). "Hydrodynamic force on Large Cylinders in Oscillatory Flow", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineeging, ASCE, 115(4):497-514.
- [42] Bearman, P.W., Graham, J.M.R. ve Singh, S., (1979). "Forces on Cylinders in Harmonically Oscillating Flow", Proc. Symp. on Mechanics of Wave Induced Forces on Cylinders, Ed. T.L. Shaw, 437-449, Bristol.
- [43] Singh, B., (1979). Forces on Bodies in Oscillatory Flow. PhD. Thesis, Univ., London
- [44] Grass, A.J. ve Kemp, P.H., (1979). "Flow Visualization Studies of Oscillatory Flow Past Smooth and Rough Circular cylinders", Proc. Symp. on Mechanics of Wave-Induced Forces on Cylinders, Bristol, ed. T.L. Shaw, Pitman, 406-420.

- [45] Bearman, P.W. ve Graham, J.M.R., (1979). "Hydrodynamic Forces on Cylindirical Bodies in Oscillatory Flow", Proc. 2nd Intl. Conf. on The Behaviour of Offshore Structures, 1:309-322, London.
- [46] Bearman, P.W., Graham, J.M.R., Naylor, P. ve Obasaju, E.D., (1981). "The Role of Vortices in Oscillatory Flow About Bluff Cylinders", Proc. Int. Symp. on Hydrodyn. İn Ocean Engr., 11:621-643, Trandheim, Norway.
- [47] Williamson, C.H.K., (1985). "Sinusiodal Flow Relative to Circular Cylinders", J. Fluid Mech., 155:141-174.
- [48] Honji, H., (1981). "Streaked Flow Around an Oscillating Circular Cylinder", J. Fluid Mech., 107:509.
- [49] Sarpkaya, T., (1986a). "Force on a Circular Cylinder in Viscous Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter Numbers", J. Fluid Mech., 165:61-71.
- [50] Hall, J., (1984). "Streaked Flow Around on Oscillatory Circular Cylinder", J. Fluid Mech., 107-509-520.
- [51] Sümer, B.M. ve Fredsøe, J., (2002). "The Mechanics of Scour in The Marine Enviorenment", 17th. Advanced Series on Ocean Engineering, Singapore.
- [52] Grass, A.J. ve Kemp, P.H., (1979). Flow Visualization Studies of Oscillatory Flow Past Smooth and Rough Circular Cylinders, Ed. T.L. Shaw, 406-420, Bristol.
- [53] Bearman, P.W. ve Graham, J.M.R., (1979). "Hydrodynamic Forces on Cylindrical Bodies in Oscillatory Flow", Proc. 2nd. Intl. Conf. on The Behaviour of Offshore Structures, 1:309-322, London.
- [54] Tatsuno, M. ve Bearman, P.W., (1990). "A visual Study of The Flow Around an Oscillating Circular Cylinder at Low Keulegan-Carpenter Numbers and Low Stokes Numbers", J. Fluid Mech., 211:157-82.
- [55] Raven, P.W.C., Stuart, R.J. ve Littlejohns, P.S., (1985). "Full-Scale Dynamic Testing of Submarine Pipeline Span", 17th Annual OTC in Houston, 6-9 May 1985, 5005.
- [56] Bearman, P.W., (1985). "Vortex Trajectories in Oscillatory flow", Proc. Int. Symp. on Seperated Flow Around Marine Structures, The Norwegian Inst. of Technology, 26-28 June 1985, 133-153, Norway.
- [57] Sawamato, M., Kikuchi, K., Ohba, M. ve Kashimai, J. (1980). "Force on a Circular Cylinder in an Oscillatory Flow", Coastal Enigeering, 23:147-58.
- [58] Obasaju, E.D., Bearman, P.W. ve Graham, J.M.R., (1988). "A Study of Forces, Circulation and Vortex Patterns Around a Circular Cylinder in Oscillating Flow", J. Fluid Mech., 196:467-94.
- [59] Jensen, H.R., Jensen, B.L., Sümer, B.M. ve Fredsøe, J., (1989). Flow Visualization and Numerical Simulation of The Flow Around marine Pipelines on an Erodible Bed, Proc. 8th Int. Conf. on Offshore Mech. and Arctic Engrg., ASME, 129-136.
- [60] Hayashi, T. ve Ohashi, M., (1981). "A Dynamical and Visual Study on The Oscillatory Turbulent Boundary Layer", Third Symposium on Turbulent Shear Flow Flow, 8186.

- [61] Medeiros, E.F., Miksad, R.W. ve Clemens, N.T., (1996). "A Lift Force Model Featuring Velocity Measurements Around a Cylinder in a Reversing Flow", Proceedings of Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles, 3:471477.
- [62] Medeiros, E.F., Brandao, M.P. ve Miksad, R.W., (1977). "Experimental Near Field Flow Maps of a Cylinder in a Reversing Flow", Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 3:710-7.
- [63] Bruce, T. ve Easson, W.J., (1992). "The Kinematic of Wave Induced Flows Around Near Bed Pipelines", Coastal Engineering, Proceedings of The 23rd International Conference, 2991-8.
- [64] Sibetheros, I.A., Miksad, R.W., Ventre, A.V. ve Lambrakos, K.F., (1994). "Flow Mapping of The Reversing Vortex Make of a Cylinder in Planar Harmonic Flow", Proceedings of The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, OSKA, 3:406-12.
- [65] Sunahara, S. ve Kinoshita, T., (1994). "Flow Around Circular Cylinder Oscillating at Low Keulegan-Carpenter Number", Proceedings of The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conforence, Osaka, 3:476-83.
- [66] Mouaze, D. ve Belorgey, M., (2004). "Flow Visualisation Around a Horizontal Cylinder Near a Plane Wall and Subject to Waves", Applied Ocean Research, 25:195-211.
- [67] Chaplin, J.R., (1981). "On The Irrotational Flow Around a Circular Cylinder in Waves", J. Appl Mech., Trans ASME, 48(4):689-94.
- [68] Jensen, B.L. ve Roll, P., (1989). "Visualization of The Flow Around Cylinders at Small KC Numbers", Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical Unisersity of Denmark, 69:7988.
- [69] Sümer, B.M. ve Fredsøe, J., (1997). "Hydrodynamics Around Cylindrical Structures", World Scientific Publishing Company Pte. Ltd.
- [70] Jarno, A., (1989). Interaction Houle-Cylindre a faible Nombre de Keulegan-Carpenter, PhD Thesis, University of Le Havre, France.
- [71] Sakout, A., (1992). Analyse des Actions de la Houle sur un Cylindre Horizontal a Proximite d'une Paroi Plane, PhD Thesis, University of Le Havre, France.
- [72] Lambert, E., (1994). Analyse des Effects de Proximite dans l'Action de la Houle sur un Couple de Cylinders Horizontaux, PhD Thesis, University of Le Havre, France.
- [73] Sümer, B.M., Pederson, C., Yu, D. ve Fredsøe, J., (1990). "Bed Shear-Stress Measurements in The Vicinity of a Pipeline in Waves", Prog. Rep.71, Inst. Hydrodyn and Hydraulic Eng. Tech. Univ., Denmark.
- [74] Mao, Y., (1986). "the Interaction Between a Pipeline on Erodible Bed", PHD, Tech. Univ., Denmark, Inst. Of Hydrodyn. And Hydraulic Engrg., Denmark.
- [75] Chiew, Y.M., (1990). "Mechanics of Local Around submaribe Pipelines", J.Hydraulic Eng., ASME, 116(4):515-529.

- [76] Sümer, B.M. ve Fredsøe, J., (1991). "Onset of Scour Below a Pipeline Exposed to Waves, Intl. J. Offshore and Polar Eng., 1(3):189-194.
- [77] Klomp, W.H.G., Hansen, E.A., Chen, Z., Bijker, R. ve Bryndum, M.B., (1995). "Pipeline Seabed Interaction, Free Span Development", Proc. 5th Intl. Offshore and Polar Eng. Conf., The Hague, The Netharlands, 3:117-122.
- [78] Mao, Y., (1988). "Seabed Scour Under Pipelines", Proc. 7th Intl.Conf. on Offshore Mech. and Arctic Eng., Houston, Texas, 5:33-38.
- [79] Sumer, B. M. ve Fredsoe, J., (2001a). "Wave Scour around a Large Vertical Circular Cylinder" ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 127(3): 125 134.
- [80] Sümer, B.M. ve Fredsøe, J.0 (2002). "The Mechanics of Scour in The Marine Enviroment", World Scientific, Signapore.
- [81] Sümer, B.M. ve Fredsøe, J., (1990). "Scour Below Pipelines in Waves", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. Div, ASCE, 116(3):307-323.
- [82] Sümer, B.M., Mao, Y. ve Fredsøe, J., (1988). "Interaction Between Vibrating Pipe and Erodible Bed", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 114(1):81-92.
- [83] Chao, L. ve Hennessy, D.V., (1972). "Local Scour Under ocean Outfall Pipelines", J. Pollution Control Federation, 44:1443-1447.
- [84] Kjeldsen, S.P., Gjorsvik, C. ve Bringaker, K.G., (1980). "Local Scour Around Submarine Pipelines", Proc. 6th Intl. Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions Conf., 201-217.
- [85] Littlejohns, P.S.G., (1977). "A Study of Scour Around Submarine Pipelines", Hydraulic Research Station, Wallingford.
- [86] Herbich, J.B., (1981). "Offshore Pipelines Design Elements", Maecell Dekker Inc., Newyork.
- [87] Bijker, E.W. ve Leeuwenstein, w., (1984). "Interaction Between Pipelines and The Seabed Under The Influence of Waves and Currents", Seabed Mechanics, B.Dennes, Graham and Trotman, Gettysburg, Md., 235-242.
- [88] İbrahim, A. ve Nalluri, C., (1986). "Scour Prediction Around Marine Pipelines", Proc. 5th Intl. Symp. On Ofshore Mech. and Arctic Eng. Tokyo, Japon, ASME,3:679-684
- [89] Kristiansen, Ø., (1988). "Current Induced Vibrations and Scour of Pipelines on A Sandy Bottom, PhD, Doctorate, Thesis presented to The University of Trondheim, Norway.
- [90] Kristiansen, Ø., ve Torum, A., (1989). "Interaction Between Current Induced vibrations and Scour of Pipelines on A Sandy Bottom", Proceedings of The 8th Inter. Conf. On Offshore Mech. and Arctic Eng., ASME, Netherlands, 19-23 May 1989, 167-174.
- [91] Chiew, Y.M., (1991). "Prediction of Maximum Scour Depth at Submarine Pipelines", J. Hydraulic Eng., 117(4):452-465.

- [92] Kjeldsen, S.P., Gjorsvik, C., Bringaker, K.G. ve Jacobsen, J., (1973). "Local scour Near Offshore Pipelines", Proc. 2nd Intl. Port and Ocean Eng. Under Arctic Conditions Conf., 308-331.
- [93] Coleman, N.L., (1971). "Analyzing Laboratory Measurements of Scour at Cylindrical Piers in Sand Beds", 16th Congress of IAHR, Paris.
- [94] Lucassen, R.J., 81984). "Scour Underneath Submarine Pipelines", Mats Report PL-4ZA, Netherlands.
- [95] Yasa, R., (2011). "Prediction of The Scour Depth Under Submarine Pipelines in Waves Condition", J. Of Coastal Research, SI(64), 627-630, Poland.
- [96] Çevik, E. ve Yüksel, Y., (1999). "Scour Under Submarine Pipelines in Waves in Shoaling Conditions", J. Hydraulic Engineering, ASCE, 125(1):1-11.
- [97] Pue, Q., Li, K. ve Gao, F.D., (2001). "Scour of The Seabed Under a Pipeline in Oscillating Flow", China Ocean Engineering, 15:129-137.
- [98] Mousavi, M.E., Bakhtiary, A.Y. ve Enshaei, N., (2009). "The Equivalent Depth of Wave-Induced Scour Around Offshore Pipelines", J. of Offshore Mech. and Arctic Eng. Transactions of The ASME, 131.
- [99] Etemad-Shadidi, A., Yasa, R. ve Kazeminezhad, M.H., (2010). "Prediction of Wave-Induced Scour Depth Under Submarine Pipelines Using Machine Learning Approach", Applied Ocean Research, 2010.
- [100] Jensen, H.R., Jensen, B.L., Sümer, B.M. ve Fredsøe, J., (1989). "Flow Visualition and Numrical simulation of The Flow Around Marine Pipelines on an Erodible Bed", Proc. 8th Int. Conf. nn Offshore Mech. and Arctic Engrg., ASME, 1989, 129-136.
- [101] Bernetti, R., Brushi, R., Valentini, V. ve Venturi, M., (1990). "Pipelines Placed on Erodible Seabeds", Proc. of The 9th Intl. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Eng., Houston, Texas, ASME, 5:155-164.
- [102] Hansen, E.A., (1992). "Scour Below Pipelines and Cables, a Simple Model", 11th Offshore Mech. and Arctic Eng. Conf., Calgary, Canada, ASME, 5(A)133-138.
- [103] Sumer, B. M., ve Fredsoe, J., (1996). Hydrodynamics Around Cylindrical Structures. Adv. Ser. On Ocean Eng., 12, World Scientific.
- [104] Çevik, E. (1997), "Dalga Etkisinde Denizaltı Boru Hatları ve Deniz Taban Etkileşiminin Modellenmesi", Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [105] Iwagaki, Y., Shiota, K. ve Doi, H., (1982). "Shoaling and Refraction Coefficient of Finite Amplitude Waves", Coastal Eng., Jpn., 25:25-35.
- [106] Swift, R.H. ve Dixon, J.C., (1987). Transformation of Regular Waves, Proc. of Inst. Civil Eng., Part 2, 83:359-380.
- [107] Kamphuis, J.W., (1991). "Wave Transformation", J. Coastal Engineering, 15:173-184.
- [108] Yüksel, Y. ve Narayanan, R., (1994a). "Breaking Waves Forces on Horizontal Cylinders Close to The Sea Bed", Coastal Eng., 23:115-133.

- [109] Alpet, C.J. ve Piorewicz, (1987). "Laboratory Studies Breaking Wave Forces Acting on Vertical Cylinder in Shallow Water", J. Coastal Eng., 11:263-282.
- [110] Singamsetti, S.R. ve Wind, H.G., (1980). "Breaking Wave Charecteristics of Shoaling and Breaking Periodic Waves Normally Incident to Plane Beaches Constant Slope", Delft Hyd. Lab. Rep. M 1371.
- [111] SPM. 1984. "Shore Protection Manual", 4t^h US Army Engr. Waterways Expt. Station, Coastal Eng. Res. Center, US Govt. Printing Office, Washington, DC.
- [112] Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., ve Narayanan, R., (1996). Hydraulic Structures, E and FN Spon Second Edition.
- [113] Battjes, J.A., (1974). "Surf Similarity", Coastal Eng. Conf, Copenhagen, Denmark.
- [114] Çevik, E. Ö. ve Yüksel, Y., (1999) Scour under submarine pipelines in waves in shoaling Conditions, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol.125, 9-19.
- [115] Yüksel, Y. ve Narayanan, R., (1994a). "Waves forces on Horizontal Cylinder Resting on Slopping Bottom", Intl. J. Offshore and Polar Eng., 11:85-92.
- [116] Chakrabarti, S.K., (1980). "Laboratory Generated Waves and Wave Theories", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, 349-368.
- [117] Horikawa, K., (1978). "Coastal Engineering", University of Tokyo Press.
- [118] Hallermier, R.J., (1984). "Waves Cuts in Sand Slope Applied to Coastal Models" J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 110(1):34-39.
- [119] Myraugh, D., Ong, M.C. ve Gyengedal, C., (2008). "Scour Below Marine Pipelines in Shoaling Condition for Random Waves", Coastal Eng., 55(12):1219-1223.
- [120] Mendez, F.J., Losada, I.J., ve Medina, R., (2004). "Transformation Model of Wave Height Distribution on Planar Beaches", Coastal Eng., 50(3):97-115.
- [121] Shen, H.W., Ogawa, Y. ve Karaki, S.S., (1965). "Time Variation of Bed Deformation Near bridge Piers", Proc. of The 11th IAHR Congress, Leningrad, USSR, 3:1-9.
- [122] Cartens, M.R., (1986). "Similarity Laws for Localized Scour", Journal of The Hydrodynamics Division, ASCE, 92(3):13-36.
- [123] Hjorth, P., (1977). "A Stochastic Model of Progressive Scour", International Symposium on Stochastic Hydraulic, University of Lund, Sweeden.
- [124] Einstein, H.A., (1950). The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, Washington, DC, USA, Technical Bulletin 1026.
- [125] Johnsen, P.A, ve McCuen, R.H., (1991). "A Temporal, Spatiol Pier Scour Model", Transportation Research Record, 1319:143-149.
- [126] Fredsøe, J., Sümer, B.M. ve Arnskov, M.M., (1991). "Time scale for Wave/Current Scour Below Pipelines", In Proceedings of The First International Offshore and Polar Engineering Conforence, 11-16 August 1996, Edinburgh.

- [127] Fredsøe, J., Sümer, B.M. ve Arnskov, M.M., (1992). "Time Scale for Wave/Current Scour Below Pipelines", Intl. J. of Offshore and Poalr Eng., 2(1):13-17.
- [128] Harris, J.M., Whitehouse, R.J.S. ve Bensen, T., (2009). "The Time Evolution of Scour Around Offshore Structures", Proceedings on The Institution of Civil Engineers, 2010, 3-17.
- [129] Escarameria, M. ve May, R.W.P., (1999). "Scour Around Structures in Tidal Flow", HR Wallingford, Wallingford, Report SR.521.
- [130] Jensen, M.S., (2006). "Prediction of Scour", Offshore Wind Turbines Situated in Areas with Strong Currents, Denmark, 9 February.
- [131] Breusers, H.N.C., Nicollet, G. ve Shen, H.W., (1977). "Local Scour Around Cylinder Piers", Journal of Hydraulic Research, IAHR, 15(3):211-252.
- [132] Whitehouse, R., (1988). "Scour at Marine Structures", Thomas Telford, London.
- [133] Whitehouse, R., Harris, J. ve Sutherland, J., (2006). "Scour at Coastal Structure", In Proceedings of The 3rd International Conf. on Scour and Eresion, 1-3 November 2006, Amsterdam, Holland, 52-59.
- [134] Nilsen, A.W. ve Hansen, E.A., (2007). "Time-varying Wave and Current-Induced Scour Around Offshore Wind Turbines", In Proceedings of The 26th International Conf. on Offshore Mech. Arctic Eng., 10-15 June 2007, San Diego, California, USA.
- [135] Sümer, B.M., Christiansen, N. ve Fredsøe, J., (1992a). "Time Scale of Scour Around a Vertical Pipe", In Proceedings of The 2nd International Offshore and Polar Engineering Conf., San Francisco, USA, 3:308-315.
- [136] Richardan, E.V. ve Davis, S.R., (2001). "Evaluting Scour at Bridges", Hydrodynamic Engineering Circular, 18:01-001, Washington, DC, US.
- [137] Rudolph, D. ve Bos, K.J., (2006). "Scour Around a Monopile Under Combined Wave–Current Conditions and Low KC-numbers", In Proceedings of the 3rd International Conference on Scour and Erosion, 1–3 November, 2006, Amsterdam.
- [138] Boon, J.H., Sutherland, J. ve Whitehouse, R., (2004). "Scour Behaviour And Scour Protection for Monopile Foundation of Offshore Wind Turbunes" In Proceedings of The 2004 Europen Wind Energy Conf., London.
- [139] Hansen, E.A., Fredsøe, J. ve Mao, Y., (1986). "Two Dimensional Scour Below Pipelines", 5th International Symp. on Offshore Mech. And Arctic Eng., ASME, 3:670-678.
- [140] Sümer, B.M., Jensen, H.R., Mao, Y. ve Fredsøe, J., (1988b). "The Effect of Lee-Wake on Scour Below Pipelines in Current", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 144(5):447-496.
- [141] Kozkiewicz, A., Fredsoøe, J. ve Sümer, B.M., (1995). "Forces on Pipelines in Oblique Attacks Steady Current and Waves", Proc. 5th International Offshore and Polar Engineering Conf., ISOPE, The Netherlands, 2:174-183.

- [142] Westerhortman, J.H., Machemehl, J.L. ve Jo, C.H., (1992). "Effect of Pipe Spacing on Marine Pipeline Scour", Proc. 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, 2:101-109.
- [143] Zhao, Z.H. ve Fernando, H.J.S., 2007. "Numerical Simulation of Scour Around Pipelines Using an Euler-Euler Coupled Two-Phase Model", Environmental Fluid Mechanics, 7:21-142.
- [144] Sidek, F.J. ve İbrahim, A.A., (1992). "The Armouring Effects of Shell Fragments in Seabed Beneath Pipelines", Proceedings of the 2nd Inter. Offshore and polar Eng. Conf. (ISOPE), San Francisco, USA, 14-19 June 1992, 92-100.
- [145] Pluim-vander Velden, E.T.J.M. ve Bijker, E.W. (1992). "Local Scour Near Submarine Pipelines on a Cohesive Bottom", Proc. 6th International conforonce, 1-10 July 1992, Tech and Medicine, London, Bentham Press.
- [146] Chiew, Y.M., (1991a). "Flow Around Horizontal Circular Cylinder in Shallow Flows", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASME, 117(2):120-135.
- [147] Monacada. M., A.T. ve Aguirre-Pe, J., (1999). "Scour Below Pipelines in river Crossing", J. Hydr. Engrg., ASCE, 125(9):953-958.
- [148] Sumer, B.M., Fredsøe, J., Christensen, S. ve Lind, M.T., (1999). "Sinking/Floatation of Pipelines and Other Objects in Liquefied Soil Under Waves", Coastal Eng., 53-90.
- [149] Groven, H. ve Fredsoøe, J., (1983). "Modelling of Liquefaction, Scour and Natural Backfilling Process in Relation to Marine Pipelines", Offshore Oil and Gas Pipeline Technology, Europen Seminar, Copenhagen.
- [150] Leeuwestien, W., (1985). "Natural Self-Burial of Submarine Pipelines, MATS-Stability of Pipelines, Scour and Sedimentation", Coastal Eng. Group, Department of Civil Eng., Delft Univ. Of Tech., Delft, The Netherlands.
- [151] Fredsoøe, J., Hansen, E.A., Mao, Y. ve Sümer, B.M. (1988). "Three-Dimensional Scour Below Pipelines", j. of Offshore Mech. and Arctic Eng., 110:373-379.
- [152] Bernetti, R., Bruschi, R., Valentini, V. ve Venturi, M. (1990). "Pipelines Placed on Erodible Seabeds", Proceedings of the 9th Intl. Conf. on Offshore Mech. and Artic Eng., Houston, Texas, ASME, 5:155-164.
- [153] Hansen, E.A., Staub, C., Fredsoøe, J. ve Sümer, B.M., (1991). "Time Development of Scour Induced Free Spans of Pipelines", Proceedings of The 10th Offhsore Mechanics and Arctic Eng. Conf., Stavanger, Norway, Pipeline Tech.(5), ASME, 25-31.
- [154] Yeow, K., (2007). "Three Dimensional Scour Along Offshore Pipelines", Phd, School of Civil & Resource Engineering The University of Western Australia, Australia.
- [155] Brørs, B., (1999). "Numerical Modelling of Flow and Scour at Pipelines", J. Hydraulic Eng., ASCE, 125(5):511-523.
- [156] Li, F. ve Cheng, L., (1999). "A Numerical Model for Local Scour Under Offshore Pipelines", J. Hydr. Engrg., 12584):400-406.

- [157] Li, F. ve Cheng, L., (2002). "Mathematical Modelling of Time-Dependent Scour Below Offshore Pipelines", Personal Communication.
- [158] Liang, D. ve Cheng, L., (2005a). "A Numerical Model for Wave-Induced Scour Below a Submarine Pipeline", J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASME, 131(5).
- [159] Liang, D.F., Cheg, L. ve Li, F., (2004). "Numerical Modelling of Scour Below a Pipeline in current", Part I: Flow Simulation, Coastal Engineering, 52(1):25-42.
- [160] Liang, D.F., Cheng, L. ve Li, F., (2004). "Numerical Modelling of Scour Below a Pipeline in Currents", Part II: Scour simulation, Coastal Eng., 52(1):43-62.
- [161] Liang, D. ve Cheng, L., (2005a). "A Numerical Model for Wave-Induced Scour Below a Submarine Pipelines", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 131(5).
- [162] Kambekar, A.R. ve Deo, M.C., (2003). "Estimation of Pile Group Scour Using Neural Netwroks", Applied Ocean Research, 25:225-234.
- [163] Bateni, S.M., Borghei, S.M. ve Jeng, D.S., (2007a). "Neural Network and Neuro-Fuzzy Assessments for Scour Depth Around Bridge Piers", Engineering Aplications of Artifical Inteligence, 20:401-414.
- [164] Bateni, S.M., Jeng, D.S. ve Melville, B.W. (2007b). "Bayeisan Neural Networks for Prediction of Equilibrium and Time Dependent Scour Depth Around Bridge Piers", Advance in Eng. Software, 38:102-111.
- [165] Kazeminezhad, M.H., Etemad-Shahidi, A. ve Bakhtiary, A.Y., (2010). "An Alternative Approach for Investigation of The Wave-Induced Scour Around Pipelines", Journal of Hydroinformatics, 12:51-65.
- [166] Yüksel, Y. ve Çevik, E., (2009). Kıyı Mühendisliği, 1, Beta Basım Yayım A.Ş., İstanbul.
- [167] I.A.H.R./P.I.A.N.C., (1986). List of Sea State Parameters, Supplement to IAHR Bulletin, No 52.
- [168] Goda, Y., (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures, Advanced Series on Ocean Engineering, 15, World Scientific.
- [169] CIRIA, CUR, CETMEF, (2007). The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering, Second Edition, London.
- [170] Hughes, S.A., ve Borgman, L.E., (1987). "Beta-Rayleigh Probability Distribution for Shallow Water Wave Heights," Coastal Hydro., R.A. Dalrymple, ed., 1:17-31.
- [171] Glukhovskiy, B.Kh., (1966). Investigation of Sea wind Waves, Gidrometeoizdat, Leningrad, 283, Russian.
- [172] Battjes, J.A. ve Groenendijik, H.W., (2000). "Wave height Distrubitions on Shallow Foreshore", Coastal Eng., 40:161-182.
- [173] Goda, Y., (1970). "A Synthesis of Breaker Indices", JSCE., 2:227-230.
- [174] Kimura, A., (1980). "Statistical Properties of Random Wave Groups", Proc. 1th Coastal Engr. Conf., 2: 2955-2973.
- [175] Funke, E.R. ve Mansard, E.P.D., (1980). "On the Synthesis of Realistic Sea State," Proc. 17th Coastal Engr. Conf., Vol 2, pp 2974-2991.
- [176] Young, I.R., Van Vledder, G.Ph., (1993). The Central Role of Nonlinear Interactions in Wind-Wave Evolution, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A 342, 505–524.
- [177] Rogers, D. ve King, G.B., (1997). Wave Generation Using Ocean and Wave, Edinburgh Designs Ltd., 1997.
- [178] Bretschneider, C.L. (1959). Wave Variability and Wave Spectra for Wind-Generated Gravity Waves, U.S. Army Corps of Engrs., Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 118.
- [179] Bretschneider, C.L. (1969). Wave Forecasting, Chapter 11 in Handbook of Ocean and Underwater Engineering, J. J. Myers et al., eds., McGraw-Hill Book Co., New York.
- [180] Battjes, J.A., (1984). Short Waves, IHE Lecture Notes, Delft.
- [181] Van der Meer, J.W., Briganti, R., Zanuttigh, B., Wang ve B., 2005. "Wave Transmission and Reflection at Low Crested Structures: Design Formulae, Oblique Wave Attack and Spectral Change", Coastal Eng. 52 (10-11), 915– 929.
- [182] Dean, R.G., (1977). Equilibrium Beach Profiles, US Atlantic and Gulf Coasts Tech. Rep., 12, Univ. Of Delaware, New York.
- [183] Dean, R.G., (1973). "Heuristic Models of Sand Transport in The Surf Zone", Inst. Eng. Aust., Eng. Dynamics of The Coatal Zone, Proc. 1st Australian Conf. Coastal Eng., 208-214, Sydney.
- [184] Fırat M. ve Güngör M., (2004), Askı Madde Konsantrasyonu ve Miktarının Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi, İMO Teknik Dergi, 3267-3282.
- [185] Takçı, H., (2010). Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları, GYTE.
- [186] Tavşanoğlu, V., (2010). Yıldız Teknik Üniversitesi Ders Notları.
- [187] Uğur, A. ve Kıncı, A.C., (2005). İnternet Üzerinde Yapay Zeka ve Yapay Sinir Ağları, Ege Üniversitesi Bilgisayar Müh. Bölümü.
- [188] Öztemel, E., (2003). Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- [189] Kakıcı, A., (2009). Yapay Sinir Ağlarına Giriş, Karadeniz Teknik Üniversitesi,Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.
- [190] Elmas, Ç., (2003). Yapay Sinir Ağları, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [191] Şen, Z., (2004). Yapay Sinir Ağları İlkeleri, Su Vakfı Yayınları.
- [192] Levenberg, K., (1944). A Method for The Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares, The Quarterly of Applied Mathematics 2:164-168.
- [193] Marquardt, D., (1963). An Algorithm for Least-Lquares Estimation of Nonlinear Parameters, SIAM journal on Applied, 11:431-441.

[194] Aydoğan, B., (2011). İstanbul Boğazı Akıntı Yapısının İstatistik ve Belirsizlik Yöntemleri ile Modellenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	: Burak KIZILÖZ
Doğum Tarihi ve Yeri	: 13.11.1978 Üsküdar
Yabancı Dili	: İngilizce
E-posta	: burakkiziloz@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği	Sakarya Üniverstesi	2003
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Sakarya Üniverstesi	2001
Lise	Fen Bilimleri	Kadir Has Anadolu Lisesi	1997

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2001-2003	Gebze Organize Sanayi Bölgesi	Şantiye Şefliği
2005	Kocaeli Büyükşehir Belediyesi-İSU	Altyapı Şantiye Şefi