

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DALGA ETKİSİNDEKİ DENİZ DEŞARJ BORULARININ  
DİNAMİK DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisi Muhammet Ensar YİĞİT**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği**

**Programı : Hidrolik**

**MANİSA 2010**

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DALGA ETKİSİNDEKİ DENİZ DEŞARJ BORULARININ  
DİNAMİK DAVRANIŞININ MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisi Muhammet Ensar YİĞİT**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 Haziran 2010**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Haziran 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Bekir SOLMAZ**  
**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ümit GÖKKUŞ (C.B.Ü.)**  
**: Yard. Doç. Dr. B. Burak ÖZHAN (C.B.Ü.)**

**MANİSA 2010**

## İÇİNDEKİLER

SEMBOL LİSTESİ .....	IV
ŞEKİL LİSTESİ .....	IX
ÇİZELGE LİSTESİ .....	XI
KISALTMALAR LİSTESİ .....	XII
TEŞEKKÜR .....	XIII
ÖZET .....	XIV
ABSTRACT.....	XV
1.0. GİRİŞ.....	1
2.0. DENİZ DEŞARJ BORULARININ HİDROLİK TASARIMI.....	2
2.1. Hidrolik Tasarım Kriterleri .....	2
2.1.1. Hız hesabı.....	2
2.1.2. Delik Çap ve Aralık Sayılarının Hesaplanması.....	2
2.2. Minimum Hidrolik Yük Hesabı.....	3
2.2.1. Sürekli Yük Kaybı.....	3
2.2.2. Yoğunluk Farkından İleri Gelen Yük Kaybı.....	4
2.2.3. Gelgit Yük Kaybı.....	6
2.2.4. Yersel Yük Kaybı.....	6
2.2.5. Difüzördeki Yük Kayıpları.....	6
2.3. Su Darbesi Hesabı.....	13
2.4. İmpuls-Momentum Hesabı.....	17
3.0. STABİLİTE HESABI.....	23
3.1. Deniz Borularının Stabilesini Etkileyen Kuvvetler.....	23
3.2. Zemine Gömülü Borulara Etkiyen Zemin Yükü ve Yatak Katsayısı .....	27
3.2.1. Zemin Yükü.....	27
3.2.2. Yatak Katsayısı.....	30
3.3. Yatay ve Düşey Stabillite Hesabı.....	32
4.0. DALGA VE DERPEM KUVVETLERİ.....	33
4.1. Dalga Kuvvetleri (Lineer Teori); .....	33
4.1.1 Hidrodinamik Dalga Kuvvetleri.....	41
4.1.2. Morison Denklemi Geçerlilik Ortamının Belirlenmesi.....	41
4.1.3. Hidrodinamik Kuvvet Katsayılarının Seçimi.....	42

4.1.4. Morison Denklemleri.....	48
4.1.5. Hidrodinamik Kaldırma Kuvveti.....	49
4.2. Derinlik Sınıflamalarına Göre Dalga Hareketi.....	50
4.4. Deprem Kuvveti.....	53
4.4.1. Yapıların Yer Hareketi Etkisindeki Titreşimi.....	53
4.4.2. Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde Deprem Etkisi.....	53
5.0.DİNAMİK ANALİZ ESASLARI.....	57
5.1. Genelleştirilmiş Tek serbestlik Dereceli Sistem.....	57
5.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistem.....	61
6.0. UYGULAMA.....	65
6.1. Tedrici Değişken Kesitli Tabana Serbest Oturan Difüzör Tasarımı.....	66
6.1.1. Difüzörün Hidrolik Hesabı.....	66
6.1.2. Stabilité Analizi .....	68
6.1.3. Dinamik Analiz.....	82
6.1.3.1. Düşey Düzlemde Dinamik Analiz.....	82
6.1.3.2. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz.....	88
6.2. Zemine Gömülü Kademeli Değişken Kesitli Difüzör Tasarımı.....	93
6.2.1. Hidrolik Tasarımı.....	93
6.2.2. Stabilité Analizi .....	95
6.2.3. Dinamik Analiz.....	102
6.2.3.1. Düşey Düzlemde Dinamik Analiz.....	102
6.2.3.2. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz.....	108
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR .....	111
EKLER.....	114

## SEMBOL LİSTESİ

$A$	: Boru enkesit alanı,(m <sup>2</sup> )
$A_d$	: Denge bacası enkesit alanı,(m <sup>2</sup> )
$B$	: Borunun zemine oturan kısmının genişliği,(m)
$B_p$	: Plaka genişliği (veya çapı),(m)
$B_t$	:Temel genişliği,(m)
$C$	: Zemin kohezyon oranı,
$C_b$	: Boru cinsine bağlı boyutsuz katsayı
$C_h$	: Basınç dalgasının borudaki yayılma hızı,(m/sn)
$C_D$	: Boyutsuz sürüklenme katsayısı,
$C_O$	: Boyutsuz debi (orifis) katsayısı,
$C_I$	: Boyutsuz atalet katsayısı,
$C_L$	: Boyutsuz hidrodinamik kaldırma katsayısı
$C'_M$	: Froude-Krylov kuvvet katsayısı,
$C''_M$	: Atalet kuvvet katsayısı,
$D$	: Boru dış çapı,(m)
$D_e$	: Şekil değiştirme geciktirme faktörü,
$D_p$	: Düşey kolun nihayetindeki delik çapı,(m)
$D_r$	: Düşey kol çapı,(m)
$D_m$	: Borunun ortalama çapı,(m)
$E$	: Enerji yüksekliği,(m)
$E_b$	: Boru malzemesi elastisite modülü (kN/m <sup>2</sup> )
$E'$	: Zemin reaksiyon modülü, (kN/m <sup>2</sup> )
$E_K$	: Kinetik enerji,(m)
$E_p$	: Potansiyel enerji,(m)
$E_w$	: Suyun elastisite modülü,(kN/m <sup>2</sup> )
$F$	: Kuvvet,(kN)
$F_A$	: Eksenel kuvvet,(kN)

- $F_B$  : Hidrostatik kaldırma kuvveti, (kN/m)
- $F_C$  : Zemin yatak taşıma kapasitesi, (kN/m)
- $F_C$  : Difüzör çıkış kuvveti,(kN)
- $F_D$  : Sürükleme kuvveti,(kN/m)
- $F_H$  : Toplam yatay kuvveti,(kN/m)
- $F_I$  : Atalet kuvveti,(kN/m)
- $F_L$  : Hidrodinamik kaldırma kuvveti,(kN/m)
- $F_r$  : Dirsekteki Darcy pürüzlülük katsayısı,
- $F_S$  : Birim sürtünme kuvveti,(kN/m)
- $F_T$  : Döndürme kuvveti,(kN.m)
- $F_{Top}$  : Toplam dinamik dış yükü,(kN)
- $F_V$  : Toplam düşey kuvveti,(kN/m)
- $F_W$  : Boru birim ağırlığı,(kN/m)
- $F_X$  : Çarpma kuvveti,(kN)
- $H_z$  : Boru sırtından itibaren dolgu yüksekliği,(m)
- $H_n$  : n. deliğin memba tarafındaki boru içi ile dışı arasındaki basınç yükseklik farkı, (m)
- $I$  : Boru Enkesit atalet momenti,(m<sup>4</sup>)
- $K$  : Rijitlik matrisi,
- $K_y$  : Boru yataklama sabiti,(kN/m<sup>3</sup>)
- $K_c$  : Düşey kol çıkışındaki (varsa) daralma kaybı katsayısı,
- $K_d$  : Dirsek kaybı katsayısı,
- $K_g$  : Düşey kola giriş kaybı katsayısı,
- $L$  : Uzunluk,(m)
- $L_r$  : Düşey kol uzunluğu,(m)
- $M$  : Kütle matrisi,
- $N$  : Eksenel kuvveti,(kN)
- $N_C, N_q, N_\gamma$  : Zemin yatak kapasite faktörleri,

- $P$  : Boru iç basıncı,( kN/m<sup>2</sup>)
- $P_1, P_2$  : 1 ve 2 kesitlerinde boru içindeki basınçları,(kN/m<sup>2</sup>)
- $Q$  : Debi,(m<sup>3</sup>/sn)
- $R$  : Bileşke kuvveti,(kN)
- $R_x$  : Yatay reaksiyon kuvveti, (kN)
- $R_y$  : Düşey reaksiyon Kuvveti, (kN)
- $S_R$  : Borunun rijitlik faktörü,
- $U$  : Boru dışı akışın hızı,(m/sn)
- $\dot{U}$  : Boru dışı akışın ivmesi,(m/sn<sup>2</sup>)
- $W$  : Birim boya etkiyen düşey dolu zemin yükü,(kN/m)
- $W_c$  : Boru enkesiti mukavemet momenti,(m<sup>3</sup>)
- $V$  : Borudaki akış hızı,(m/sn)
- $V_j$  : Düşey kol sayısı,
- $V_n$  : n. ve (n-1) delikler arasında, difüzördeki su hızı,(m/sn)
- $V_p$  : Delikten çıkış hızı,(m/sn)
- $Z$  : Zamanla ifade edilen titreşim fonksiyonu,(m)
- $Z_0$  : Deplasman genliği,(m)
- $a$  : Zemin yüzeysel sürtünme açısı,(Derece)
- $a_i$  : i. deliğin enkesit alanı,(m<sup>2</sup>)
- $a_c$  : Sönüm katsayısı,
- $c$  : Sönüm,(kN.sn/m)
- $c^*$  : Genelleştirilmiş sönümü,(kN.sn/m)
- $d$  : Difüzör delik çapı,(m)
- $f$  : Yersel yük kaybı sabiti,
- $f_p$  : Darcy pürüzlülük katsayısı
- $g$  : Yerçekimi ivmesi,(m/sn<sup>2</sup>)
- $h_s$  : Sistemdeki sürekli yük kayıpları toplamı,(m)
- $h_{dif}$  : Difüzördeki toplam yük kaybı,(m)
- $h_p$  : Yoğunluk farkından ileri gelen hidrolik yük,(m)

- $h_y$  : Yersel yük kaybı toplamı,(m)  
 $h_{gg}$  : Denizdeki seviye farklarından (gel-git) ortaya çıkan hidrolik yük,(m)  
 $k$  : Rijitlik,(kN/m)  
 $k^*$  : Genelleştirilmiş elastik rijitlik,(kN/m)  
 $k_y$  : Zemin yay katsayısı,(kN/m)  
 $k_p$  : Plaka için yatak katsayısı,(kN/m<sup>3</sup>)  
 $k_s$  : Yatak katsayısı,(kN/m<sup>3</sup>)  
 $k_G^*$  : Genelleştirilmiş geometrik rijitlik,(kN/m)  
 $\bar{k}^*$  : Genelleştirilmiş rijitlik,(kN/m)  
 $m$  : Kütle,(t/m)  
 $m^*$  : Genelleştirilmiş kütle,(t/m)  
 $m'$  : Eklenik kütle,(t/m)  
 $m_s$  : Eğilme momenti sabiti,  
 $r_m$  : Ortalama boru yarıçapı,(m)  
 $s$  : Boru et kalınlığı,(m)  
 $t$  : Zaman, (sn)  
 $u$  : Su partikülünün akış yönünde hızı,(m/sn)  
 $\dot{u}$  : Su partikülünün akış yönünde ivmesi,(m/sn<sup>2</sup>)  
 $\bar{u}$  : Titreşim genliği,(m)  
 $x$  : Konum,(m)  
 $(w - \dot{x})$  : Rölatif hızı,(m/sn)  
 $\dot{x}$  : Silindirin akış yönündeki hızı,(m/sn)  
 $\ddot{x}$  : Silindirin akış yönündeki ivmesi,(m/sn<sup>2</sup>)  
 $\dot{x}$  : Borunun düşey yöndeki yaptığı hareketin hızı,(m/sn)  
 $\vec{v}$  : m kütesinin hızı,(m/sn)  
 $y$  : Deplasman,(m)  
 $y_o$  : Normal işletme halinde denge bacasındaki su seviyesi,(m)  
 $y_m$  : Negatif basınç halinde denge bacasındaki su seviyesi,(m)  
 $z$  : Boru hattının zemin yüzeyinden olan uzaklığı,(m)  
 $\sum \vec{F}$  : Bir m kütesine etkiyen kuvvetlerin toplamı,(kN)



- $\rho_a$  : Deniz suyunun yoğunluğu, (t/m<sup>3</sup>)
- $\rho_0$  : Deşarj edilen atık suyun yoğunluğu, (t/m<sup>3</sup>)
- $\rho$  : Kontrol hacminden geçen akışkanın yoğunluğu, (t/m<sup>3</sup>)
- $\rho_b$  : Boru birim hacim yoğunluğu, (t/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_0$  : Akışkan birim hacim ağırlığı, (kN/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_a$  : Deniz suyu birim hacim ağırlığı, (kN/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_s$  : Zemin birim hacim ağırlığı, (kN/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_b$  : Boru birim hacim ağırlığı, (kN/m<sup>3</sup>)
- $\phi$  : Zemin içsel sürtünme açısı, (Derece)
- $\Phi$  : Hız potansiyeli,
- $\Psi$  : Akım fonksiyonu,
- $\psi(x)$  : Konumla ifade edilen şekil fonksiyonu, (m)
- $\omega$  : Frekansı, (1/sn)
- $\xi$  : Sönüm oranı
- $\nu$  : Borunun büzülme katsayısı
- $\delta$  : Düşey deformasyon (m)

## ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>	<u>Şekil Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1.	Yük Kaybı Şeması.....	4
Şekil 2.2.	Prandtl-Colebrook Formülü Esas Alınarak Hazırlanmış Hesap Grafikleri.	5
Şekil 2.3.	Difüzörün Hidrolik Hesabında Kullanılan Büyüklükler.....	7
Şekil 2.4.	Debi Katsayılarının Hesabı İçin Grafik.....	11
Şekil 2.5.	Düşey Kollu Difüzör.....	11
Şekil 2.6.	Terfili Deşarj Hatlarında Su Darbesi.....	14
Şekil 2.7.	Denge Bacası.....	15
Şekil.2.8.	Denge Bacası Hesabı İçin Grafik.....	16
Şekil 2.9.	Kontrol Hacmi.....	17
Şekil 2.10.	Ani Daralan Boru.....	20
Şekil 2.11.	Dik Çıkış (T dirsek).....	20
Şekil 2.12.	Düşey Kollu Çıkış.....	21
Şekil 3.1.	(a) Difüzöre Etkiyen Kuvvetler, (b) Serbest Oturan Boru, (c) Gömülü Boru.....	23
Şekil 3.2.	Zemine Gömülmüş Boru Enkesiti.....	28
Şekil 3.3.	(a) Boruya Etkiyen Tekil Zemin Yüklemesi, (b) Çizgisel Yükleme, (c) Yayılı Yükleme.....	29
Şekil 3.4.	Yatak Katsayısının Tanımı ve Bir Yayla Olan Benzeşimi.....	30
Şekil 4.1.	Lineer Dalga Parametrelerinin Genel Tanımı.....	33
Şekil.4.2.	$KC$ – Difraksiyon Parametresi İlişkisi.....	42
Şekil.4.3	a-b. $C_D/C_M$ ile $KC$ -Re ilişkisi alga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line) katsayıları, .....	44
Şekil.4.4.	a-b. $KC$ sabit hal için $C_D, C_M$ ile $k/D$ -Re ilişkisi dalga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line) katsayıları,.....	44
Şekil.4.5.	a-b. Re sabit alınarak $C_D, C_M$ ile $e/D$ - $KC$ ilişkisi dalga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line).....	45
Şekil.4.6.	$C_{Lmax}$ - $KC$ -Re ilişkisi (dalga kökenli akış yönüne dik kuvvet (Cross flow, transverse) katsayıları.....	45
Şekil.4.7.	$C_{Lms}$ - $k/D$ - $KC$ ile sabit Re ilişkisi dalga kökenli akış yönüne dik kuvvet (Cross flow, transverse) katsayıları,.....	46

Şekil.4.8.	$C_{LA}-e/D-Re$ ile sabit $KC$ ilişkisi dalga kökenli akış yönüne dik kuvvet (Cross flow, transverse) katsayıları.....	46
Şekil.4.9.a-b.	$C_D-KC$ ve $C_{DO}-H/D$ ilişkisi dalga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line) katsayıları.....	47
Şekil.4.10.	$C_M-KC$ ilişkisi dalga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line) katsayıları...	47
Şekil.4.11.	a-b. $C_{LO}-KC$ ve $C_L-H/D$ ilişkisi dalga kökenli akış yönüne dik kuvvet (cross flow, transverse).....	48
Şekil 4.12.	Lineer Teoriye Göre Partikül Yörünge ve Kinematikleri.....	51
Şekil 4.13	Tek Serbestlik Dereceli Sistem.....	53
Şekil 4.14	Kritik Altı Sönümlü, Kritik Sönümlü ve Kritik Üstü Sönümlü Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Serbest Titreşimi.....	54
Şekil 4.15	1999 Düzce Depremi DB İvme Kayıtları.....	56
Şekil 5.1.	Genelleştirilmiş Tek Serbestlik Dereceli Sistem (TSD).....	58
Şekil 5.2.	Çok Serbestlik Dereceli Sistemin Matematik Modeli .....	62
Şekil 6.1.	Deniz Tabanına Serbest Oturan Tedrici Değişen Kesitli Difüzör.....	69
Şekil 6.2.	Difüzör 1. Delik.....	72
Şekil 6.3.	Difüzör 2. Delik.....	73
Şekil 6.4.	TSD Sistem İle SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	86
Şekil 6.5.	Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması.....	86
Şekil 6.6.	Dalga Kuvveti Etkisinde TSDS İle SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	89
Şekil 6.7.	Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması.....	90
Şekil 6.8	Sistemin Deprem Etkisinde Salınım Grafiği.....	91
Şekil 6.9	TSDS ile SAP2000 Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	92
Şekil 6.10.	Zemine Gömülü Kademeli Değişen Kesitli Difüzör.....	96
Şekil 6.11.	Difüzör 1. Delik.....	96
Şekil 6.12.	Difüzör 2. Delik.....	97
Şekil 6.13	TSDS ile SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	106
Şekil 6.14.	Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması.....	107

## ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>	<u>Çizelge Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1.	Manning Pürüzlülük Katsayıları (n).....	3
Çizelge 3.1.	Zemin Cinsine Göre Tipik Yatak Katsayısı Değerleri.....	31
Çizelge 4.1.	Özetle Lineer dalga teorisi dalga karakteristikleri.....	52
Çizelge 6.1.	Difüzör Kesit ve Özellikleri.....	65
Çizelge 6.2.	Dalga Parametreleri.....	65
Çizelge 6.3.	Zemin Parametreleri.....	65
Çizelge 6.4.	Tedrici Değişken Kesitli Difüzör Hidrolik Hesabı.....	68
Çizelge 6.5.	Serbest Oturan Boruya Etkiyen Maksimum Hız ve ivme değerleri.....	71
Çizelge 6.6.	Çıkış Noktalarına Etkiyen Yatay ve Düşey Kuvvetler.....	74
Çizelge 6.7.	$C_i$ , $C_D$ , $C_L$ Sabitleri İçin Tavsiye Edilen Değerler .....	75
Çizelge 6.8.	Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar.....	87
Çizelge 6.9.	Yatay Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar.....	92
Çizelge 6.10.	Kademeli Değişen Kesitli Difüzör Hidrolik Tasarımı.....	95
Çizelge 6.11.	Kademeli Boruya Etkiyen Difüzör Çıkış Kuvvetleri.....	98
Çizelge 6.12.	Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar.....	108
Çizelge EK.1.	Basıncılı Borular İçin Yersel Yük Kaybı Katsayıları.....	114
Çizelge EK.2.	Sayısal Analiz İçin Yazılan Bilgisayar Programının Kodları.....	115

## KISALTMALAR LİSTESİ

- ÇSDS : Çok Serbestlik Dereceli Sistem,  
DnV : Det Norske Veritas,  
PVC : Poli Vinil Klorür Boru,  
PE : Yumuşak Poli Etilen Boru,  
PN : Basınç Sınıfı,  
TSDS : Tek Serbestlik Dereceli Sistem,  
YYPE : Yüksek Yoğunluklu Poli Etilen Boru,

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans yapma kararı almamda yol göstericiliği ve destekleri eksik etmeyen, öğrencilik sürecimde şahsıma vermiş olduğu teorik destek, göstermiş olduğu sabır ve anlayış için değerli hocam, danışmanım Sayın Prof. Dr. Bekir SOLMAZ' a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez projesi konusu seçiminde görüş ve desteklerini esirgemeyen, problemlerimize getirdiği çözümler, teorik destek, literatür katkısı ve göstermiş olduğu sabır için ayrıca vermiş olduğu TÜBİTAK Prj. Asistanlığı görevimden dolayı Sayın Prof. Dr. Ümit GÖKKUŞ' a teşekkür ederim.

Çalışma kapsamında karşılaştığım problemlerin bilgisayar çözümlerinde sağladığı katkılardan ve literatür desteğinden dolayı değerli arkadaşım Arş. Gör. Engin GÜCÜYEN' e teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım sürecinde ve C.B.Ü. Mühendislik Fakültesinde Prj. Arş. Gör. olarak çalıştığım süreçte desteği esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölümündeki değerli hocalarıma ve araştırma görevlisi hocalarıma, arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Öğrencilik hayatım süresince maddi, manevi desteklerini esirgemeyen ve mesleki hayatımda aldığım kararlarda tecrübe, destek ve şahsıma duydukları güvenden dolayı Babama, Anneme ve diğer aile bireylerime de teşekkürlerimi sunarım.

## ÖZET

Deniz deşarj sistemleri; atıksu ileten boruhatlarından, difüzörlerden ve pompa sistemlerinden oluşmaktadır. Boruhatlarının genellikle son kısımlarına yerleştirilen difüzörler, seyrelme yoluyla atıksu deşarj edecek belli aralıklarda ve çaplardaki çıkış kanallarına sahiptir. Deniz tabanına serbest döşenmiş, tesbit kitleleri üzerinde askıda ve deniz tabanında gömülü biçimde inşaa edilirler.

İlk tasarım aşamasında, iç akışın enerjisi difüzör sonunda tükenecek biçimde boru iç akışı ve terfi yüksekliği hesaplanabilmektedir. Difüzör borusunda çıkış kanallarından deşarj edilen debi kademeli olarak artmakta ve her kanaldan sonra daha azalan bir debi ile atık su difüzör ucuna doğru ilerlemektedir. Azalan debiye karşılık gelen sabit hızlı akış hali kademeli veya tedrici olarak borunun kesitinin değişimine yol açar. Temel akışkanlar mekaniği bağıntılarıyla difüzör bölgesinde basınç, hız, enerji parametreleri hesaplanabilir. Ancak bu problem çözümlenirken dalga kökenli dış basınç göz önüne alınmalıdır. Dalga basınçları ve akış parametreleri dalga teorilerine göre farklılaşmaktadır. Burada Lineer dalga teorisi esas alınmıştır. İmpuls momentum bağıntısı ile kesit daralmalarından ve çıkışlardaki su jetlerinden kaynaklanan bir reaksiyon kuvveti ortaya çıkmaktadır. Difüzör üzerindeki zamanla değişen böylesi reaksiyon kuvvetleri, dinamik etkilerin oluşumuna neden olmaktadır. Bu durumda dinamik çözümleme ile difüzörün titreşimi incelenmelidir. Dinamik çözümleme; Tek ve Çok Serbestlik Dereceli Sistemlere göre yapılabilmektedir.

Bu çalışmada; dalgalı etkisindeki kademeli ve tedrici değişen kesitli difüzörleri tek serbestlik dereceli sisteme göre dinamik analizleri yapılmıştır. Difüzörlerin gömülü ve deniz tabanında serbest döşeme biçimleri ile keskin kenarlı ve çoklu borulu çıkış kanallı seçenekleri için dinamik çözümlemesi, titreşimleri ve zamanla-konumla değişen deplasman bağıntıları elde edilmiştir. Dinamik çözümlemesi hem analitik olarak Tek Serbestlik Dereceli Sistem olarak hemde nümerik olarak Zaman Tanım Alanında SAP2000 yazılımıyla yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atıksu Difüzörleri, Atıksu Deşarjları, Deniz Borularında Tek Serbestlik Dereceli Sistemler, Dalga-Difüzör-Zemin Etkileşimi

## ABSTRACT

Marine outfall systems are composed of submarine pipeline transmitting wastewater, diffusers and pumping system. Diffusers generally replaced at the end of pipeline have the multiports at certain intervals and diameters to discharge wastewater by dilution. They can be also built as laid freely on sea bottom, suspended at the artificial weights and buried under the sea bottom.

At first stage of design, internal flow of wastewater and energy level arising with pumping must be calculated as its energy will be consumed at end of diffuser. The volume of water to be discharged from multiports has been increasing with gradually and wastewater progress toward its end with decreasing volume after passing each channel. Internal constant velocity corresponding to the decreasing volume of water causes varying gradually and incrementally cross section of pipe. The fundamental flow parameters such as internal pressure, velocity and energy at any point of diffuser can be calculated. External pressure induced by wave motion should be considered while getting these parameters. Wave pressures and flow parameters are differentiated by wave theories. Here the linear wave theory is considered. The external reaction forces result from reducing cross section of pipe and reacting water jet to be discharged by using impuls and momentum equations. Such forces, varying with time, on diffuser cause being dynamic effects. In this situation, vibration of diffuser together with the dynamic analysis should be studied. This analysis can be performed by the Single and Multi-Degree of Freedom system (the SDOF and MDOF system).

In this study, diffuser, having cross sections varying gradually and incrementally, due to wave motion is analyzed by using the SDOF system. Dynamic analysis for diffuser alternatives relating on sharp-edged and multiple ports designed by burying in soil and resting freely on sea bottom, their vibrations and displacement equation varying with location and time for any point on diffuser are computed. The dynamic solution of the problem are performed both Single-Degree of Freedom System by analytically and Time History Analysis with SAP2000 software by numerically.

**Key words;** Wastewater Diffusers, Wastewater Discharges, SDOF System in Submarine Pipelines, Wave-Diffuser-Soil Interaction.



## 1.0. GİRİŞ

Deniz deşarj sistemleri; arıtma sisteminin çıkışından deşarj edileceği deniz ortamına kadar uzanan bir deniz boruhatlarından, deşarjın yapılmasını sağlayan difüzör sisteminden ve basınçla akışı sağlayan pompa sisteminden müteşekkildir. Uç kısmı kapalı olup akışkanın enerjisinin tamamının boruhattı boyunca harcanmasına imkan veren difüzörler, boru hattının uç kısmında yer alır ve atıksuyun kolay deşarj olmasını sağlayan çoklu çıkış kanallarına sahiptir. Kanallar belli aralıklarda ve çaplarda tasarlanır ve atıksuyun seyrelerek deniz ortamına girişine imkan sağlar. Bununla birlikte, difüzörler deniz tabanında serbest döşenmiş, tespit kitleleri üzerinde askıda ve gömülü olarak da inşa edilebilmektedir.

Difüzörlerden çıkışlar için yalın halde delikler bırakıldığı gibi borulu dirsek tipi çıkışlar da kullanılmaktadır. Dış ortamın akıntı hızına ve dalgalı ortamda orta ve sığ su kesimlerindeki dalga hızına bağlı olarak difüzör çıkış ağız tipleri belirlenebilir. Ancak derin su kesimlerinde dış ortama ilişkin akıntı söz konusu değilse genellikle keskin kenarlı yalın çıkış ağızları tercih edilir. Sığ ve orta sularda veya taban akıntılarının güçlü olduğu deniz kesimlerinde viskoz taban etkilerinden kaçınmak için boruhattı ve difüzör kısmı gömülebilir. Bu durumda borulu dirsek tipi çıkışlar tercih edilerek deniz tabanına kadar çıkış ağızı boru ile yükseltilebilir. Derin sularda ve akıntısız ortamlarda borulu çıkış ağızlarına gerek duyulmayabilir. Bu durumda keskin kenarlı yalın çıkış delikleri kullanılabilir.

Gömülü olmayan kesimlerde deniz tabanında serbest oturan ya da tespit kitleleri üzerinde askıda difüzör yerleştirilebilir. Tabana serbest oturan difüzörlerde elastik zemine oturan kiriş sisteminde olduğu gibi bir yaklaşımla çözümlene yapılıır. Askıdaki sistemlerde ise normal kiriş problemi dikkate alınarak çözüm yoluna gidilir.

Difüzör içersindeki akışkanın iç basıncı, çıkış ağızında dış akışkan basıncı, boru içi yersel ve sürekli yük kayıpları dikkate alındığında boru iç ve dış akış etkileşimi ile boruda impuls momentum problemi doğmaktadır. Temel akışkan denklemleri ile çözümlene yapıldığında boruda çıkış, dirsek ve ani daralma bölgelerinde dinamik yükler ortaya çıkmaktadır. Kiriş problemine eşdeğer alınan difüzörler tek serbestlik dereceli sisteme göre dinamik çözümlene yapıldığında iç ve dış akış kökenli boru titreşimleri hesaplanabilmektedir. Benzer olarak çok serbestlik dereceli sisteme göre de çözümlene yapılabilir olmasına rağmen kiriş sisteminin elastik eğrisinin alacağı biçim dikkate alındığında genelleştirilmiş tek serbestlik dereceli sisteme göre dinamik analiz yapmak yeterli görülmektedir. Mod süperpozisyon yöntemiyle çok serbestlik dereceli sistem çözümlendiğinde ilk veya ikinci modun dikkate alınması yeterli görülebilir.

## 2.0. DENİZ DEŞARJ BORULARININ HİDROLİK TASARIMI

Deniz deşarjı tesisleri başlıca deşarj terfi merkezi ve cazibeli deşarj halinde yükleme odası, denge bacası, deşarj hattı ve difüzör gibi birimlerden oluşmaktadır. Söz konusu tesislerin minimum ve maksimum debiler altındaki davranışları fevkalade hallerde ortaya çıkabilecek aşırı basınçları kontrolü ve sistemin bir bütün halinde kendisinden beklenen enfonksiyonları gerektiği şekilde yerine getirebilmesi için, hassas bir hidrolik tasarım yapılmalıdır (Öztürk, 1996).

### 2.1. Hidrolik Tasarım Kriterleri

#### 2.1.1. Hız hesabı

Deşarj borusunda, çökelmelerin önlenmesi için akış hızının 0.6m/sn den az olmaması veya günde en az bir kere 0,75–0,8 m/sn değerine çıkması gerekmektedir. Aşırı hidrolik yük kayıplarının engellenmesi için maksimum akış hızının 2,5 m/sn' yi aşmaması tavsiye edilmektedir. Deşarj hatlarındaki optimum su hızı 0,8–1.8m/sn alınabilir. Difüzörün katı maddelerin çökmesi sonucu tıkanmasının önlenmesi için, en uçtaki delikten önce difüzördeki akış hızının 6 cm/sn den az olmaması gerekmektedir (Öztürk, 1996).

#### 2.1.2. Delik Çap ve Aralık Sayılarının Hesaplanması

Difüzör deliklerinin toplam alanı

$$\sum_{i=1}^n a_i \leq \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right) \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \quad (2.1)$$

olmalıdır.

Burada

- $D$  : Deşarj borusunun çapı (m),  
 $a_i$  : i. deliğin enkesit alanıdır (m<sup>2</sup>),

Delikler arasında mesafe,  $L$  için de

Yüzey tarla durumunda ,  $L = h / 3$

Batmış tarla durumunda,  $L = Y_{\max} / 3$

kriterleri esas alınabilir. Şayet delikler şaşırtmalı ise, bu değerlerin yarısı alınmalıdır.

## 2.2. Minimum Hidrolik Yük Hesabı

$$h_T = h_s + h_{dif} + h_p + h_y + h_{gg} \quad (2.2)$$

Burada,

$h_s$  : Sistemdeki sürekli yük kayıpları toplamını (m),

$h_{dif}$  : Difüzördeki toplam yük kaybını (m),

$h_p$  : Yoğunluk farkından ileri gelen hidrolik yükü (m),

$h_y$  : Yersel yük kaybı toplamını (m),

$h_{gg}$  : Denizdeki seviye farklarından (gel-git) ortaya çıkan hidrolik yükü (m),

göstermektedir.

### 2.2.1. Sürekli Yük Kaybı

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} J_b^{1/2} \quad (2.3)$$

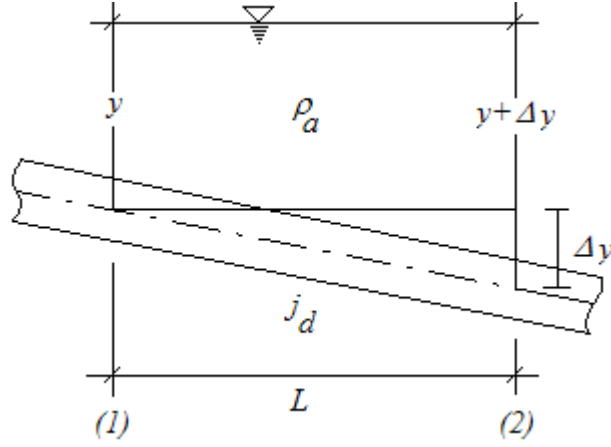
Belli bir  $v$  hızındaki piyezometre çizgisi eğimi  $j_b$  bulunur. Daha sonra  $L$  uzunluklu borudaki sürekli yük kaybı

$$h_s = j_b L \quad (2.4)$$

ifadesinden hesaplanır.

Çizelge 2.1. Manning Pürüzlülük Katsayıları (n) (Öztürk, 1996)

Boru Cinsi	n
Çelik	0.010—0.013
Font	0.011—0.013
AÇB	0.010—0.012
CTP, YYPE, PVC ve PE	0.009—0.012
Betonarme Borular	0.012—0.018



Şekil 2.1. Yük kaybı şeması.

### 2.2.2. Yoğunluk Farkından İleri Gelen Yük Kaybı

Atık suların, daha yoğun bir ortama deşarjı için, yoğunluk farkından ileri gelen hidrolik yükün de yenilmesi gerekmektedir. Sürtünme kayıpları ihmal edilerek, şekildeki 1 ve 2 kesitlerinde boru içi ile dışı arasındaki basın basınç farkları

$$\Delta P_1 = P_1 - \rho_a y \quad (2.5)$$

$$\Delta P_2 = P_2 + \Delta y \cdot \rho_0 - \rho_a (y + \Delta y) \quad (2.6)$$

denklemleriyle ifade edilebilir. Bu iki kesit arasında yoğunluk farkından ileri gelen hidrolik yük,  $h_p$  ise

$$\Delta h_p = (\Delta P_1 - \Delta P_2) / \rho_0 = \Delta y \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} \quad (2.7)$$

olarak bulunur. Bu denklemde,

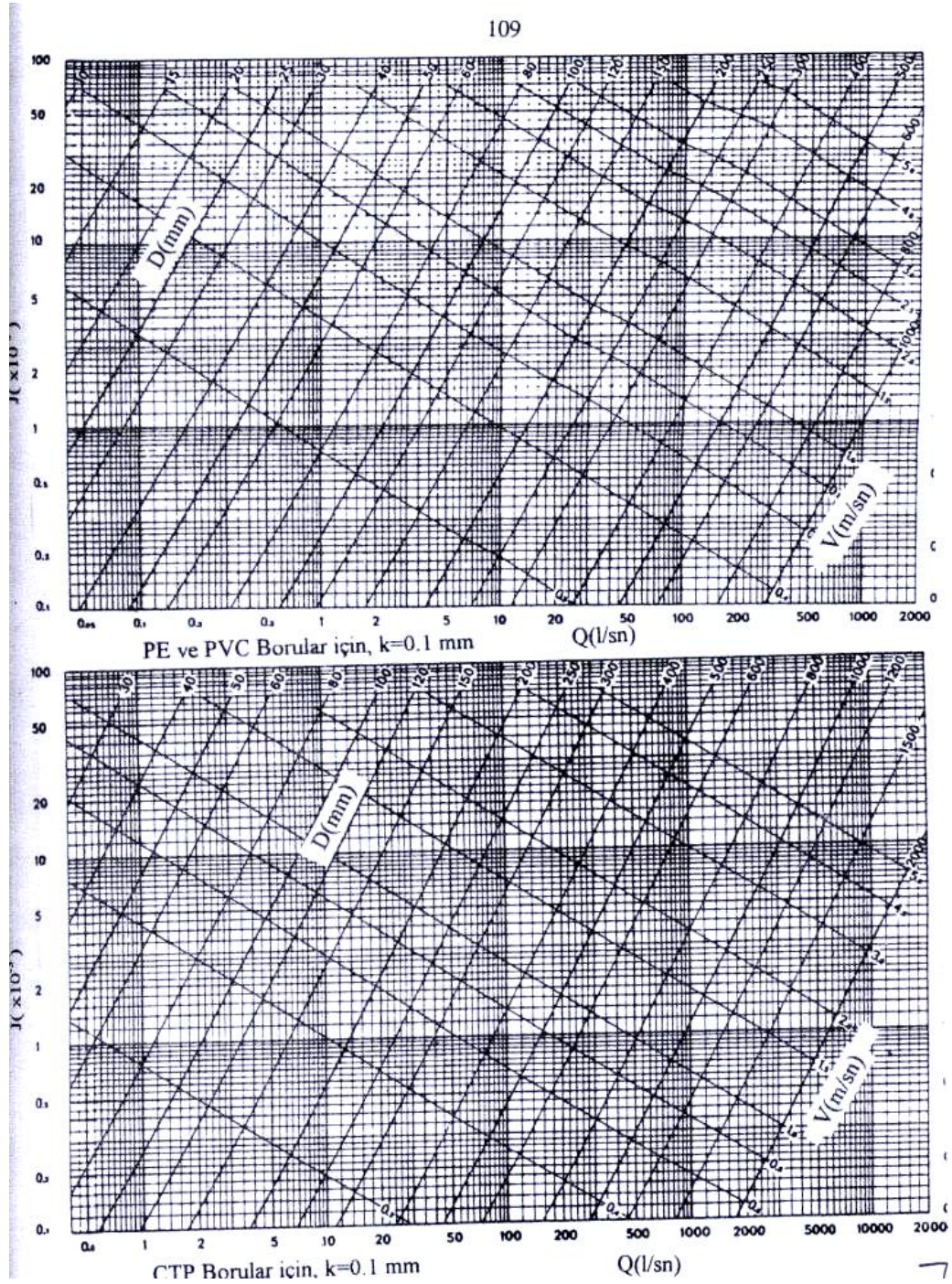
$P_1, P_2$  : 1 ve 2 kesitlerinde boru içindeki basınçları ( kN/m<sup>2</sup> ) ,

$\rho_a$  : Deniz suyunun yoğunluğunu (t/m<sup>3</sup>) ,

$\rho_0$  : Atık su yoğunluğunu (t/m<sup>3</sup>),

göstermektedir.

Dolayısı ile (2) nolu delikten deşarj olabilmesi için  $h_p$  yükünün yenilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.2. Prandtl-Colebrook Formülü Esas Alınarak Hazırlanmış Hesap Grafikleri (Öztürk, 1996)

### 2.2.3. Gelgit Yük Kaybı

Deşarj hattının sağlıklı çalışabilmesi için, denizlerde gel-git sebebiyle ortaya çıkan seviye farklılıklarını da karşılayacak seviyede ilave hidrolik yüke ihtiyaç duyulur. Türkiye denizlerinde gel-git dolayısı ile olabilecek ortama seviye değişimi  $h_{gg} = 0.40$  m alınabilir (Öztürk, 1996).

### 2.2.4. Yersel Yük Kaybı

Deşarj hattı veya difüzör üzerindeki vana, çekvalf, dirsek, T, redüksiyon v.b. elemanlarda ortaya çıkan yersel yük kayıpları  $h_y$  en genel haliyle,

$$h_y = f \frac{V^2}{2g} \quad (2.8)$$

formunda ifade edilebilir.

Burada;

$f$  : Yersel yük kaybı sabitini,

$V$  : Borudaki akış hızını (m/sn),

göstermektedir.

Yersel yük kaybı katsayıları için EK-1' deki değerler esas alınabilir (Benefield v.d., 1984).

### 2.2.5. Difüzördeki Yük Kayıpları

Difüzördeki hidrolik yük kayıplarının hesabında Rawn v.d.(1960) ile Brooks (1970) tarafından geliştirilen yöntem kullanılmaktadır.

Difüzörün, öngörülen seyrelmeleri sağlayabilmesi için debi değişimlerine rağmen, deliklerden çıkan debilerin olabildiğince eşit tutulması gerekmektedir. Düşük debilerde deliklerden difüzör içerisine deniz suyu girişinin önlenmesi için. Froude sayısının 1 den büyük tutulması tavsiye edilmektedir. Difüzördeki yük kayıplarının minimum tutulması ve farklı debilerde olabildiğince uniform bir debi dağılımının sağlanabilmesi için, difüzör ve delik çaplarının belli kısımlarda değiştirilmesi yoluna gidilir. Böylece hem boru içindeki çökelmeler hem de özellikle memba tarafındaki deliklerden diğerlerine göre çok farklı debilerin çıkması engellenebilir. Üzerinde D çaplı n adet delik bulunan bir difüzörde n. Delikten çıkan debi  $q_n$





$Re > 2000$  ve  $D < d/4$  olması halinde, McKnown ve Hsu (1951) debi katsayısı için

Keskin kenarlı delikler için,

$$C_o = 0,63 - 0,58 \frac{V^2}{2gE} \quad (2.10)$$

Çan ağızlı delikler için

$$C_o = 0,975 \left(1 - \frac{V^2}{2gE}\right)^{3/8} \quad (2.11)$$

Denklem (2.9) dan  $C_o$  'yi hesaplayabilmek için  $\frac{V_n^2}{2gE_n}$  'in bilinmesi gerekmektedir. Küçük  $q_n$  değerleri için  $V_n \sim V_{n-1}$  alınabileceğinden  $q_n$  'in hesabında

$$\frac{V_n^2}{2gE_n} \approx \frac{V_{n-1}^2}{2gE_n} \quad (2.12)$$

kabulü yapılabilir. Difüzörün hidrolik hesabına başlanabilmesi için böyle bir yaklaşım yapılması mecburiyeti vardır. Hesaplara en uçtan (1 nolu delik) başlanır ve menbaya doğru devam edilir.

1.delikten çıkan debinin hesabı:

$$q_n = C_o a_1 \sqrt{2gE_1} \approx \frac{Q_{\max}}{n} \quad (2.13)$$

alınarak denklem (2.10) veya (2.11) ifadelerinden  $\frac{V^2}{2gE_1} = 0,01$  kabulü ile  $C_{o1}$  bulunur.  $C_o$

ların hesabı için Denklem (2.10) ve (2.11) 'in grafiğinden de yararlanılabilir (Şekil 2.4). Daha sonra Denklem (2.12) ifadesinden  $E_1$  ve müteakiben

$$V_1 = \Delta v_1 = \frac{q_1}{A} \quad (2.14)$$



$${}^{(1)}C_{O2} = \varphi \left( \frac{V_1^2}{2gE_1} \right)$$

hesaplanır. Şayet  ${}^{(1)}C_{O1} \cong {}^{(1)}C_{O2}$  ise 2. deliğin hesabına geçilir, aksi takdirde  ${}^{(1)}C_{O1} = {}^{(1)}C_{O2}$  alınarak hesaplar tekrarlanır.

2. delikten çıkan debinin hesabı:

Bu safhada önce 2. delik hizasındaki enerji seviyesi ( $E_2$ )

$$E_2 = E_1 + h_{f1} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \Delta(y_{n-1} - y_n) \quad (2.15)$$

$$h_{f1} = jL_1 = f_p \frac{L_1}{d} \frac{V_1^2}{2g} \quad (2.16)$$

ifadeleri yardımıyla hesaplanır.

Burada

$h_{f1}$  : 1. ve 2. delikler arasında difüzördeki sürekli yük kaybını (m),

$j$  : 1. ve 2. delikler arasında difüzörden  $q_1$  debisi geçmesi,  
halindeki piyezometre çizgisi eğimini

$f_p$  : Darcy pürüzlülük katsayısını ( $f = 0.02-0.03$ ),

$(y_{n-1} - y_n)$ : n. ve n(n-1) delikler arasındaki derinlik farkını (m),

göstermektedir. Diğer büyüklükler şekil 2.3' de verilmiştir.

Bunun için ilk yaklaşım da  $\frac{V_1^2}{2gE_1} = \frac{V_2^2}{2gE_2}$  kabulü ile Denklem (2.10-11) den  ${}^{(2)}C_{O1}$  bulunur.

Daha sonra 2.delikten geçen debi  $q_2$

$$q_2 = C_{O1} a_2 \sqrt{2gE_2} \quad (2.17)$$

ve difüzörde 2. ve 1. delikler arasındaki akım hızı

$$V_2 = V_1 + \frac{q_2}{A} \quad (2.18)$$

bulunur.

Müteakiben

$${}^{(2)}C_{O_2} = \varphi\left(\frac{V_2^2}{2gE_2}\right) \quad (2.19)$$

ifadeleri 2.10-11 veya grafikten (Şekil 2.4) yeni debi katsayısı  ${}^{(2)}C_{O_2}$  hesaplanır.  ${}^{(1)}C_{O_2}$  ile mukayese edilir. Şayet

$${}^{(1)}C_{O_2} = {}^{(2)}D_{O_2} \quad \text{ise} \quad {}^{(1)}C_{O_3} = {}^{(2)}C_{O_2}$$

alınarak 3. deliğin hesabına geçilir, aksi takdirde  ${}^{(3)}C_{O_2} = {}^{(2)}C_{O_2}$  alınarak ikinci deliğin hesabı tekrarlanır. Bu prensip dâhilinde yürütülen hesaplar n delik için aşağıdaki gibi genelleştirilebilir

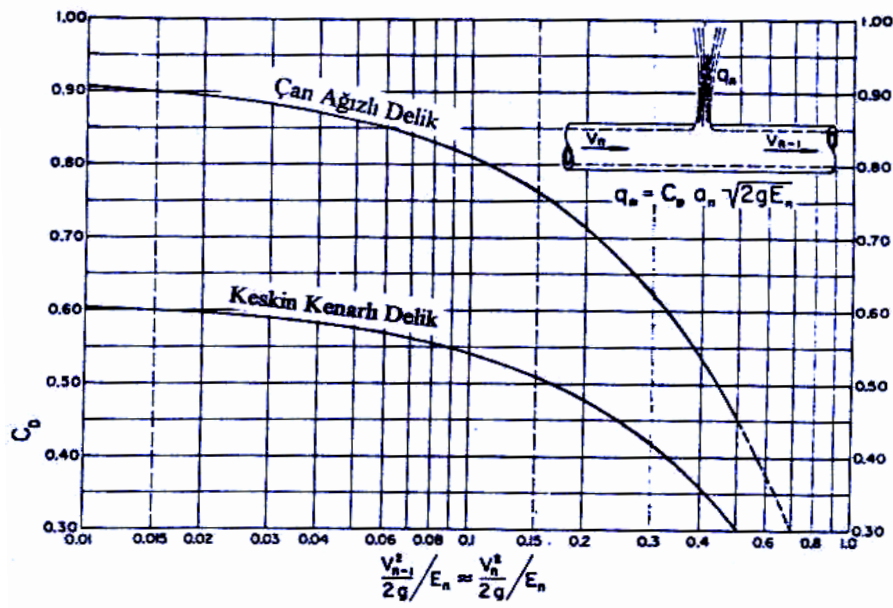
$$q_n = C_O a_n \sqrt{2gE_n} \quad (2.20)$$

$$C_O = \varphi\left(\frac{V_{n-1}^2}{2gE_n}\right) \quad (2.21)$$

$$V_n = V_{n-1} + \frac{q_n}{A} \quad (2.22)$$

$$E_n = E_{n-1} + h_{fn} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \Delta(y_{n-1} - y_n) \quad (2.23)$$

Delikler arasında üniform debi dağılımı sağlanabilmesi için  $q_{maks} / q_{min} < 1,2$  olması yeterli görülmektedir. Ancak  $\sum q_n \geq Q_{max}$  şartını da sağlaması gerekmektedir.

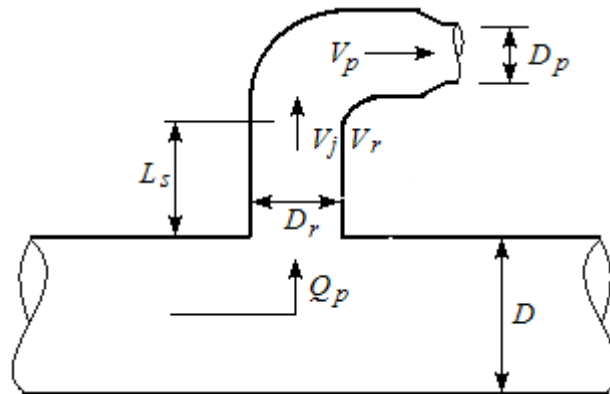


Şekil 2.4. Debi Katsayılarının Hesabı İçin Grafik (Rawn v.d 1960)

Difüzör üzerinde düşey kollar (risers) bulunması halinde enerji yüksekliği,  $E_n$  ;

$$E_n = \left\{ \left( k_g + f_r \frac{L_r}{D_r} + k_d + k_c \right) \left( \frac{D_p}{D_r} \right)^4 + \frac{1}{C_c^2} \right\} \left( \frac{V_p^2}{2g} \right) = X \frac{V_p^2}{2g} \quad (2.24)$$

ifadesiyle verilebilir (Fisher v.d. 1979) (şekil 2.5).



Şekil 2.5. Düşey Kollu Difüzör

Burada,

$$K_g : \text{Düşey kola giriş kaybı katsayısını, } \left( = 0,406 + \left( \frac{V_d}{V_r} \right)^2 \right)$$

$$F_r : \text{Dirsekteki Darcy pürüzlülük katsayısını,}$$

$$L_r : \text{Düşey kol uzunluğunu (m),}$$

$$D_r : \text{Düşey kol çapını (m),}$$

$$K_d : \text{Dirsek kaybı katsayısını,}$$

$$K_c : \text{Düşey kol çıkışındaki (varsa) daralma kaybı katsayısını,}$$

$$D_p : \text{Düşey kolun nihayetindeki delik çapını (m<sup>2</sup>),}$$

$$V_p : \text{Delikten çıkış hızını (m/sn),}$$

$$V_j : \text{Düşey kol sayısını,}$$

$$C_c = \frac{V_p}{V_j}$$

göstermektedir. X sabiti ile  $C_D$  debi katsayısı arasındaki ilişki ise

$$C_O = \frac{-r^2(V_{n-1} / \sqrt{2gE_n} + X(1 - V_{n-1}^2 / \sqrt{2gE_n}) + r^4}{X + r^4} \quad (2.25)$$

Denklemleri ile verilmektedir.

Burada,

$$r = \frac{D_p}{D} \quad (2.26)$$

$$V_{n-1} = V_d - r^2 V_p \quad (2.27)$$

dir. Debi katsayısı bu şekilde Denklem (2.24) ten hesaplanarak, kolsuz difüzörlerdeki yük kayıpları bulunabilir (Arceivala, 1981).

### 2.3. Su Darbesi Hesabı

Terfili deşarj hatlarında pompaların aniden devreye girmesi, boru patlaması, vanaların aniden açılıp kapanması veya bilhassa elektrik kesintileri sonucu devreden çıkmaları durumunda su darbesi sebebiyle aşırı dinamik basınçlar ortaya çıkar. Borudaki akım hızını aniden  $\Delta U$  kadar değişmesi halinde basınç yüksekliği de

$$\Delta H = \pm \frac{C_h \Delta U}{g} \quad (2.28)$$

kadar artacaktır (Şekil 2.6).

Burada,

- $C_h$  : Basınç dalgasının borudaki yayılma hızını (m/sn),  
 $g$  : Yerçekimi ivmesini (m/sn<sup>2</sup>),

göstermektedir. Boyuna istikamette hareket edebilen, serbest döşenmiş borularda basınç dalgası yayılma hızı,

$$C_h = \left( \frac{E_p}{\left( \frac{E_p}{E_w} + \frac{D_m}{s} \right) \gamma} \right)^{1/2} \quad (2.29)$$

ifadesi ile verilir.

Burada,

- $E_w$  : Suyun elastisite modülünü (kN/m<sup>2</sup>),  
 $E_p$  : Boru malzemesinin elastisite modülünü (kN/m<sup>2</sup>),  
 $\gamma$  : Borudan geçen suyun yoğunluğunu (kN/m<sup>3</sup>),  
 $D_m$  : Borunun ortalama çapını ( $D - s$ ) (m),  
 $s$  : Boru et kalınlığını (m),

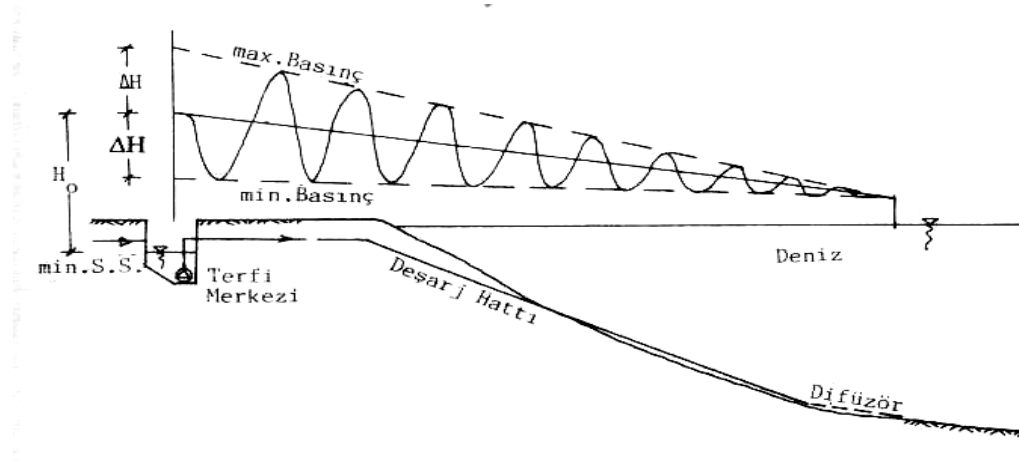
göstermektedir.

Boyuna istikamette hareket etme imkanı olmayan borularda,  $E_p$  yerine  $E_p/(1-\nu^2)$  alınır.

Burada,  $\nu$  malzemenin büzülme katsayısıdır.  $\frac{E_p}{E_w} \ll \frac{D_m}{s}$  olduğundan Denklem (2.29) yerine,

$$C_h = \left( \frac{E_p}{1-\nu^2} \frac{s}{D_m} \frac{g}{\gamma} \right)^{1/2} \quad (2.30)$$

kullanılabilir.



Şekil 2.6. Terfili Deşarj Hatlarında Su Darbesi

Yüksek yoğunluklu poli etilen (YYPE), poli vinil klorür (PVC) ve yumuşak poli etilen (PE) borular için basınç sınıfına (PN) bağlı olarak basınç dalgası yayılma hızları,

$$C_{h,YYPE} = 115\sqrt{PN} \quad (2.31)$$

$$C_{h,PVC} = 142\sqrt{PN} \quad (2.32)$$

$$C_{h,PE} = 58\sqrt{PN} \quad (2.33)$$

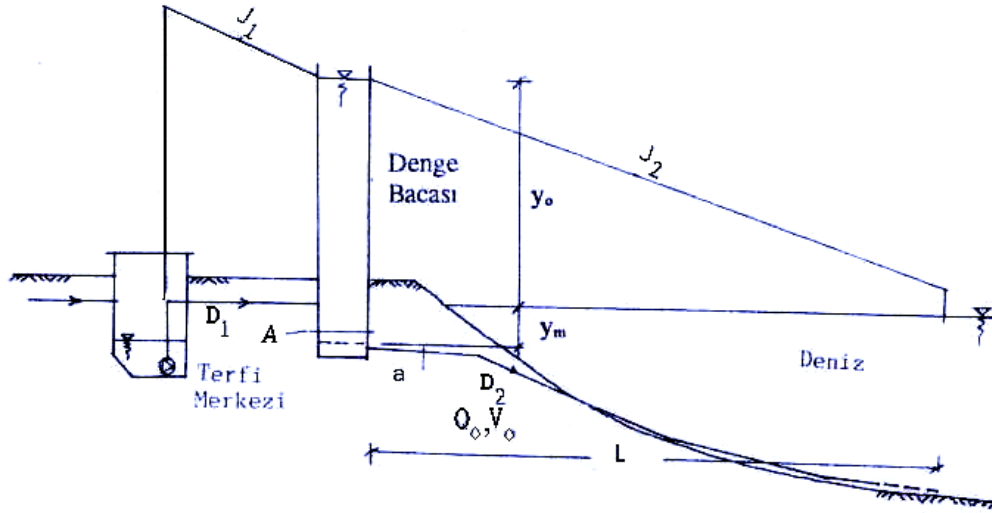
ifadelerinden bulunabilir. Burada mesela  $PN=6$  kg/cm<sup>2</sup> lik basınç sınıfı için basınç dalgası yayılma hızları  $C_{h,YYPE}=282$  m/sn,  $C_{h,PVC}=348$  m/sn ve  $C_{h,PE}=142$  m/sn bulunur. Çelik font, AÇB ve CTP gibi farklı boru cinslerinde dalga yayılma hızlarının hesabı için, (2.28 veya 2.29) ifadeleri kullanılmalıdır. Su darbesi tesirinin dikkate alınması durumunda deşarj hattındaki maksimum ve minimum basınçlar sırası ile,

$$\left(\frac{P}{\gamma}\right)_{\max} = (H_0 + \Delta H) < \left(\frac{P^{isl}}{\gamma}\right)_{\max} \quad (2.34)$$

$$\left(\frac{P}{\gamma}\right)_{\min} = H_0 - \Delta H > 0 \quad (2.35)$$

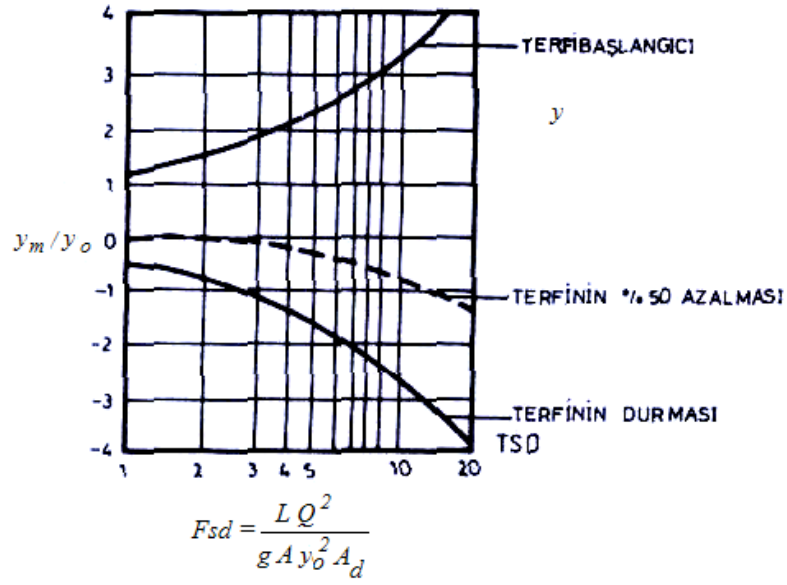
şartlarını sağlamalıdır. Bu şartlar sağlanmazsa aşırı basınçları önlemek üzere denge bacası veya hava kazanı inşası gerekmektedir. Hava kazanı hesabı için Aksoğan ve Yücel (1987) ile Parmakian (1963) yayınlarına başvurulabilir. Denge bacası tasarımı için pratik bir yaklaşım aşağıda verilmektedir.

Bilhassa plastik boruların kullanıldığı deşarj hatlarında herhangi bir sebeple boru içerisine hava dolduğunda boru hattının yüzme riski vardır. Bu risk terfi merkezindeki pompalara doğrudan bağlı (su darbesine çalışan) deşarj hatlarında çok fazladır. Böyle bir durumda su darbesi anında meydana gelen negatif basınç su içerisindeki çözülmüş havanın açığa çıkarak boruyu kısmen doldurması sonucu deşarj hattının bilhassa açıkta giden kısmının yüzmesine yol açabilir. Bu tür istenmeyen durumları önlemek üzere terfi merkezi ile deniz deşarj hattı arasında uygun yerde bir denge bacası inşa etmek gerekir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Denge Bacası

Denge bacası tabanı negatif basınç halinde deşarj hattına hava kaçmasına imkân vermeyecek derecede derin olmalıdır. Denge bacasında su darbesi esnasındaki minimum seviye alçalması Şekil 2.8. deki grafikler yardımıyla belirlenebilir (Janson, 1990).



Şekil.2.8. Denge Bacası Hesabı İçin Grafik

Burada;

- $y_o$  : Normal işletme halinde denge bacasındaki su seviyesi (m),
- $y_m$  : Negatif basınç halinde denge bacasındaki su seviyesi (m),
- $L$  : Deşarj hattı uzunluğunu (m),
- $Q$  : Hattan geçen debiyi ( $m^3/sn$ ),
- $V$  : Deşarj borusundaki su hızını (m/sn),
- $A$  : Deşarj borusu enkesit alanını ( $m^2$ ),
- $A_d$  : Denge bacası enkesit alanını ( $m^2$ ),

göstermektedir.

Denge bacasında olması gerekli minimum su hacmi ( $A y_m$ ) su darbesi faktörü  $F_{sd} = 0,1-20$  için,

$$\frac{(A_d y_m)}{A L} = \left(\frac{V^2}{2g}\right)^{2/3} \left(\frac{A_d}{A} \frac{1}{y_o L}\right)^{1/3} \quad (2.36)$$

ifadesinden hesaplanabilir.



Denge bacası alıcı ortamın minimum su seviyesi altında kapalı yatay bir hazne olarak da teşkil edilebilir. Bu durumda kapalı haznenin üst kısmına bir hava borusu veya hava vanası (vantuz ) teşkili gerekmektedir. Yatay denge haznesi silindirik inşa edildiği takdirde pratik olarak çapının deşarj borusu çapının iki katı olması tavsiye edilmektedir. Gereklî denge haznesi hacmi açık denge bacalarında uygulana yöntemle göre şekil 2.11 kullanılarak tayin edilebilir.

#### 2.4. İmpuls-Momentum Hesabı

Akım alanı içinde sabit, herhangi bir şekle haiz fakat fiktif bir hacim alınarak bu hacmi çevreleyen sınırları katı cidar gibi düşünerek bu hacme kontrol hacmi diyelim. Bu hacmi sabit bir eksen takımına göre permanant akım hali için momentumun korunumu denklemi (Newton'un ikinci denklemi) (Sümer v.d. 1983);

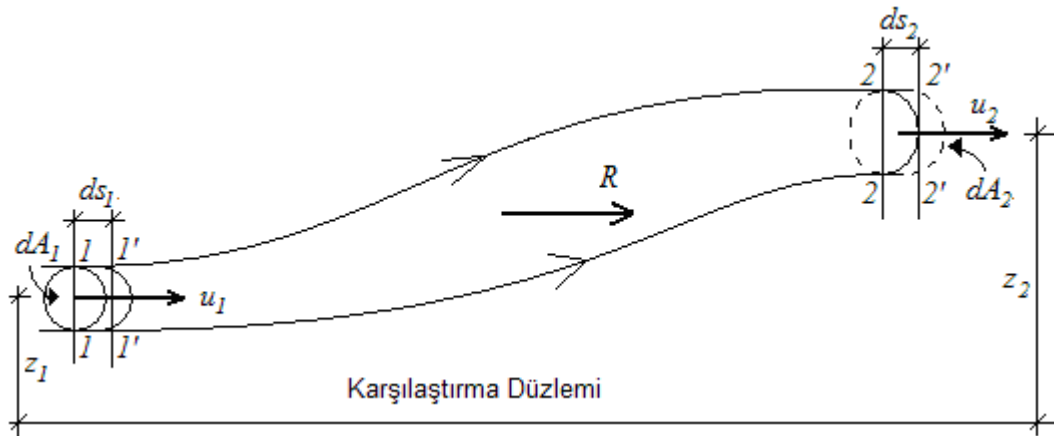
$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) \quad (2.37)$$

Burada,

$\sum \vec{F}$  : Bir m kütle sine etkiyen kuvvetlerin toplamını (kN),

$\vec{v}$  : m kütle sine hızını (m/sn),

göstermektedir.  $m\vec{v}$  çarpımına momentum ,  $\sum \vec{F} dt$  çarpımına da impuls denir.



Şekil 2.9. Kontrol Hacmi.

Bu denklemi bir probleme uygulayarak açıklayalım. t anında sistemin momentumu;

$$\begin{aligned}
m\bar{v}_t &= m\bar{v}(1'1'1)_t + m\bar{v}(1'221')_t \\
&= \rho ds_1 dA_1 dt \bar{u}_1 + m\bar{v}(1'221')_t \\
&= \rho u_1 dA_1 dt \bar{u}_1 + m\bar{v}(1'221')_t
\end{aligned} \tag{2.38}$$

$t + dt$  anında sistemin momentumu;

$$\begin{aligned}
m\bar{v}_{t+dt} &= m\bar{v}(1'221')_{t+dt} + m\bar{v}(22'2'2)_{t+dt} \\
&= m\bar{v}(1'221')_{t+dt} + \rho ds_2 dA_2 dt \bar{u}_2 \\
&= m\bar{v}(1'221')_{t+dt} + \rho u_2 dA_2 dt \bar{u}_2
\end{aligned} \tag{2.39}$$

$dt$  zaman aralığında sistemin momentumundaki değişme

$$dm\bar{v} = m\bar{v}_{t+dt} - m\bar{v}_t \tag{2.40}$$

Akım zamanla değişmediğine göre  $m\bar{v}(1'221')_t = m\bar{v}(1'221')_{t+dt}$  olmalıdır. O halde Denklem (2.38) ve (2.39) dan;

$$dm\bar{v} = \rho u_2 dA_2 dt u_2 - \rho u_1 dA_1 dt u_1 \tag{2.41}$$

veya

$$\frac{dm\bar{v}}{dt} = \rho u_2 dA_2 u_2 - \rho u_1 dA_1 u_1 \tag{2.42}$$

Denklem (2.37) ve (2.42) denklemlerinden

$$\sum \vec{F} = \rho u_2 dA_2 u_2 - \rho u_1 dA_1 u_1 \tag{2.43}$$

Bu denklem impuls-momentum denklemidir (Sümer ve Diğ, 1983). Denklem her iki tarafının integrali alınırsa;

$$\int \sum \vec{F} = \rho u_2 u_2 \int_{A_2} dA_2 - \rho u_1 u_1 \int_{A_1} dA_1 \tag{2.44}$$

$$\int \sum \vec{F} = \rho(u_2 A_2)u_2 - \rho(u_1 A_1)u_1 \quad (2.45)$$

$$\int \sum \vec{F} = \rho Q_2 u_2 - \rho Q_1 u_1 \quad (2.46)$$

Sürtünmesiz akışkanlarda hız, kesit içerisinde değişmediğine göre (Şekerdağ, 1993),

$$1-1 \text{ kesitinde,} \quad u_1 = v_1 = \text{sabit}$$

$$2-2 \text{ kesitinde,} \quad u_2 = v_2 = \text{sabit}$$

olduğundan burada  $\int \sum F$  1221 kontrol hacmine etki eden toplam kuvvet olup  $R$  ile aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\vec{R} = \rho Q (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad (2.47)$$

Burada,

$$\rho \quad : \text{Kontrol hacminden geçen akışkanın yoğunluğunu (t/m}^3\text{),}$$

$$Q \quad : \text{Kontrol hacminden geçen debiyi (m}^3\text{/sn),}$$

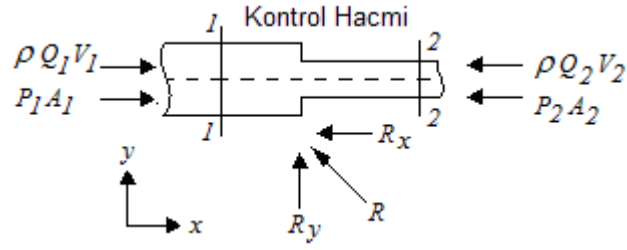
göstermektedir.

Burada üç kuvvet vardır ve toplamı sıfıra eşittir. Cisimler mekaniğinde; eğer bir sisteme etkiyen kuvvetlerin toplamı sıfır ise, bu kuvvetlerin denge halinde olacağı bilinir. O halde bu üç kuvvet denge halinde olup problem bir statik probleme dönüşmüş olur (Şekerdağ, 1993).

Bu kuvvetlerin yatay ve düşey toplamı,

$$\sum F_x = 0 \quad \text{ve} \quad \sum F_y = 0 \quad (2.48)$$

şartını sağlamaktadır.



Şekil 2.10. Ani Daralan Boru.

Yukarıda Şekil 2.10'da, ani daralan veya genişleyen borularda basit formda impuls-momentum denklemi sistemi görülmektedir. Kontrol hacminde genel halde denge denklemleri,

$$\sum F_x = 0 \quad P_1 A_1 + \rho Q_1 V_1 - P_2 A_2 - \rho Q_2 V_2 - R_x = 0 \quad (2.49)$$

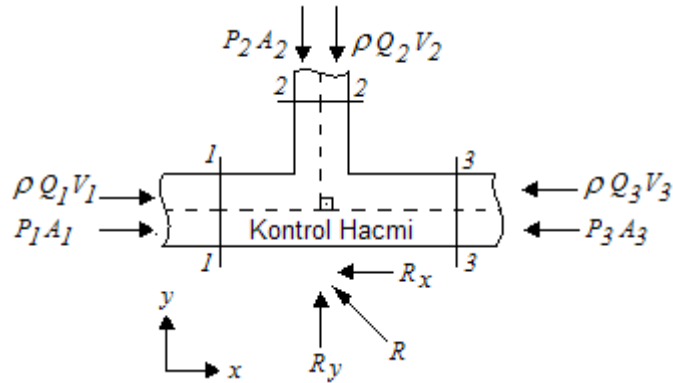
$$\sum F_y = 0 \quad R_y = 0 \quad (2.50)$$

Bileşke kuvvet  $R$  ise,

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = R_x \quad (2.51)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

Deniz deşarj sistemlerinde difüzör çıkış yapıları çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Bu kısımda dik çıkışlı difüzör (T dirsek) ve düşey kollu difüzör çıkışı üzerinde ayrıntılı gösterilmiştir (Şekil.2.11).



Şekil 2.11. Dik Çıkış (T dirsek)

Difüzörde çıkışların boru eksenine dik olması halinde akışkan çıkışları hem yatay hem de düşey düzlemde gerçekleşmektedir (Şekil 2.11). Bunun sonucunda hem yatayda hem de düşeyde tepki kuvvetleri doğmaktadır. Genel hali ile kontrol hacminin denge denklemleri:

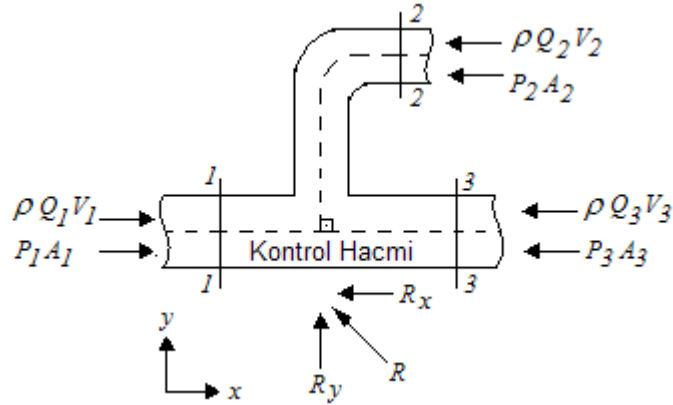
$$\sum F_x = 0 \quad P_1 A_1 + \rho Q_1 V_1 - P_3 A_3 - \rho Q_3 V_3 - R_x = 0 \quad (2.52)$$

$$\sum F_y = 0 \quad P_2 A_2 + \rho Q_2 V_2 - R_y = 0 \quad (2.53)$$

bileşke kuvvet  $R$  ise,

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (2.54)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.12. Düşey Kollu Çıkış

Düşey kollu difüzörde düşeyde bir akışkan çıkışı olmadığı için tepki kuvvetleri düşeyde toplamı sıfır olacaktır (Şekil 2.12). Akışkan çıkışları yatay düzlemde olduğu için tepki kuvvetleri de yatayda oluşmaktadır. Genel hali ile kontrol hacminin denge denklemleri,

$$\sum F_x = 0 \quad P_1 A_1 + \rho Q_1 V_1 - P_2 A_2 - \rho Q_2 V_2 - P_3 A_3 - \rho Q_3 V_3 - R_x = 0 \quad (2.55)$$

$$\sum F_y = 0 \quad R_y = 0 \quad (2.56)$$

bileşke kuvvet  $R$  ise,

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = R_x \quad (2.57)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

Burada,

$P$  : Boru iç basıncını (  $\text{kN/m}^2$  ),

$A$  : Boru enkesit alanını (  $\text{m}^2$  ),

$V$  : Akışkan hızını (  $\text{m/sn}$  ),

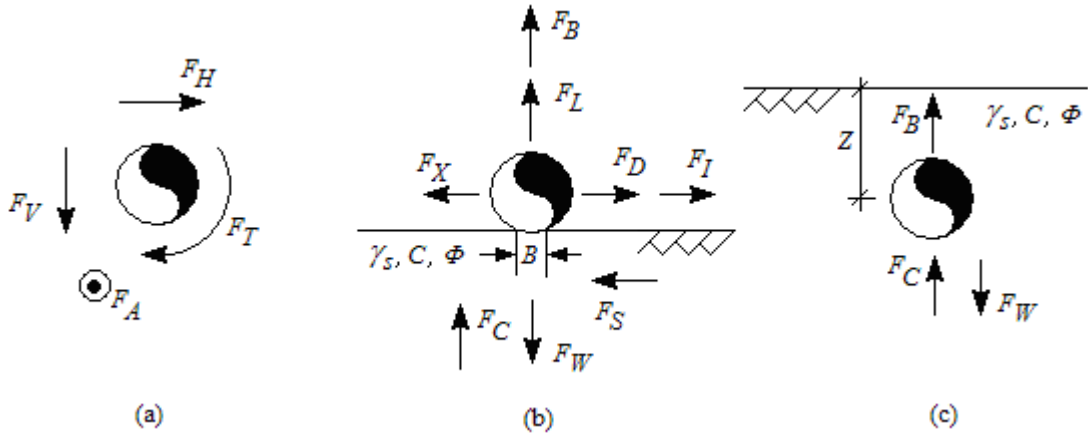
$R_x, R_y$  : Yatay ve düşey reaksiyon kuvvetlerini (  $\text{kN}$  ),

göstermektedir. Diğer büyüklükler daha önce tanımlandığı gibidir.

### 3.0. STABİLİTE HESABI

#### 3.1. Deniz Borularının Stabilitelerini Etkileyen Kuvvetler

Değişken kesitli borunun deniz altında olması durumunda boru birim boyuna etkiyen düşey ve yatay kuvvetler borunun yapıldığı malzeme, içinden geçen akışkan yoğunluğu ve bulunduğu ortam yoğunluğuna zemine gömülü veya yüzeye serbest döşenmiş olmasına bağlı olarak değişmektedir. Aşağıda verilen bağıntılarla bu kuvvetler hesaplanabilir. Deniz tabanına serbest oturtulmuş borulara kendi ağırlıkları yanı sıra hidrostatik, hidrodinamik ve birçok dış kuvvetler etmektedir. Zemine gömülmüş bir boruya ise kendi ağırlığı, boru üzerindeki zemin yükü ve hidrostatik kaldırma kuvveti etmektedir.



Şekil 3.1. (a) Difüzöre Etkiyen Kuvvetler, (b) Serbest Oturan Boru, (c) Gömülü Boru.

Şekil 3.1.a. da deniz ortamında boru hattına etkiyen kuvvetlerin bileşkesi görülmektedir.

Şekil 3.1.b-c de ise deniz tabanına oturan ve zemine gömülü tasarlanmış boru kesitleri ve bu kesitlere etkiyen dış kuvvetler görülmektedir.

Burada,

$F_A$  : Eksenel kuvveti (kN/m),

$F_H$  : Toplam yatay kuvveti (kN/m),

$F_T$  : Döndürme kuvvetini (kN/m),

$F_V$  : Toplam düşey kuvveti (kN/m),

göstermektedir.

Boruya etkiyen hidrostatik kaldırma kuvvetini veren bağıntı; boru hattının dışına etkiyen birim kuvvet ile boru içindeki akışkandan ileri gelen birim kuvvetin farkı olarak hesaplanır (Layton, 1976 ). Buna göre bağıntı,

$$F_B = \left( \gamma_a \frac{1}{4} \pi D^2 \right) - \left( \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D - 2s)^2 \right) \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Burada,

- $F_B$  : Hidrostatik kaldırma kuvvetini (kN/m),
- $\gamma_0$  : Akışkan birim hacim ağırlığını (kN/m<sup>3</sup>),
- $\gamma_a$  : Deniz suyu birim hacim ağırlığı (kN/m<sup>3</sup>),
- $D$  : Boru dış çapını (m),
- $s$  : Boru et kalınlığını (m),

göstermektedir.

Boru birim uzunluğunun ağırlığını veren bağıntı; boru hattının tek tip malzemedan yapılması durumunda aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$F_W = \gamma_b \frac{1}{4} \pi (D^2 - (D - 2s)^2) \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Kompozit malzemeli borularda da benzer işlem yapılmaktadır.

Burada,

- $F_W$  : Borudan kaynaklanan kuvveti (kN/m),
- $\gamma_b$  : Boru birim hacim ağırlığını (kN/m<sup>3</sup>),

göstermektedir.

Burada önemli bir ölçüt  $F_W \geq F_B + F_L$  olmasıdır. Eğer bu şart sağlanamıyorsa boru hattı yüzer konuma geçecektir. Bunun için boru hattı belirli aralıklarla tespit kitleleri ile ağırlaştırılır. Tespit kitleleri genellikle beton / betonarme bloklar halinde, taş bloklar halinde veya kum torbalarından oluşurlar.



Zemin yatak taşıma kapasitesini veren bağıntı;

$$F_C = \begin{cases} \left( N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_\gamma \gamma_s B \right) B & \text{kohezyonsuz zemin için} \\ (N_c C + \gamma_s z) B & \text{kohezyonlu zemin için} \end{cases} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Lambe, Whitman 1969),(Machemehl, 1978).

Burada,

- $F_C$  : Zemin yatak taşıma kapasitesini (kN/m),  
 $\gamma_s$  : Zemin birim hacim ağırlığını (kN/m),  
 $C$  : Zeminin kohezyon oranını,  
 $B$  : Borunun zemine oturan kısmının genişliğini (m),  
 $z$  : Boru hattının zemin yüzeyine olan uzaklığını (m),  
 $N_c, N_q, N_\gamma$  : Zemin yatak kapasite faktörlerini,

göstermektedir.

Deniz tabanına yerleştirilmiş Boru hattına etkiyen hidrodinamik kuvvetler; sürüklenme kuvveti, atalet kuvvetini ve hidrodinamik kaldırma kuvvetidir (Beattie, v.d., 1971), (Grace, 1978), (Yamamoto v.d., 1974). Bu kuvvetleri veren bağıntılar ise:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_a D U^2 \quad (3.4)$$

$$F_I = \frac{1}{2} C_I \rho_a D^2 \dot{U} \quad (3.5)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_a D U^2 \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Burada,

- $F_L$  : Hidrodinamik kaldırma kuvvetini (kN/m),

- $F_D$  : Sürüklenme kuvvetini (kN/m),  
 $F_I$  : Atalet kuvvetini (kN/m),  
 $C_D$  : Boyutsuz sürüklenme katsayısını,  
 $C_I$  : boyutsuz atalet katsayısını,  
 $C_L$  : Kaldırma katsayısını,  
 $U$  : Boru dışı akışın hızını (m/sn),  
 $\dot{U}$  : Boru dışı akışın ivmesini (m/sn<sup>2</sup>),  
 $\rho_a$  : Deniz suyu birim hacim yoğunluğunu (t/m<sup>3</sup>),

göstermektedir. Diğer büyüklükler daha önce tanımlandığı gibidir.

Yatay yönde sistemin hareketini engelleyen Sürtünme kuvvetini veren bağıntı:

$$F_S = \begin{cases} F_V \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) & \text{kohezyonsuz zemin için} \\ C B + \left( \frac{1}{2} \gamma_s z + 2C \right) Z & \text{kohezyonlu zemin için} \end{cases} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Karal, 1977).

Burada,

- $F_S$  : Birim sürtünme kuvvetini (kN/m),  
 $\phi$  : Zemin içsel sürtünme açısını (Derece),  
 $a$  : zemin yüzeysel sürtünme açısı (Derece) ( $a = \phi / 2$ ),

göstermektedir. Diğer büyüklükler daha önce tanımlandığı gibidir.

Boru ile zemin arasındaki sürtünme direnci yataydaki diğer sürüklenme ve atalet kuvvetlerinin toplamından büyük olması şartı sağlanmalıdır. Bunun için  $F_S > F_D + F_I$  olmalıdır.

### 3.2. Zemine Gömülü Borulara Etkiyen Zemin Yükü ve Yatak Katsayısı

#### 3.2.1. Zemin Yükü

Esnek boruların toprak basıncı altındaki yatay ve düşey yöndeki şekil değiştirmelerinin hesabında, boru etrafındaki dolgu zemininin karşı reaksiyonunu da dikkate alan Spangler-lowa formülü kullanılmaktadır (WPCF, ASCE, 1970).

$$\delta = D_e \frac{K_y W r_m^3}{E_b I + 0,061 E' r_m^3} \quad (3.8)$$

Burada,

- $W$  : Birim boya etkiyen düşey dolgu zemin yükünü (kN/m),
- $D_e$  : Şekil değiştirme geciktirme faktörünü (1,25 – 1,5),
- $K_y$  : Boru yataklama sabitini (0,083 – 0,11),
- $r_m$  : Ortalama boru yarıçapını (m), ( $r_m = D_m / 2$ ),
- $E_b$  : Boru malzemesi elastisite modülünü (kN/m<sup>2</sup>),
- $I$  : Boru Enkesit atalet momentini (m<sup>4</sup>),
- $E'$  : Zemin reaksiyon modülünü (kN/m<sup>2</sup>),

göstermektedir. Zemin reaksiyon modülü karada elle sıkıştırılmış zeminlerde 35-93 (50) kg/cm<sup>2</sup> tür. Su altındaki hendek dolgularında ise  $E' \approx 20$  kg/cm<sup>2</sup> alınması tavsiye edilmektedir.

Birim boru boyuna gelen zemin basıncıda,

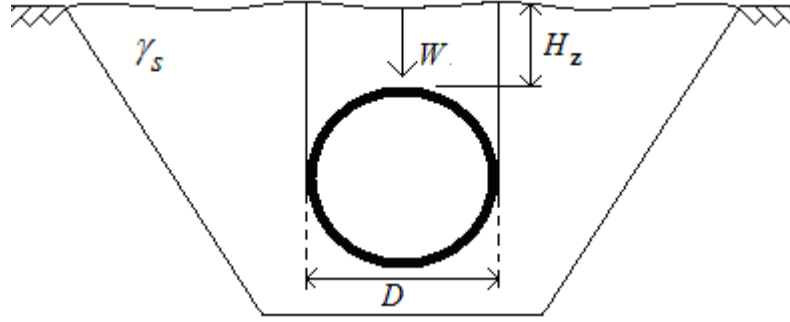
$$W = C_b \gamma_s D H_z \quad (3.9)$$

Burada,

- $H_z$  : Boru sırtından itibaren dolgu yüksekliğini (m),
- $C_b$  : Boru cinsine bağlı bir katsayıyı göstermektedir. Diğer büyüklükler daha önce

tanımlandığı gibidir.  $C_b$  katsayısı,

Rijit borular için	( Betonarme, Font, AÇB)	$C_b > 1$	
Yarı rijit borular için	(Çelik, PVC, CTP)	$C_b \approx 1$	
Esnek borular için	(PE, YYPE, PP)	$C_b < 1$	alınabilir.



Şekil 3.2. Zemine Gömülmüş Boru Enkesiti.

Deformasyon limitleri de,

Plastik borularda  $\delta / D_m < 0,05$

İçten beton kaplı çelik borularda  $\delta / D_m < 0,02$

olmalıdır.

Burada  $D_m$  boru ortalama çapıdır (m), ( $D_m = D - s$ ).

Toprak yüklerinden dolayı boru enkesitinde meydana gelen gerilmeler, çeşitli yükleme ve mesnetlenme durumları için aşağıdaki ifadelerden hesaplanabilir. Tekil yükleme halinde,

$$M_{maks} = 0,32 W_c r_m \quad (3.10)$$

şeklinde olmaktadır. Çizgisel yükleme halinde ise,

$$M_{maks} = 0,588 p r_m^2 \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Yayılı yükleme durumunda ise moment,

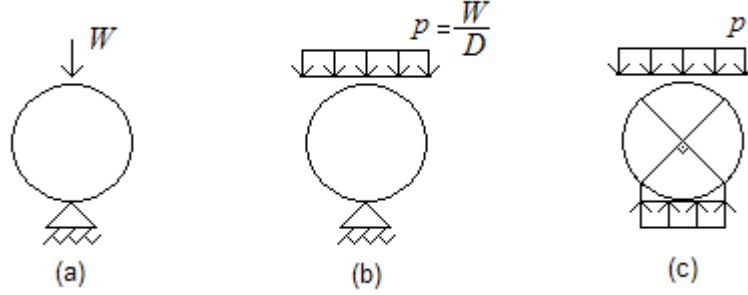
$$M_{maks} = 0,24 p r_m^2 \quad (3.12)$$

halini almaktadır. Momentin bulunmasından sonra gerilme denklemi ise,

$$\sigma = \frac{M}{I} \frac{s}{2} \geq \sigma_{em} \quad (3.13)$$

şeklindedir.

Burada,  $W_c$  : Boru enkesitinin mukavemet momentini ( $m^3$ ),  
 $s$  : Boru et kalınlığını (m),  
 $\sigma$  : Gerilmeyi ( $kN/m^2$ ),  
göstermektedir.



Plastik borularda zemin yüklerinden ortaya çıkan gerilme ve şekil değiştirmelerinin hesabı aşağıdaki özel ifadelerle de yapılabilir (Janson, 1989),

Düşey zemin basıncı sebebiyle eliptik deformasyon (ovalleşme) gösteren gömülü plastik borularda oluşan eğilme momenti,

$$M = m_s \delta E_b \frac{I}{r_m^2} \quad (3.14)$$

ifadesi ile verilir. Buradaki  $m_s$  sabiti,

$$\text{Eliptik ovalleşme için,} \quad m_s = 1,5$$

$$\text{Mesnetli veya sıkıştırılmış tabanlı hal için,} \quad m_s = 2,14$$

alınır.

Düşey deformasyon oranı da,

$$\frac{\delta}{D_m} = \frac{0,083W}{8S_R + 0,122E'} \quad (3.15)$$

ifadesinden hesaplanabilir. Burada  $S_R$  borunun rijitlik faktörü olup,

$$S_R = \frac{E_b I}{D_m^3 (1 - \nu^2)} \quad (3.16)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada  $\nu$ , borunun büzülme katsayısını göstermektedir.

Yukarıda denklemde verilen  $m_s$  sabiti

$$\begin{aligned} S_R = 2-8 \text{ kN/m}^2 \text{ için} \quad m_s = 3 \\ S_R = > 8 \text{ kN/m}^2 \text{ için} \quad m_s = 1,5 \end{aligned} \quad \text{alınır.}$$

Yüksek rijitlikli borularda (Betonarme, Font, AÇB gibi)  $S_R > 8$  için  $\delta / D_m$  ifadesinde 8 yerine 16 kullanılmalıdır. Zemin yükleri dolayısı ile  $\delta$  düşey deformasyon meydana gelen borulardaki eğilme gerilmesi,

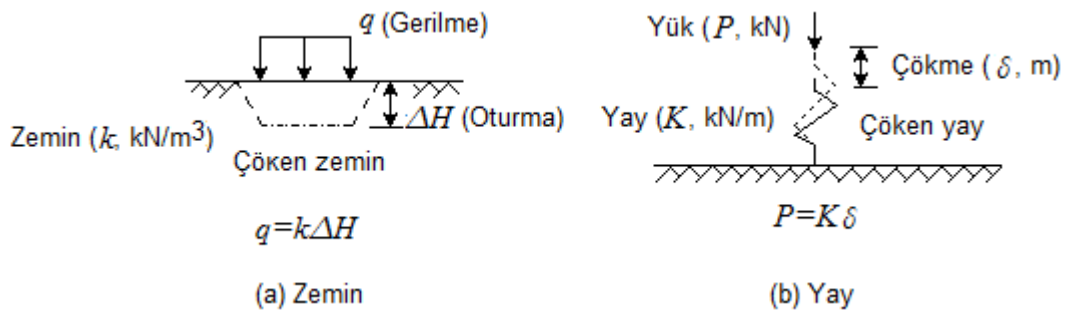
$$\sigma = 2m_s E_b \frac{\delta}{D_m} \frac{s}{D_m} \quad (3.17)$$

ifadesinden hesaplanabilir.

### 3.2.2. Yatak Katsayısı

Yatak katsayısı  $k_s$ ; zemin üzerinde, bir noktadaki basınç ( $q$ ) ile, bunun meydana getirdiği oturma ( $\Delta H$ ) arasında aşağıdaki gibi tanımlanır.  $q$  ( $\text{kN/m}^2$ ),  $\Delta H$  (m),  $k_s$  ( $\text{kN/m}^3$ ) (Uzuner, 2006).

$$k_s = \frac{q}{\Delta H} \quad \text{veya} \quad q = k_s \Delta H, \quad (3.18)$$



Şekil 3.4. Yatak Katsayısının Tanımı ve Bir Yayla Olan Benzeşimi. (Uzuner, 2006)

Buna göre; zemindeki basınç, çökme ile orantılıdır. Böylece zemin adeta yaylardan oluşmuş gibi düşünülebilir. Her ne kadar zemin elastik, doğrusal davranmıyorsa da bazı yaklaşık yöntemlerde öyle davrandığı kabul ediliyor. Bu yöntemler yararlı sonuçlar da sağlarlar.

Yatak katsayısı,  $k_s$ , birçok etmene (zeminin cinsi (kohezyonlu veya kohezyonsuz) ve durumu (taneli zeminlerde sıkılık, kohezyonlu zeminlerde sertlik), temel genişliği vb.) bağlıdır.  $k_s$ 'nin belirlenmesi için birçok yöntem olup; bunlardan başlıcası, plaka yükleme deneyidir. Yatak katsayısı bu deneyin oturma—yük grafiğinin ilk doğrusal kısmından hesaplanır. Plakadan temele geçişte bazı bağıntılar kullanılır. Aynı basınçla yüklü temel plakadan daha fazla oturma yapar. Çünkü temelin etkilediği derinlik daha fazladır. Kohezyonlu zeminlerde (kil vb.),

$$k_s = k_p \frac{B_p}{B_t} \quad (3.19)$$

kullanılır. Kohezyonsuz zeminlerde (kum, çakıl, vb.),

$$k_s = k_p \left( \frac{B_p + B_t}{2B_t} \right)^2 \quad (3.20)$$

kullanılır. Burada,

$k_p$  : Plaka için yatak katsayısı ( $\text{kN/m}^3$ ),

$B_p$  : Plaka genişliği (veya çapı) (m),

$B_t$  : Temel genişliğini (m),

göstermektedir.

Yatak katsayısı kabaca çizelgelerden de, zemin cinsine bağlı olarak alınabilir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Zemin Cinsine Göre Tipik Yatak Katsayısı Değerleri (Bowles, 1996)

Zemin Cinsi	$k_s$ ( $\text{kN/m}^3$ )
Gevşek kum	4800-16000
Orta sıkılıkta kum	9600-80000
Sıkı kum	64000-128000
Killi orta sıkılıkta kum	32000-80000
Siltli orta sıkılıkta kum	24000-48000
Killi zeminler	
$q_a \leq 200$ kPa	12000-24000
$200 < q_a \leq 800$ kPa	24000-48000
$q_a > 800$ kPa	>48000

### 3.3. Yatay ve Düşey Stabilite Hesabı

Boru hattının düşey veya yatay konumda dış kuvvetler etkisinde yer değiştirmemesi gerekir. Bunun içinde düşeyde veya yatayda hareketi engelleyen kuvvetler daima harekete zorlayan kuvvetlerden büyük olması gerekmektedir. Düşey doğrultuda yazılacak stabilite denklemi

$$\sum F_V = F_W - F_B - F_L \geq 0 \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus hareketi engelleyen kuvvetler mühendislik insiyatifine bağlı bir güvenlik sayısı ile çarpılmış hareket ettiren kuvvetlerden de büyük olması gerekmesidir (Jeffrey, v.d. ). Güvenilir durumlar için bağıntı,

$$(F_B + F_L)G_S \leq F_W \quad (3.19)$$

$$F_C \geq G_S F_W \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,  $G_S$ : Güvenlik sayısını, ( $> 1,1$  ) göstermektedir. Yatay stabilite hesabı da düşeydeki gibidir. Bağıntı ise:

$$\sum F_H = F_D + F_I - F_S \leq 0 \quad (3.21)$$

şeklindedir. Aynı şekilde güvenilir tarafta kalmak için hareketi engelleyen kuvvet daima güvenlik sayısı ile çarpılmış hareket ettiren kuvvetlerden büyük olmalıdır.

$$(F_I + F_D)G_S \leq F_S \quad (3.22)$$

şeklinde ifade edilebilir. Özetle zeminin yatay ve düşey direnci, toplam yatay ve toplam düşey kuvvetleri güvenle taşıyabilmelidir.

$$\sum F_V < F_C \quad \sum F_H < F_S \quad (3.23)$$

olmalıdır.

Deniz yapılarında minimum güvenlik sayısı 1,5 alınması önerilmektedir (Öztürk,1996).



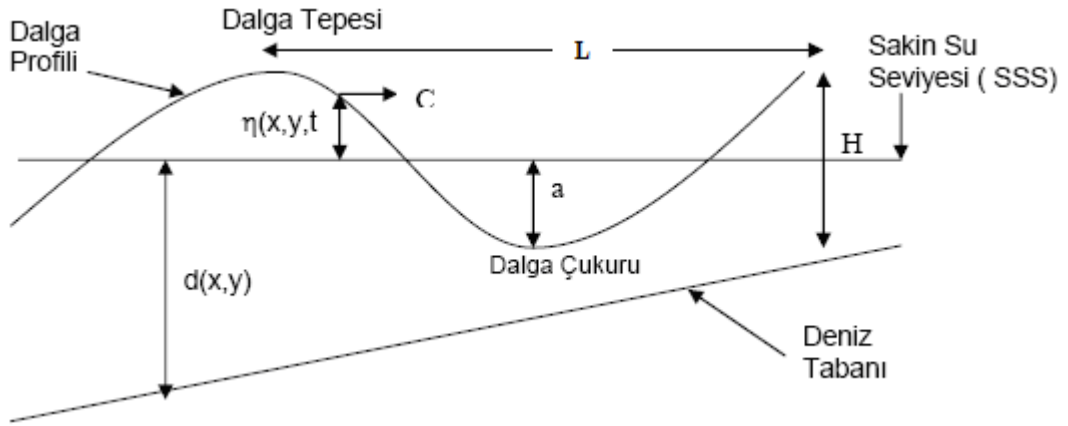
#### 4. DALGA VE DERPEM KUVVETLERİ

##### 4.1. Dalga Kuvvetleri (Lineer Teori);

Bütün dalga teorileri, dalgaların periyodik ve üniform olduğunu kabul eder.(Periyot T, dalga yüksekliği H) Periyot, dalga tepesinin bir dalga uzunluğu kadar mesafeyi kat etmesi için gereken zamandır. Dalga yüksekliği ise iki dalga arası çukur ile dalga tepesi arasındaki dikey mesafedir. Dalga uzunluğu, dalganın yayılım yönünde birbirini izleyen dalgaların benzer noktaları arasında (L) ölçülen yatay mesafedir. Periyodik bir dalga için tepe noktasının ve çukur noktasının hızı yayılım hızı olarak adlandırılır. Bu hız basit şekilde;

$$c = \frac{L}{T} \quad (4.1)$$

olarak verilebilir.



Şekil 4.1. Lineer Dalga Parametrelerinin Genel Tanımı.

Dalgalar x,y düzleminde iki boyutlu olarak düşünülür. Deniz tabanı örselenmiştir ve derinliği (d) yatay olarak kabul edilir. Burada d mesafesi deniz tabanından durgun su seviyesine olan mesafedir. Dalgalar pozitif x yönünde ilerler.

Bir dalga hareketi genelde H,T,d ile ifade edilir. Herhangi bir dalga teorisi için problem akım alanına mahsus olan hız potansiyelini ( $\Phi$ ) veya aynı şekilde akım fonksiyonu ( $\Psi$ ) bulmaktır.

Sınır değer problemi iki boyutlu olarak özetlenirse;

Diferansiyel denklem: 
$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (4.2)$$

Taban sınır koşulu:

$$y = -d \quad \text{için} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (4.3)$$

Serbest yüzey kinematik koşulu:

$$y = \eta \quad \text{için} \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (4.4)$$

Serbest yüzey dinamik koşulu:

$$y = \eta \quad \text{için} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad (4.5)$$

Potansiyel fonksiyon, Laplace denklemini (4.2) ve üç sınır koşulunu sağlamak zorundadır. Bu problemin çözümü zordur. Çünkü serbest yüzey sınır koşulları nonlineerdir ve sürekli olarak değişen bir yapıya sahiptir.

Küçük genlikli dalga teorisi en basit ve en çok kullanılan dalga teorisidir. Bu teori aynı zamanda airy teori veya sinüsoidal teori olarak da bilinir. Bu teoride dalga yüksekliği, dalga uzunluğuna veya su derinliğine kıyasla daha küçüktür. Bu teori, birinci mertebedeki dalga yüksekliği terimlerini düşürerek, serbest yüzey sınır koşullarını doğrusallaştırmaya imkan tanır. Aynı şekilde serbest yüzey koşullarını dalgalanan bir yüzeyden ziyade normal su seviyesinde sağlanmasına da imkan tanır. Potansiyel fonksiyonun çözümü ( $\Phi$ ) boyutsuz perturbasyon parametresi olan  $\varepsilon$ 'un terimlerinin seri açılımı ile elde edilir.

$$\varepsilon = \frac{kH}{2} \quad (4.6)$$

Burada  $k$  dalga sayısıdır. Bu ifade  $k = 2\pi / L$  ile verilir. Böylece

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \Phi_n \quad (4.7)$$

Burada  $\Phi_n$ ,  $\Phi$  için n. dereceden çözümdür. Benzer şekilde ( $\eta$ ) dalga profili

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \eta_n \quad (4.8)$$

şeklinde tanımlanabilir

Lineer teori 1. mertebe çözümüyle ilgilenir. Dolayısıyla  $\Phi$  ve  $\eta$ 'in açılımlarında ilk terimler tutulur ve serbest yüzey tabaka koşullarında yerine yazılırsa; denklem (4.4) ve (4.5) şu şekli alır:

$$y=0 \quad \text{için} \quad \frac{\partial \eta_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0 \quad (4.9)$$

$$y=0 \quad \text{için} \quad \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} + g \eta_1 = 0 \quad (4.10)$$

Denklem (4.10)'dan serbest yüzey profili;

$$y=0 \quad \text{için} \quad \eta_1 = -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} \right) \quad (4.11)$$

şeklinde verilebilir.

İki serbest yüzey sınır koşulu denklemi, bilinmeyenlerden biri ihmal edilerek tek denklemde yazılabilir.

$$y=0 \quad \text{için} \quad \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0 \quad (4.12)$$

Sınır değer problemindeki diğer eşitlikler denklem (4.2) ve (4.3) ile aynıdır. c hızında ilerleyen bir dalga için periyodiklik  $\alpha = x - ct$  şeklinde verilebilir.  $\alpha$ 'nın bu formu zamanın x' in negatif

yönünde ilerlediğini gösterir (dalga yayılım yönü +x boyunca). Alternatif olarak zaman  $-x$  eksenini boyunca dalga yayılım yönünde ilerliyorsa  $\alpha = x + ct$  yazılabilir. Bu tip sınır değer problemi değişken ayrıştırma tekniği ile çözülür.  $\Phi_1$  fonksiyonunun;

$$\Phi_1 = Y(y)\Lambda(\alpha) \quad (4.13)$$

şeklinde olduğu söylenebilir.

Bu denklem kısmi diferansiyel denklemde yerine konduğunda iki diferansiyel denklem meydana getirir.

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} - k^2 Y = 0 \quad (4.14)$$

$$\frac{d\Lambda}{d\alpha} - k^2 \Lambda = 0 \quad (4.15)$$

Burada  $k^2$  sabittir. Genel çözüm;

$$Y = A_1 \cosh ky + A_2 \sinh ky \quad (4.16)$$

$$\Lambda = A_3 \cos[k(x - ct)] + A_4 \sin[k(x - ct)] \quad (4.17)$$

şeklinde verilebilir.

$x=0$  noktasında  $\eta_1 = H/2$  ( $t=0$ ). Böylelikle  $A_3 = 0$  yazılabilir. Taban sınır koşulundan  $A_2 = A_1 \tanh kd$  yazılabilir.

Denklem (4.13)'e göre  $\Phi$  şöyle yazılabilir.

$$\Phi = A_5 \frac{\cosh k(y + d)}{\cosh kd} \sin[k(x - ct)] \quad (4.18)$$

Burada  $A_5 = A_1 \cdot A_4$  Tekrar  $\eta = H/2$  olduğunu hatırlarsak;  $A_5 = gH/2kc$  elde ederiz. Denklem (4.18)'den  $L = 2\pi/k$ ,  $T = 2\pi/kc$ ,  $c=L/T$ ,  $KC=w$  elde edilir.

Buradan sonra  $s=y+d$  ve  $\Theta = k(x - ct)$  yazılarak birinci mertebe hız potansiyeli ( $\Phi = \varepsilon\Phi_1$ )

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \sin \Theta \quad (4.19)$$

olarak yazılabilir.

Denklem (4.11)'den

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta \quad (4.20)$$

yazılabilir.

$\Phi$  değerini denklem (4.12)'de yazarsak, lineer ayrılma ilişkisi olan

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (4.21)$$

elde ederiz.

Denklem (4.19) ve (4.21) birleştirilerek  $\Phi$  için alternatif bir form yazılabilir.

$$\Phi = \frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (4.22)$$

Benzer şekilde;  $c=w/k$  olduğu hatırlanarak ayrılma ilişkisine alternatif olarak;

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \quad (4.23)$$

yazılabilir.

Dalga boyu için de aynı şekilde;

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (4.24)$$

yazılabilir.

Denklem (4.24)'de görüldüğü gibi dalga boyu T ve d' ye bağlıdır. Dolayısıyla dalga boyu direkt olarak hesaplanamaz. Dalga boyu için derin su değerleriyle başlayan bir tekrarlama tekniği kullanılabilir. Daha sığ sularda, tekrarlamaı sığ su yaklaşımıyla başlatmak daha verimli olur. Orta derinlikte sular için ise dalga boyu için daha basit bir formül verilebilir.

$$L = L_0 [\tanh(2\pi d / L_0)]^{1/2} \quad (4.25)$$

Burada  $L_0$  derin sulardaki dalga boyudur. Verilen bir su derinliği ve periyotta, dalganın kırılmaya başladığı bir üst sınır vardır. Dalga kırılması için Stokes kriteri, dalga tepesindeki akışkan parçasının hızının yayılma hızına ulaşmasıdır. Yayılım hızından daha büyük hızlarda dalganın ileri doğru itilerek kırılacağı sezgisel olarak açıktır. Stokes'un kırılan dalga kriteri, dalga tepesi açısının  $120^{\circ}$ 'den fazla olmamasıdır. Derin suda dalga dikliği limiti;

$$\frac{H_b}{L_0} = 0,142 \quad (4.26)$$

ile verilebilir.

$H_b$  kırılan dalga yüksekliğidir. Yaklaşık olarak derin sudaki dalga uzunluğunun yedide biridir. Sonlu bir su derinliği için dalga dikliği orta su parametresine benzer bir hal alır.

$$\frac{H_b}{L} = 0,142 \tanh kd \quad (4.27)$$

Burada L orta sulardaki dalga genişliğidir.

X ve Y yönlerindeki akışkan parçacığı hızları;

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (4.28)$$

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (4.29)$$

ile verilebilir.

Denklem (4.22) sırasıyla  $x'$  e ve  $y'$  ye göre diferansiyelini alırsak, akışkan parçacığının yatay hızı;

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \Theta \quad (4.30)$$

ve dikey hızı;

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (4.31)$$

olarak yazılabilir.

Aynı şekilde akışkan parçacığının  $x$  ve  $y$  yönündeki ivmeleri;

$$\text{Yatay: } \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (4.32)$$

$$\text{Dikey: } \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \cos \Theta \quad (4.33)$$

şeklinde yazılabilir.

Bazı durumlarda denklem (4.19) kullanılarak  $u$  ve  $v$  için alternatif olarak;

$$u = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \cos \Theta \quad (4.34)$$

$$v = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\sinh ks}{\cosh kd} \sin \Theta \quad (4.35)$$

yazmak daha uygundur.

Benzer şekilde ivmeler;

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{gkH}{2} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \sin \Theta \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{gkH}{2} \frac{\sinh ks}{\cosh kd} \cos \Theta \quad (4.37)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklemler incelendiğinde yatay hızın maksimum olduğu durumda dikey hız sıfır olur. Bu iki hız için genelde genlik farklı olmasına rağmen, dalga döngüsü içinde, su parçacığının oval bir yörünge izlediği anlaşılabilir. Parçacığın deplasmanı  $u$  ve  $v$ ' nin  $t$ ' ye göre integre edilmesiyle bulunabilir. İntegre edilirken integral sabiti için uygun sınır koşulu eklenmelidir.

Parçacığın yatay ve dikey deplasmanı  $\xi$  ve  $\eta$  ;

$$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (4.38)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \cos \Theta \quad (4.39)$$

ile verilebilir.

Burada parçacığın normal su seviyesindeki maksimum dikey deplasmanının dalga genliği olan  $H/2$ 'ye eşit olduğu unutulmamalıdır.

Bu durumda hız potansiyeli ( $\Phi$ ) ve dinamik basınç ( $P$ ) birinci mertebe yapısında yer alır.

$$p = -\rho \varepsilon \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (4.40)$$



$$p = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \cos \Theta \quad (4.41)$$

tanh fonksiyonunun asimptotik değerlerinde bazı sadeleştirmeler yapılabilir. Mesela  $x$ ' in büyük değerleri için;  $\text{Tanh}x \approx 1$ 'dir. Bu ifade  $x \gg \pi$  değerleri için %0,4 hata payı ile doğrudur.

Aynı şekilde küçük  $x$  değerleri için  $\text{tanh}x \approx x$ . Bu ifadede  $x \ll \pi/10$  için %0,1 hata ile kabul edilebilir.

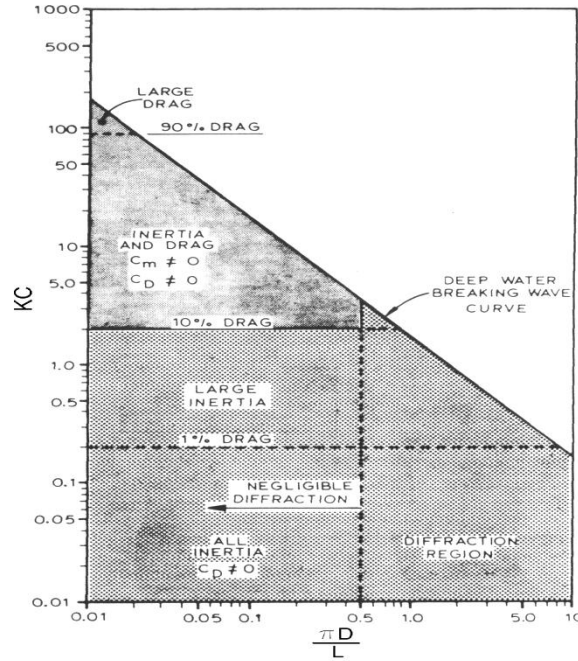
#### 4.1.1. Hidrodinamik Dalga Kuvvetleri

Dalga hareketi; düzenli (regular) ve düzensiz (irregular) dalgalar olmak üzere iki grupta incelenebilir. Bu çalışma kapsamında; düzenli (sinüzoidal) dalga ortamındaki gelişmeler göz önüne alınmıştır. Kararlı akıntı koşullarında, akış etkisiyle boru üzerinde sürüklenme kuvveti doğmaktadır. Bu koşullarda, ivmesiz bir ortam söz konusu olduğundan dolayı atalet kuvvetleri ortaya çıkmamıştır. Kararsız akıntı olması durumunda da akışın atalet ve kaldırma kuvvetlerine neden olduğu değinilen bilgilerde yer almaktadır. Dalga ortamı, harmonik salınım gösteren yapısı ile kararlı akım olarak değerlendirilebilmektedir. Dolayısıyla, dalga etkisindeki akış koşullarında, kararlı akış halinden sürüklenme kuvvetini, kararsız akış halinden de atalet ve kaldırma kuvvetlerini birleştiren bir durum ortaya çıkmaktadır. Morison denkleminde bakıldığında da boru üzerindeki hidrodinamik kuvvetlerin, atalet (inertia) ve sürüklenme (drag) kuvvetlerinin birleşiminden müteşekkil olduğu görülmektedir. Bu nedendir ki, dalga kuvvetlerinin hesaplanmasında Morison denklemi dikkate alınacaktır. Dalga kuvvetlerinin belirlenmesinde Morison denkleminin ek olarak, Froude-Krylov Teorisi ve Difraksiyon Teorisi de kullanılmaktadır.

#### 4.1.2. Morison Denklemi Geçerlilik Ortamının Belirlenmesi

- 1) Boru çapı-dalga boyu ilişkisi ; (Dalga Boyu  $L$ ) > 5 (Boru Çapı  $D$ )  
(Sümer, Fredsoe,1997)
- 2) Dalga yüksekliği, boyu ve su derinliği ilişkisi; 1.0 <  $H/d$  < 4.0 ve  $d/L < 0.1$   
(Zienkiewicz, Lewis, Stagg,1978)
- 3) Boru Çapı, dalga boyu ve  $KC$  sayısı ilişkisi;  $KC$  katsayısının bütün artan  
değerlerine karşın difraksiyon parametresinin ( $\rho D/L < 1/2$ ) sınır değerine kadar Morison  
denklemi etkili olmaktadır.(Lakhan,Trenhaile,1989)

Sürüklenme kuvvetinin oldukça küçük ve atalet kuvvetlerinin ise egemen olduğu bir durum ile paralelinde bir de borunun  $D/L$  karakteristik boyutunun  $1/5$  değerinden çok küçük olması halinde Froude-Krylov teorisi geçerli olacaktır. Difraksiyon parametresinin ( $\rho D/L < 1/10$ ) ve  $KC < 2$  koşulları Froude-Krylov teorisinin kullanım ortamı hakkında Şekil.4.2 bilgi vermektedir.



Şekil.4.2.  $KC$  – Difraksiyon Parametresi İlişkisi (Lakhan, Trenhaile, 1989)

Küçük  $KC$  değerlerinde ( $KC < 2$ ) kararsız akış halini gösterir ve atalet kuvvetleri egemendir. Büyük değerlerinde ( $KC > 90$ ) ise kararlı akış haline uygun hareket eder ve sürüklenme kuvveti egemen olur.  $KC \leq 10$  ve daha küçük olması durumunda atalet kuvveti,  $KC \geq 15$  ve daha büyük değerlerinde sürüklenme kuvveti ve  $KC \geq 5$  ve daha büyük değerlerinde hidrodinamik kaldırma kuvveti artan önem kazanmaktadır. (Sarpkaya, Isaacson, 1981)

Difraksiyon teorisinde kullanım alanı belirgindir. Boru çapının dalga boyuna oranının, Morison denkleminin uygun bulunduğu sınırlardan büyük olması durumunda ( $D/L > 0.2$ ) kullanılabilir.

#### 4.1.3. Hidrodinamik Kuvvet Katsayılarının Seçimi

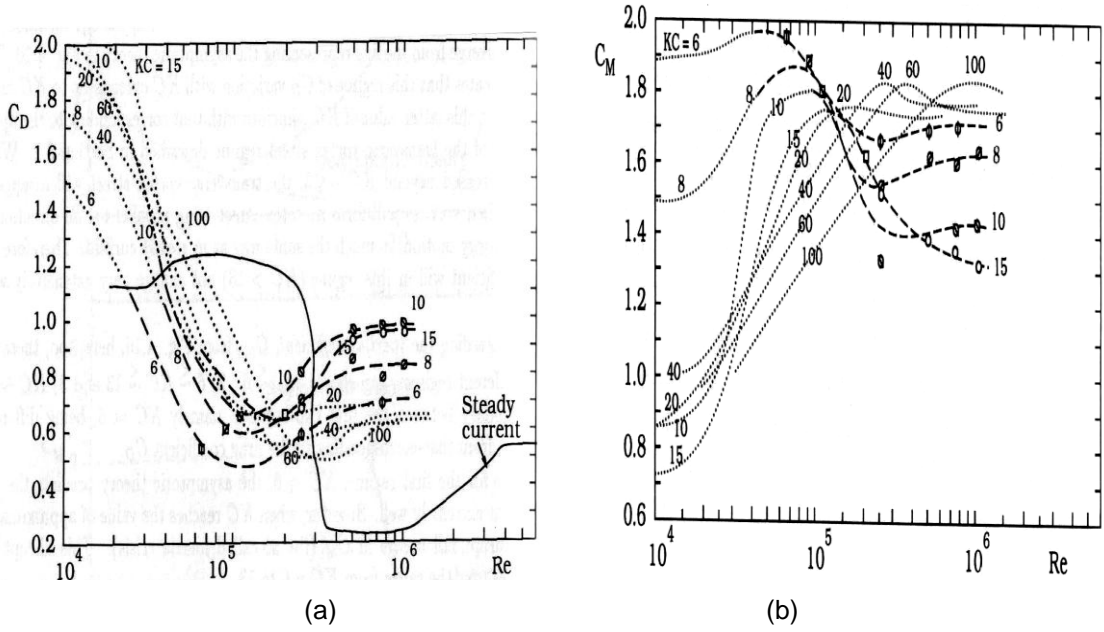
Dalga etkisindeki bir batık boru üzerine etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanmasında; akışa, boruya ve deniz suyuna ilişkin parametreler dikkate alınmaktadır. Akışa ilişkin

parametreler hız ve ivme, boruya ilişkin parametre çap, deniz suyuna ilişkin parametre ise yoğunluktur. Dalga etkisiyle oluşan akımın çizgileri boru cidarında sürtünmeye ve sınır tabakası oluşumuna, akış hızın yüksek olmasıyla da vortekse neden olmaktadır. Sürtünme etkisiyle akış yönünde sürükleme kuvveti, ivmeli hareket nedeniyle atalet kuvveti (eklenik kütle ile birlikte), borunun etrafındaki basınç alanlarının akış diki yönlerindeki asimetrisinden hidrodinamik kaldırma kuvveti ve borunun mansabındaki vorteks asimetrisinden de vorteks öteleme kuvveti doğmaktadır. Bu kuvvetlerin doğru ve hassas saptanmasında, doğru dalga teorisine dayanan dalga hız ve ivme değerlerinin, bu teorileri doğrulayan deneysel çalışmalarda hidrodinamik kuvvet katsayılarının ve boru hareketlenmesinden kaynaklanan borunun hareket hız ve ivmelerin doğru ve hassas tanımlanmasının önemi ve payı büyüktür. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular, çoğu zaman spesifik olmakta ve yalnız o deney koşullarına has hale gelmektedir. Bu çalışmada ise deneysel bulgulardan elde edilen hidrodinamik kuvvet katsayıları, kendisinin oluşumunda önemli rol oynayan boyutsuz parametrelere bağlı olarak geliştirilmiş grafikler yardımıyla belirlenecektir.

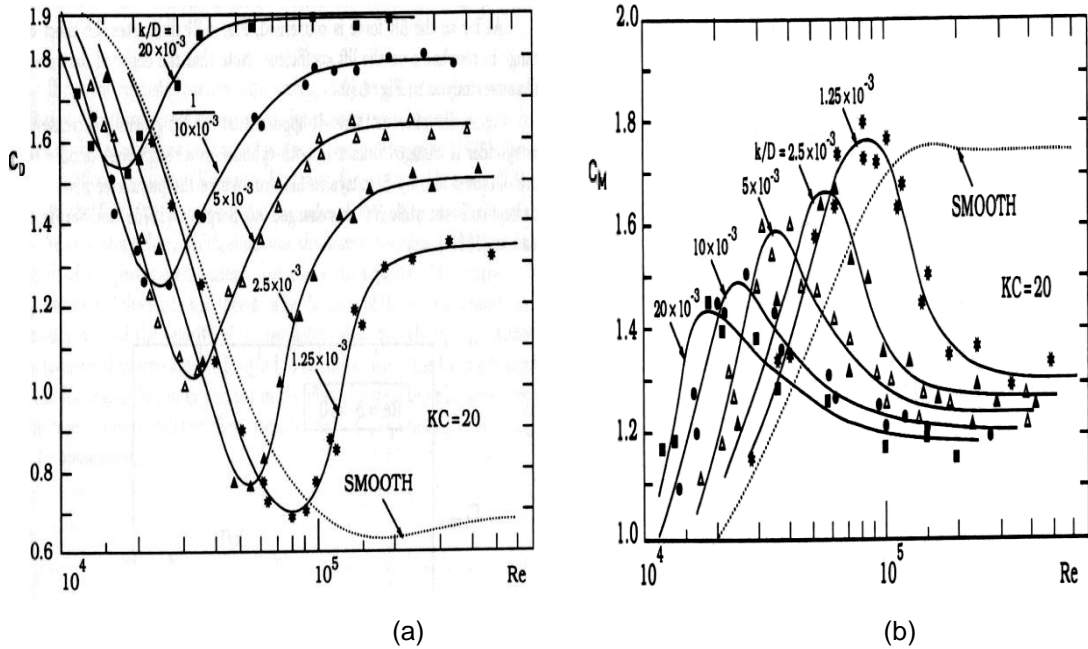
Bu çalışmada; hidrodinamik kuvvet katsayıları, dalgalı deniz ortamında esnek bir borunun salınımına ve lineer teori koşullarına elverişli olarak gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalardan üretilen grafikler kullanılmasıyla saptanacaktır. Ancak literatür taramaları göstermiştir ki referans grafikler ihtiyaca sınırlı cevap vermektedir. Koşullara uygun yapılmış deneylerin geniş taraması ile yararlanılan grafikler çoğaltılabilir ve genelleştirilebilir. Taranan çalışmalarda, düzenli dalgalı bir ortamdaki esnek ve askıdaki boru üzerinde oluşacak hidrodinamik kuvvet katsayılarının  $KC$ ,  $Re$ , pürüzlülük ve taban-boru arası açıklığın değişimiyle ilişkilendirilmesine spesifik olarak yer verilmiştir. Bu aşamada; iki alternatif yolla kuvvet katsayılarının belirlenmesi yoluna gidilmiştir.

İlk alternatifte; düzenli dalga ortamında deniz tabanına serbestçe yerleştirilmiş, pürüzsüz yüzeyli batık borunun sürükleme, atalet ve kaldırma kuvvet katsayıları ( $C_D$ ,  $C_M$  ve  $C_L$ ); sınırlı  $k/D$ ,  $e/D$ ,  $Re$  ve  $KC$  parametrelerinin değişimine göre belirlenmektedir. Bu katsayılar, hem akış yönünde (in-line) ve hem de akış yönüne dik (cross flow, transverse) yönde hareket dikkate alınarak saptanmıştır.

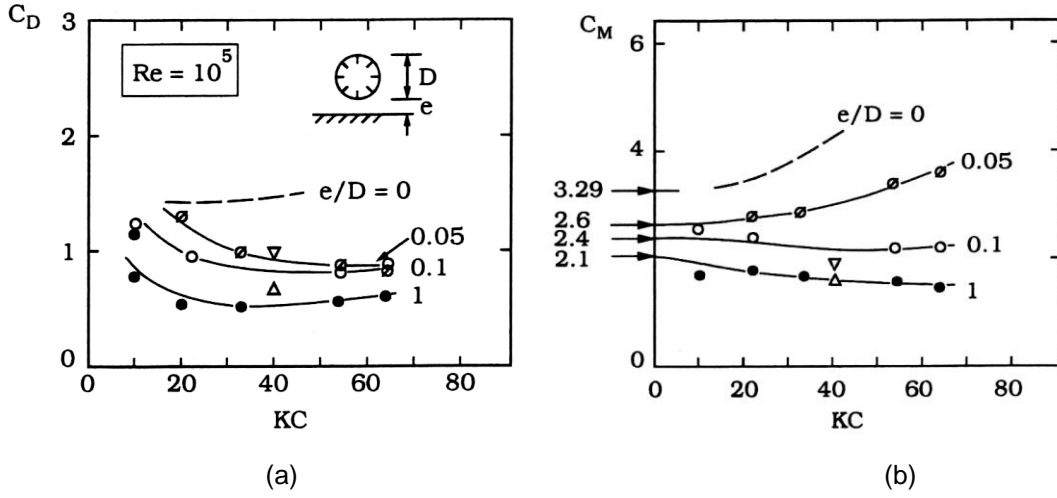
Deniz tabanına serbestçe döşenmiş, pürüzsüz boru üzerinde dalga kökenli akış yönünde (in-line) sürükleme  $C_D$  ve atalet  $C_M$  katsayıları,  $Re$  sayısına bağlı olarak farklı  $KC$  katsayıları için Şekil.4.3.a-b 'de, pürüzlülüğün etkisi  $KC$  sabit alınarak Şekil.4.4.a-b' de ve taban-boru arası açıklık etkisi  $Re$  sabit alınarak Şekil.4.5.a-b' de sunulmaktadır.



Şekil.4.3.a-b.  $C_D/C_M$  ile  $KC-Re$  ilişkisi dalga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line) katsayıları, (boru serbest deniz tabanına oturmakta, pürüzsüz yüzeyli silindirik boru) (Sarpkaya, Isaacson, 1981)

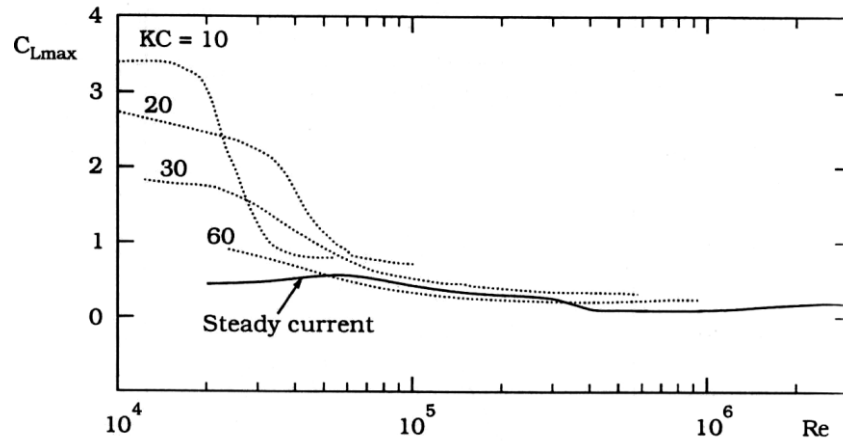


Şekil.4.4.a-b.  $KC$  sabit hal için  $C_D, C_M$  ile  $k/D-Re$  ilişkisi dalga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line) katsayıları, (boru serbest deniz tabanına oturmakta, pürüzsüz yüzeyli silindirik boru) (Sümer, Fredsoe, 1997) (Sarpkaya, Isaacson, 1981)

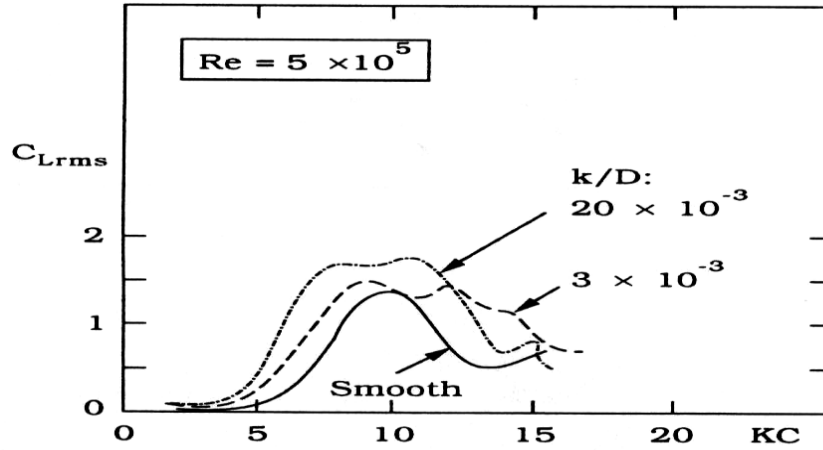


Şekil.4.5.a-b.  $Re$  sabit alınarak  $C_D, C_M$  ile  $e/D-KC$  ilişkisi dalga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line), (boru askıda serbest, pürüzsüz yüzeyli silindirik boru)(Sümer, Fredsoe,1997)

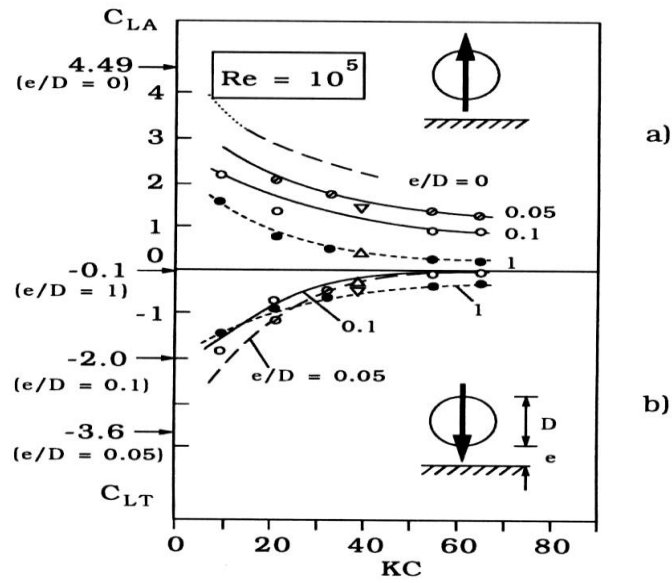
Deniz tabanına serbestçe döşenmiş, pürüzsüz boru üzerinde dalga kökenli akış yönüne dik (cross flow, transverse) kuvvetin neden olduğu hidrodinamik kaldırma kuvvet katsayısı  $C_L$ ;  $Re$  sayısına ve  $KC$  değerlerine bağlı olarak Şekil.4.6' da, pürüzlülük etkisini ifade etmesi bakımından  $k/D$  ve  $KC$  değerlerine bağlı olarak Şekil.4.7'de ve taban-boru arası açıklığı göstermesi bakımından  $e/D$  ve  $KC$  değerlerine bağlı olarak da Şekil.4.8'de sunulmaktadır.



Şekil.4.6.  $C_{Lmax}-KC-Re$  ilişkisi (dalga kökenli akış yönüne dik kuvvet (Cross flow, transverse) katsayıları, (boru serbest deniz tabanına oturmakta, pürüzsüz yüzeyli silindirik boru)(Sarpkaya, Isaacson,1981)

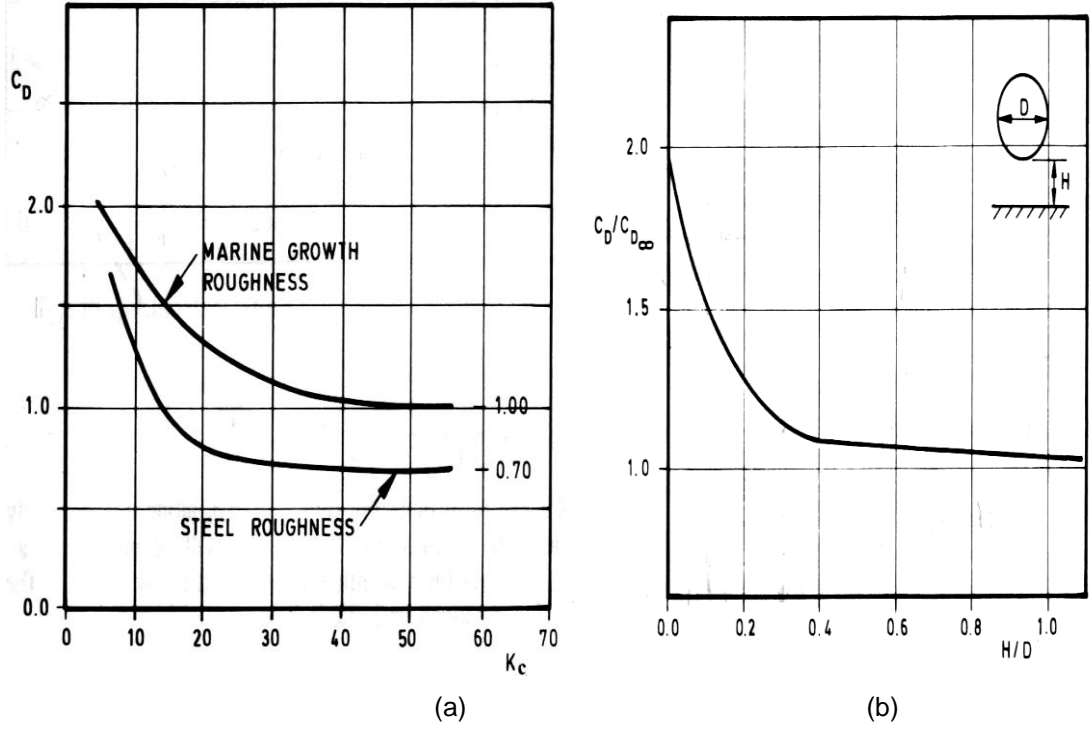


Şekil.4.7.  $C_{Lrms}$ - $k/D$ - $KC$  ile sabit  $Re$  ilişkisi dalga kökenli akış yönüne dik kuvvet (Cross flow, transverse) katsayıları, (boru serbest deniz tabanına oturmakta, pürüzsüz yüzeyli silindirik boru)(Sümer, Fredsoe,1997)

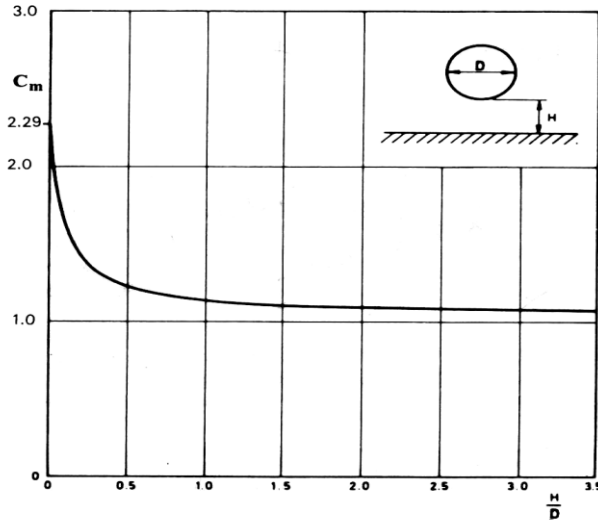


Şekil.4.8.  $C_{LA}$ - $e/D$ - $Re$  ile sabit  $KC$  ilişkisi dalga kökenli akış yönüne dik kuvvet (Cross flow, transverse) katsayıları, boru askıda serbest, pürüzsüz yüzeyli silindirik boru)(Sümer, Fredsoe,1997)

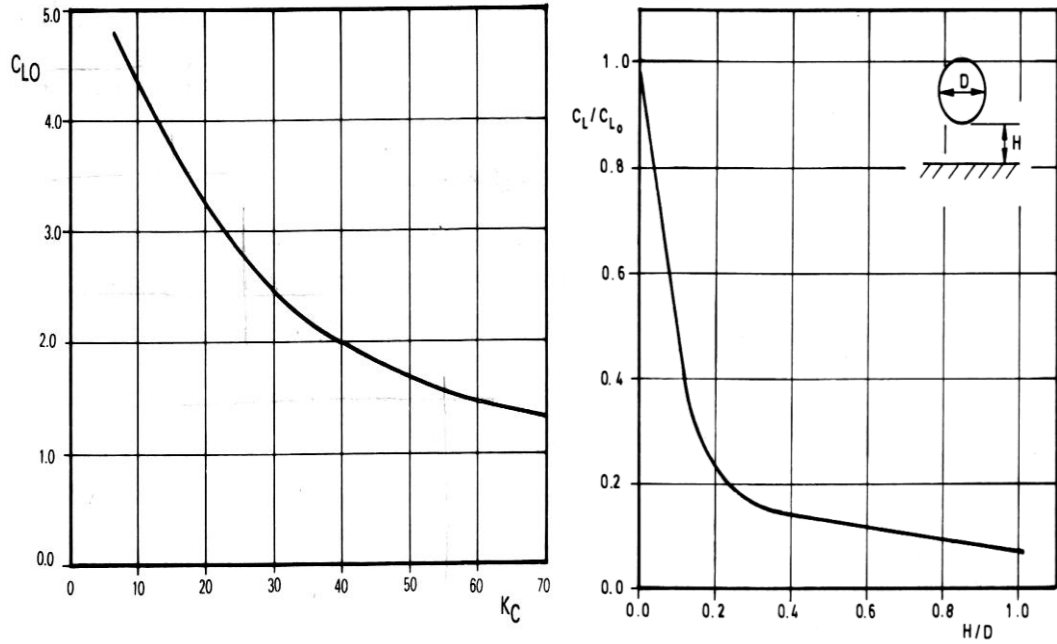
İkinci alternatifte; DnV standartlarına göre düzenli dalgalı bir ortamda deniz tabanına serbestçe döşenmiş, pürüzlü/pürüzsüz borular üzerindeki akış yönündeki (in-line)  $C_D$ ,  $C_M$  katsayıları ve akış yönüne dik (cross flow, transverse) yöndeki  $C_L$  katsayısı belirlenmektedir. Taban-boru arası açıklığın ek grafiklerle desteklenmesi ve düzeltme katsayıları ile  $C_D$  ve  $C_L$  katsayılarının iyileştirilmesi yapılmaktadır.



Şekil.4.9.a-b  $C_D-KC$  ve  $C_{D0}-H/D$  ilişkisi dalga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line) katsayıları,(boru serbest deniz tabanına oturmakta, pürüzsüz/pürüzlü silindirik boru)



Şekil.4.10.  $C_M-KC$  ilişkisi dalga kökenli akış yönündeki kuvvet (in-line) katsayıları, (boru askıda serbest salınımlı-uçları mesnetlenmiş veya deniz tabanına oturmakta, pürüzsüz/pürüzlü yüzeyli silindirik boru) (mesnetlenmemiş durumdaki borularda  $C_M=1.0$ )



Şekil.4.11.a-b  $C_{L0}$ - $K_C$  ve  $C_L$ - $H/D$  ilişkisi dalga kökenli akış yönüne dik kuvvet (cross flow, transverse), boru serbest deniz tabanına oturmakta, pürüzsüz/pürüzlü yüzeyli silindirik boru) (kararlı akım halinde  $C_L=1.0$ )

#### 4.1.4. Morison Denklemleri

Morison denklemleri, farklı koşullar altında farklı formlarda ifade edilmektedir. Durgun suda ve akıntı ortamında salınım yapan esnek bir silindir, dalga ve/veya akıntı ortamında sabit bir silindir, dalga ve/veya akıntı ortamında salınım yapan esnek bir silindir ve eğik silindir üzerindeki sürüklenme ve atalet kuvvetlerinin birleşiminden oluşan Morison denklemleri geliştirilmiştir.(Chakrabarti,1987)

Dalga kuvvetlerini içerecek biçimde iki terimli Morison denklemleri, dalga ortamındaki rijit bir boru için;

$$F = C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{u} + C_D \frac{1}{2} \rho D |u| u \quad (4.42)$$

yazmak mümkündür. (Chakrabarti,1987) Dalganın hareketi ile birlikte salınım yapan borunun da hareketi söz konusu olduğunda iki terimli Morison denklemleri yeniden düzenlenecektir. Bu



bağlamda rölatif hız ve ivme terimleri kullanılacaktır. Modifiye edilmiş Morison denklemleri, dalga ortamında salınım yapan esnek bir borunun birim boyu için (Sümer, Fredsoe, 1997) (Zienkiewicz, Lewis, Stagg, 1978);

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D |u - \dot{x}| (u - \dot{x}) + \frac{\pi}{4} \rho C'_M D^2 \dot{u} + \frac{\pi}{4} \rho C''_M D^2 (\dot{u} - \ddot{x}) \quad (4.43)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D D |u - \dot{x}| (u - \dot{x}) + \frac{\pi}{4} \rho C_M D^2 \dot{u} - m' \ddot{x} \quad (4.44)$$

$$m' = \frac{\pi}{4} \rho C''_M D^2 \quad (4.45)$$

$$C_M = C'_M + C''_M \quad (4.46)$$

formunda ifade edilebilir.

Burada;

$C'_M$  : Froude-Krylov kuvvet katsayısı, (genellikle dairesel silindirler için 1.0 alınır),

$C''_M$  : Atalet kuvvet katsayısını,

$u, \dot{u}$  : Su partikülünün akış yönünde hızı ve ivmesini,

$\dot{x}, \ddot{x}$  : Silindirin akış yönündeki hız ve ivmesini

$m'$  : Eklenik kütle

göstermektedir

#### 4.1.5. Hidrodinamik Kaldırma Kuvveti

Bir dalga ortamında boru etrafındaki akış incelendiğinde  $KC$  sayısı 3 iken vorteks oluştuğu 5 değerinden fazla olması durumunda da vorteks ötelemesinin meydana geldiği gözlenmiştir. (Chakrabarti, 1987) Boru etrafındaki asimetriklikten kaynaklanan basınç alanlarındaki değişim etkisiyle akışa dik (transverse) yönde kuvvet meydana gelmiştir. Bu akışın yatay olması halinde akış diki olan düşey doğrultuda hidrodinamik kaldırma kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvet rijit bir borunun birim boyu için;

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L D u^2 \quad (4.47)$$

bağıntısı (Chakrabarti,1987) ile birim boydaki esnek boru için dalga altında oluşan hidrodinamik kaldırma kuvveti;

$$F_L = \frac{1}{2} \rho D C_L (w - \dot{x}) \quad (4.48)$$

ile ifade edilmektedir (Chakrabarti,1987).

Burada

$\dot{x}$  : Borunun düşey yöndeki yaptığı hareketin hızını

$(w - \dot{x})$  : Rölatif hızını

$C_L$  : Boyutsuz hidrodinamik kaldırma katsayısını

göstermektedir.

#### 4.2. Derinlik Sınıflamalarına Göre Dalga Hareketi

Bu ifadelerden yararlanarak derin ve sığ sular için bazı sınırlar elde edilebilir.

	Kriter	Dalga Boyu
Derin Su	$\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi}$
Sığ Su	$\frac{d}{L} < \frac{1}{20}$	$L = T\sqrt{g \cdot d}$

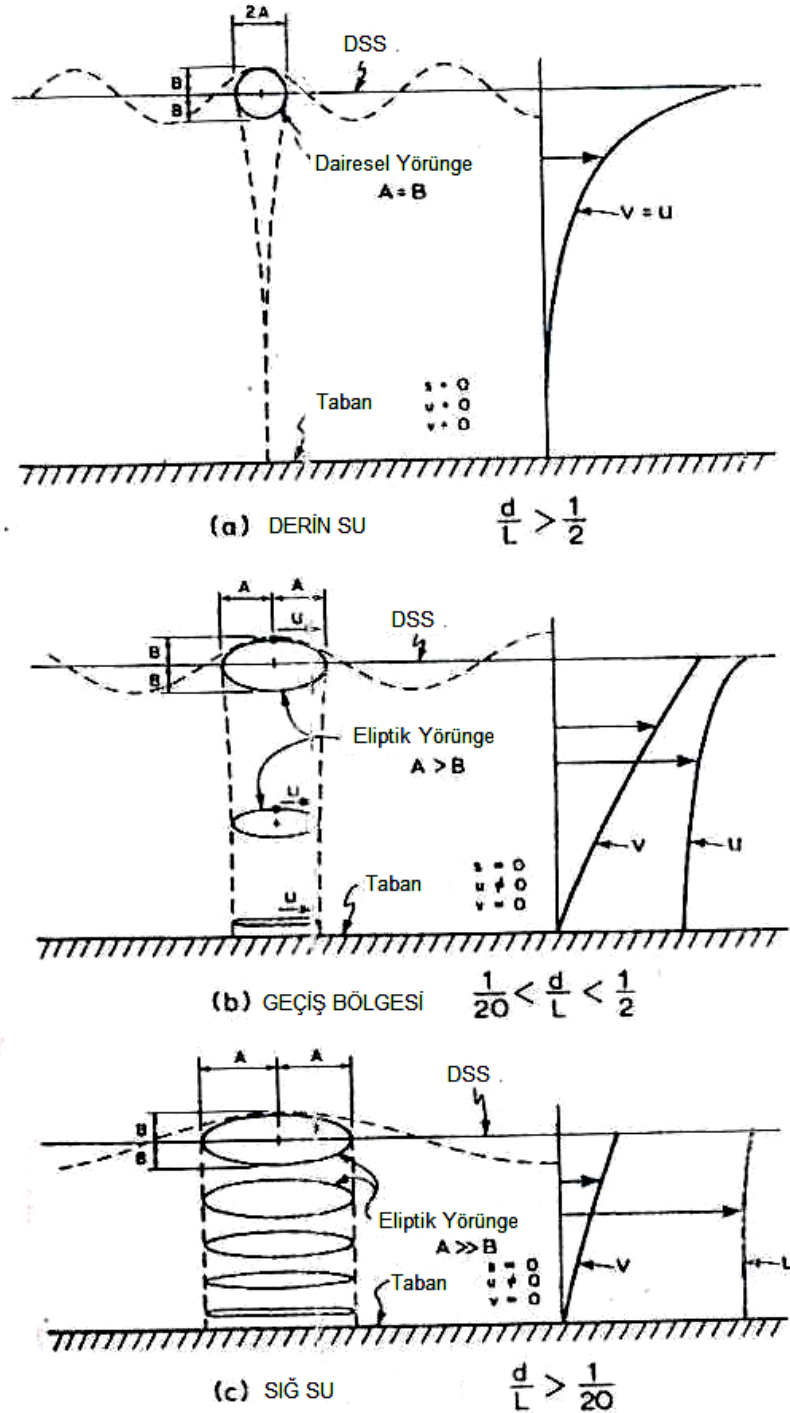
Diğer ifadeler de benzer yaklaşımla sadeleştirilebilir.(Çizelge 4.1)

$$\text{Derin Su:} \quad \frac{\cosh ks}{\sinh kd} = \frac{\sinh ks}{\sinh kd} = e^{ky} \quad (4.49)$$

$$\text{Sığ Su:} \quad \frac{\cosh ks}{\sinh kd} = \frac{1}{kd} \quad (4.50)$$

$$\frac{\sinh ks}{\sinh kd} = 1 + \frac{y}{d} \quad (4.51)$$

Akışkan parçacığı yörüngeleri ve hız profilleri; sıg, orta ve derin sular için Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Sığ suda  $u \approx \text{sabit}$  ( $v$  lineerken) olduğu unutulmamalıdır. Derin sularda ise parçacık yörüngeleri daireseldir ve  $u \approx v$  ifadesi yazılabilir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Lineer Teoriye Göre Partikül Yörünge ve Kinematikleri.

DERİNLİK	SIĞ SU $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$	GEÇİŞ BÖLGESİ $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	DERİN SU $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
1. Dalga Profili	Aynısı $\rightarrow$	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[ \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \theta$	Aynısı $\leftarrow$
2. Dalga Yayılma Hızı	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi d}{L} \right)$	$C = C_0 = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
3. Dalga Uzunluğu	$L = T \sqrt{gd} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi d}{L} \right)$	$L = L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = C_0 T$
4. Grup Hızı	$C_g = C = \sqrt{gd}$	$C_g = nC = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)} \right] \cdot C$	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$
5. Su Partiküllerinin Hızı			
(a) Yatay	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \theta$	$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
(b) Düşey	$w = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin \theta$	$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
6. Su Partiküllerinin İvmesi			
(a) Yatay	$a_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$a_x = 2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
(b) Düşey	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos \theta$	$a_z = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$a_z = -2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
7. Su Partiküllerinin Yer Değiştirmesi			
(a) Yatay	$\xi = -\frac{HT}{4\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \sin \theta$	$\xi = -\frac{H}{2} e^{\frac{2\pi z}{L}} \sin \theta$
(b) Düşey	$\zeta = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\sinh(2\pi d/L)} \cos \theta$	$\zeta = \frac{H}{2} e^{\frac{2\pi z}{L}} \cos \theta$
8. Basınç	$p = \rho g (\eta - z)$	$p = \rho g \eta \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} - \rho g z$	$p = \rho g \eta e^{\frac{2\pi z}{L}} - \rho g z$

Çizelge 4.1. Özetle Lineer Dalga Teorisi Dalga Karakteristikleri.

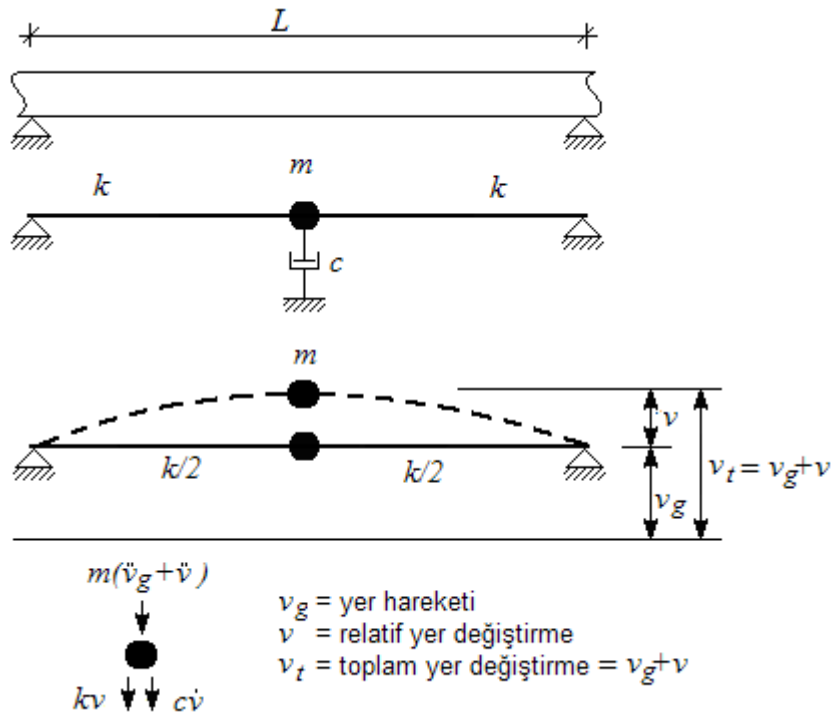
### 4.3. Deprem Kuvveti

#### 4.3.1. Yapıların Yer Hareketi Etkisindeki Titreşimi

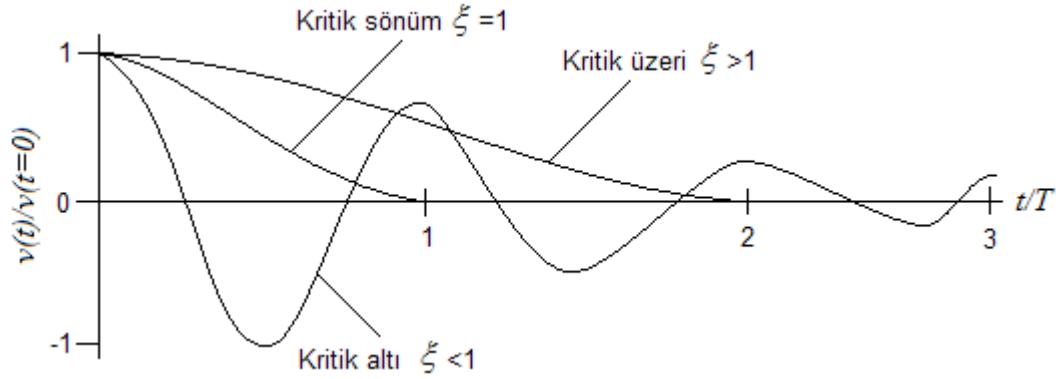
Deprem kuvveti büyük ölçüde deprem ivmesine ve yapı ağırlığıyla ilişkilidir. Deprem kuvveti olarak da yer kabuğu hareketine dayalı salınım dikkate alınmaktadır. Deprem oluşum merkezinden olan uzaklık bu tip yapıların tasarımında önem arz eder. Yakında olması durumunda yalnızca yer kabuğu hareketinden doğan deprem kuvvetleri alınmakta, uzakta olması durumunda yer kabuğunun hareketine ilaveten Tsunami etkileri de dâhil edilmektedir.

#### 4.3.2. Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde Deprem Etkisi

Bir sistemin hareket halinde bulunduğu konum, tek bir parametrenin verilmesi ile belirlenebiliyorsa bu tür sistemler tek serbestlik dereceli olarak isimlendirilir (Şekil 4.13). Çok serbestlik dereceli sistemin davranışı da belirli ölçülerde tek serbestlik dereceli sistemlere benzediği için, tek serbestlik dereceli sistemlerin pek çok uygulaması mevcuttur. Böyle bir sistemin dinamik davranışın belirlenmesi için sistemin hareket denkleminin yazılmasına ihtiyaç vardır. Hareket denklemi sisteme etkiyen kuvvetlere, atalet kuvvetinin de eklenmesiyle, kuvvet dengesi olarak da görülebilir (Celep, Kumbasar, 2004 ).



Şekil 4.13 Tek Serbestlik Dereceli Sistem.



Şekil 4.14 Kritik Altı Sönümlü, Kritik Sönümlü ve Kritik Üstü Sönümlü Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Serbest Titreşimi.

Yer hareketi etkisinde tek serbestlik dereceli sistemin dinamik davranışı,

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = -m\ddot{v}_g \quad (4.52)$$

veya

$$\ddot{v} + 2\xi\dot{v} + \omega^2v = -\ddot{v}_g \quad (4.53)$$

denklemleri ile belirlenir. Yere göre yer değiştirme (relatif yerdeğiştirme)  $v(t)$  ve yer hareketi  $v_g(t)$  ile gösterilmiştir. Burada sönümsüz serbest titreşim frekansı  $\omega$  ve sönüm oranı  $\xi$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad c_{cr} = 2m\omega \quad \xi = c / (2m\omega) = c / c_{cr} \quad (4.54)$$

Burada  $c$  sönümü, titreşimin durumunda yok edilen enerjinin bir ölçüsüdür. Buna karşılık  $\xi$  sönüm oranı ise, boyutsuz bir büyüklük olup, sistemin kütlesi ve rijitliğine bağlıdır. Şekil 4.14 de bir  $v(t=0)$  başlangıç yer değiştirmesi ile başlayan hareketin  $v(t)$  yerdeğiştirmesini göstermektedir. Bir sistemin  $v_0 = v(t=0)$  başlangıç yerdeğiştirmesi ve  $\dot{v}_0 = \dot{v}(t=0)$

başlangıç hızı ile harekete başladığı ve yer hareketi olmadığı kabul edilirse,  $\omega_D$  sönümlü sistemin serbest titreşim frekansı olmak üzere, serbest titreşim hareketinin yerdeğiştirmesi  $v(t)$

$$v(t) = e^{-\xi\omega t} \left[ v_0 \cos \omega_D t + \frac{\dot{v}_0 + \xi\omega v_0}{\omega_D} \sin \omega_D t \right] \quad (4.55)$$

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.56)$$

olarak ortaya çıkar. Sistemin sönümsüz ve sönümlü serbest titreşim periyotları ise

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad T_D = \frac{2\pi}{\omega_D} = \frac{T}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (4.57)$$

olup, küçük sönüm oranları için birbirine yakındır. Yer değiştirmenin bir  $t$  zamanı ile  $t + T_D$  zamanındaki oranı zamandan bağımsız olarak ifade edilir:

$$\frac{v(t)}{v(t + T_D)} = \exp(\xi\omega T_D) = \exp\left[ \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right] \quad (4.58)$$

Bu oranın logaritması, *Logaritmik Azalım* olarak isimlendirilir ve küçük sönüm oranları için  $\sqrt{1 - \xi^2} \approx 1$  kabul edileceği göz önüne alınarak aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$\delta = \ln \frac{v(t)}{v(t + T_D)} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \approx 2\pi\xi \quad (4.59)$$

Bu sonuç bir titreşim periyodu yerine  $m$  titreşim periyoduna kolayca genelleştirilebilir.

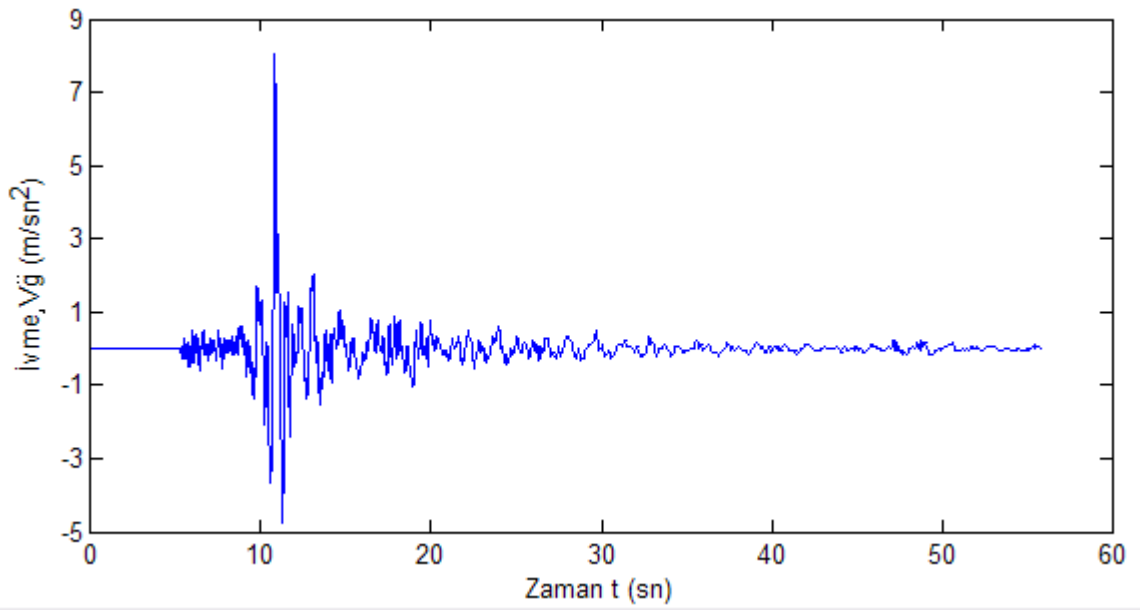
$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{v(t)}{v(t + mT_D)} \approx 2\pi\xi \quad (4.60)$$

yazılabilir.

Yer hareketi etkisi altında ve başlangıçta sükûnette olan bir sistem için hareket denkleminin çözümü ise, *Duhamel İntegrali* olarak bilinir. (Celep, Kumbasar,2004 )

$$v(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{v}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (4.61)$$

1999 Düzce depreminin Doğu—Batı yönündeki ivme kayıtları Şekil 4.17’ de gösterilmiştir. Burada maksimum ivmenin 8,06 m/sn<sup>2</sup> civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15 1999 Düzce Depremi Doğu- Batı İvme Kayıtları

Yapıların analizinde genellikle bu tür ivme kayıtlarına göre çözüm yapılacağı gibi mevcut ivme kayıtlarından daha büyük değerlerde kendi belirleyeceğimin bir ivme grafiğinden de yararlanılabilir.



## 5.0. DİNAMİK ANALİZ ESASLARI

Bir yapının yer hareketi altında incelenmesi sırasındaki ilk adım, basit bir modelle temsil edilmesidir. Bir yapının titreşim durumundaki konumunun belirlenmesi için gerekli olan parametre sayısı serbestlik derecesi olarak isimlendirilir. Her ne kadar yapılar sürekli sistemlerse de günümüzde yaygın olan bilgisayar çözümü için sistem ayrıklaştırılır ve çok serbestlik dereceli sistem olarak adlandırılır. Bu ayrıklaştırmada genellikle kütle belirli bir konumda toplu olarak göz önüne alınır. Çok serbestlik dereceli sistemlerin incelenmesinde de tek serbestlik dereceli sistemlerin ana kavramları kullanıldığı için tek serbestlik dereceli sistemlerin ayrıntılı incelenmesi faydalıdır. Bunun yanında çok serbestlik dereceli sistemlerin çoğu basit yaklaşımla, tek serbestlik dereceli kabul edilerek uygun yaklaşıklıkla sonuçlar elde edilebilir (Celep, Kumbasar, 2004).

### 5.1. Genelleştirilmiş Tek serbestlik Dereceli Sistem

Amaç; deniz deşarj hattının dinamik dış yükler altında konum ve zamana bağlı deplasmanını  $v(x,t)$  elde etmektir. Deplasman fonksiyonu konum ve zamana bağlı terimlerle ayrıştırılırsa (Clough and Penzien,1993);

$$v(x,t) = \psi(x)Z(t) \quad (5.1)$$

bağıntısıyla izah edilir.

Burada

$\psi(x)$  : Konumla ifade edilen şekil (shape) fonksiyonunu,

$Z(t)$  : Zamanla ifade edilen titreşim fonksiyonunu,

göstermektedir.

Genelleştirilmiş Tek Serbestlik Dereceli Sistemin hareket denklemi (Clough and Penzien,1993);

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + \bar{k}^* Z(t) = F_{Top}^*(t) \quad (5.2)$$

ifade edilmektedir.  $Z(t)$ ,  $\dot{Z}(t)$  ve  $\ddot{Z}(t)$  sırasıyla zamana bağlı olarak titreşimin deplasman, deplasman hız ve deplasman ivme değerleridir.

Burada,

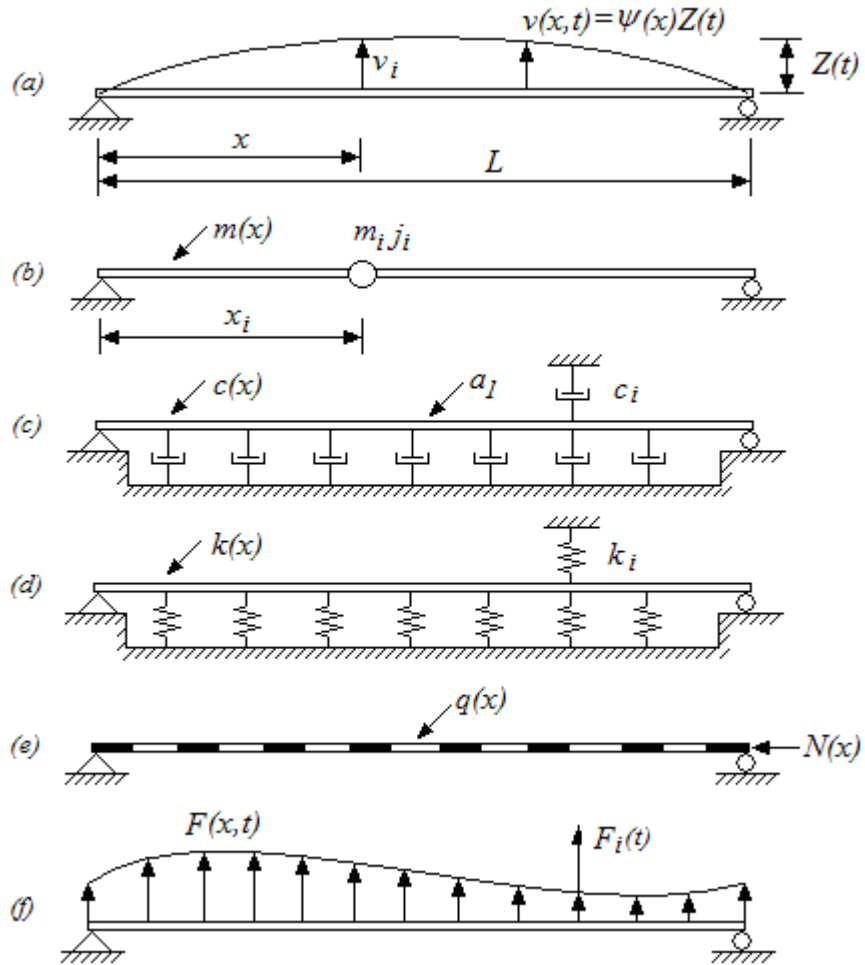
$m^*$  : Genelleştirilmiş kütle (t),

$c^*$  : Genelleştirilmiş sönümü (kN.sn/m),

$\bar{k}^*$  : Genelleştirilmiş rijitliği (kN/m),

$F_{Top}(t)$  : Dinamik dış yükü (kN),

göstermektedir.



Şekil 5.1. Genelleştirilmiş Tek Serbestlik Dereceli Sistem (TSDS)

Dinamik dış yük teriminin varlığıyla salınım yapan hareket denkleminde genelleştirilmiş kütle ( $m^*$ ), genelleştirilmiş sönüm ( $c^*$ ) ve genelleştirilmiş rijitlik ( $\bar{k}^*$ ) terimleri; (Clough and Penzien,1993) (Celep,1996)

$$m^* = \int_0^L m(x)\psi(x)^2 dx + \sum m_i \psi_i^2 + \sum j_i \psi_i'^2 \quad (5.3)$$

$$c^* = \int_0^L c(x)\psi(x)^2 dx + a_c \int_0^L E_b I(x)\psi''(x)^2 dx + \sum c_i \psi_i^2 \quad (5.4)$$

$$k^* = \int_0^L k_y(x)\psi(x)^2 dx + \int_0^L E_b I(x)\psi''(x)^2 dx + \sum k_{y,i} \psi_i^2 \quad (5.5)$$

$$k_G^* = \int_0^L N(x)\psi'(x)^2 dx \quad (5.6)$$

$$\bar{k}^* = k^* - k_G^* \quad (5.7)$$

formunda tanımlanmaktadır.

Burada,

$m(x)$  : Değişken kütle (t),

$I(x)$  : Değişken atalet momentini ( $m^4$ ),

$k_y(x)$  : Değişken yay katsayısını (kN/m),

$E_b$  : Boru malzemesinin elastisite modülünü ( $kN/m^2$ ),

$N(x)$  : Eksenel kuvveti (kN),

$a_c$  : Sönüm katsayısını,

$k^*$  : Genelleştirilmiş elastik rijitliği (kN/m),

$k_G^*$  : Genelleştirilmiş geometrik rijitliği (kN/m),

göstermektedir.

Deniz ortamındaki deşarj sistemine etkiyen yanal dış yükler dalga, akıntı ve deprem kuvvetleridir. Genelleştirilmiş deprem, dalga ve akıntı yükü (Clough and Penzien,1993) (Celep,1996);

$$F_{Dal}^*(t) = \int_0^L (F_I(x,t) + F_D(x,t))\psi(x)dx \quad (5.8)$$

$$F_{Dep}^*(t) = \ddot{v}_g(t) \int_0^L m(x) \psi(x) dx \quad (5.9)$$

$$F_{Ak}^* = \int_0^L F_{Ak}(x) \psi(x) dx \quad (5.10)$$

eşitlikleriyle ifade edilebilir. Bu yanal yüklerin toplamı ise sisteme etkiyen toplam yanal dış yük olacaktır.

$$F_{Top}^*(t) = F_{Dep}^*(t) + F_{Dal}^*(t) + F_{Ak}^* \quad (5.11)$$

Genelleştirilmiş TSD sistemine göre zorunlu titreşim hareketine sebep olan dinamik yük  $F_{Top}^*(t)$  olarak tanımlanmaktadır.

Sistemin Genel Hareket Denklemi,

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + \bar{k}^* Z(t) = F_{Top}^*(t) \quad (5.12)$$

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + k^* Z(t) - k_G^* Z(t) = F_{Top}^*(t) \quad (5.13)$$

Rayleigh metodu ile sistemin doğal frekansı, hesaplanabilmektedir. Böylece sistemin zorlama frekansı ile karşılaştırılması yapıp rezonans durumu incelenebilmektedir.

Değişken rijitliğe sahip sistemin potansiyel enerjisi aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$E_P = \frac{1}{2} \int_0^L E_b I(x) \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (5.14)$$

Maksimum potansiyel enerji ise,

$$E_{P,max} = \frac{1}{2} Z_0^2 \int_0^L E_b I(x) [\psi''(x)]^2 dx \quad (5.15)$$

Değişken kütleli sistemin kinetik enerjisi,

$$E_K = \frac{1}{2} \int_0^L m(x) \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 dx \quad (5.16)$$

Maksimum kinetik enerji ise,

$$E_{K,\max} = \frac{1}{2} Z_0^2 \omega^2 \int_0^L m(x) [\psi(x)]^2 dx \quad (5.17)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

Burada,

$E_K$  : Kinetik enerjisi (kN.m),

$E_P$  : Potansiyel enerjisi (kN.m),

$Z_0$  : Deplasman genliğini (m),

$\omega$  : frekansı (1/sn),

göstermektedir.

Bir sistemde potansiyel enerji, kinetik enerjiye eşittir. O halde bu iki denklem birbirine eşitlenip frekans yalnız bırakılırsa sistemin frekansı hesaplanabilir. Frekansı veren bağıntı,

$$\omega^2 = \frac{\int_0^L E_b I(x) [\psi''(x)]^2 dx}{\int_0^L m(x) [\psi(x)]^2 dx} \quad (5.18)$$

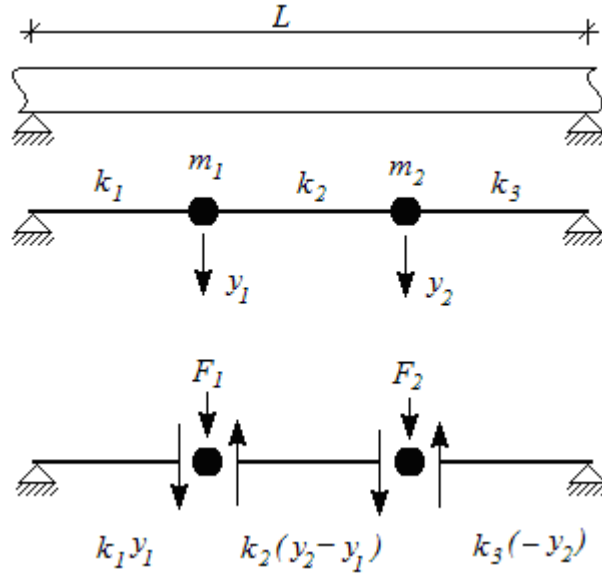
şeklinde ifade edilebilir (Clough and Penzien, 1993).

## 5.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistem

Statik ve dinamik analiz hesapları ve projelerin hayata geçirilmesi için hazırlanmış taşıyıcı sistemlerin çok değişik şekilde olmaları, genelde bu sistemlerin Dinamik Analiz hesabı yapılırken her zaman tek serbestlik dereceli olarak incelenmesi veya idealize edilmeleri sağlıklı olmaz ve mümkün değildir (Leylek, 2005), (Celep, Kumbasar, 1996).

Çok serbest dereceli olması ile ifade edilmek istenen husus ise, ya sistemin seçilişi ve kuruluşu icabı bir veya birden çok kütleli olması veya sistemin eksenleri doğrultusunda titreşimleri yanında birde Dönme veya Burulma titreşimleri aynı zamanda yapılabilmesi olanağının mümkün olmasıdır.

Çok serbestlik dereceli sistemin çözüm mantığının anlaşılabilmesi için Şekil 5.2. deki kiriş örneğini ele alalım.



Şekil 5.2. Çok serbestlik dereceli sistemin matematik modeli

Dinamik denge denklemlerinin yazılışı, D'Alembert Prensibi icabı ve her kütle için şu şekilde yazılır. Bu denklemlerin özelliği sadece bir önceki ve bir sonraki kesit tesirlerinin etkilerinin mevcut olmasıdır.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + k_1 y_1 - k_2 (y_2 - y_1) &= 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_2 (y_2 - y_1) - k_3 (-y_2) &= 0 \end{aligned} \quad (5.19)$$

Burada,

- $m$  : Kütle (t),
- $k$  : Rijitliği (kN/m),
- $y$  : Deplasmanı (m),
- $F$  : Kuvveti (kN),

göstermektedir.

Yukarıdaki ifadeler diferansiyel denklem türündendir. Bilinmeyen ve titreşimlere ait  $y_1$  ve  $y_2$  davranış spektrumlarının harmonik şekilde değiştiği kabulü ile (Celep, Kumbasar, 1996),

$$y_1 = \bar{u}_1 \sin(\omega t) \quad \text{ve} \quad y_2 = \bar{u}_2 \sin(\omega t) \quad (5.20)$$

Burada,

$\bar{u}$  : Titreşim genliğini,(m)

$\omega$  : Frekansı,(1/sn)

$t$  : Zamanı,(sn)

göstermektedir.

Aranan  $y_1$  ve  $y_2$  fonksiyonlarının spektrum değerleri yukarıdaki gibi değiştikleri önceden kabul edilir. İkinci adım olarak ise;  $u$  titreşim genlikleri bulunur.

$y_1$  ve  $y_2$  fonksiyonlarının türev değerleri bulunup eşitlikte yerine yazılır ve gerekli kısaltmalar yapılırsa;

$$\begin{aligned} -m_1\omega^2\bar{u}_1 \sin(\omega t) + k_1\bar{u}_1 \sin(\omega t) - k_2\bar{u}_2 \sin(\omega t) + k_2\bar{u}_1 \sin(\omega t) &= 0 \\ -m_2\omega^2\bar{u}_2 \sin(\omega t) + k_2\bar{u}_2 \sin(\omega t) - k_2\bar{u}_1 \sin(\omega t) + k_3\bar{u}_2 \sin(\omega t) &= 0 \end{aligned} \quad (5.21)$$

ifadeleri elde edilir. Hesap işlemlerinin kolaylığı bakımından yukarıdaki eşitliklerdeki sinüs değerleri kısaltıldıktan sonra MATRİS yazılışı şekline dönüştürülür.

$$\begin{aligned} -m_1\omega^2\bar{u}_1 + k_1\bar{u}_1 - k_2\bar{u}_2 + k_2\bar{u}_1 &= 0 \\ -m_2\omega^2\bar{u}_2 + k_2\bar{u}_2 - k_2\bar{u}_1 + k_3\bar{u}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.22)$$

Yukarıdaki kısaltılmış ifadelerin matris biçimi,

$$\begin{bmatrix} -m_1\omega^2 + k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & -m_2\omega^2 + k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

şeklinde tanımlanabilmektedir. Yukarıdaki ifade düzenlenirse eşitlik,

$$\left( \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

halini alır. Bu matris formunun genel halde yazılışı ise,

$$([K] - \omega^2 [M]) \vec{\bar{u}}_i = 0 \quad (5.25)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Burada,

$K$  : Rijitlik matrisini

$M$  : Kütle matrisini

göstermektedir.

Çok serbestlik dereceli sistemlerde sürekli bir sistemi modellerken serbestlik derecesini ne kadar çok artırırsak sonuçlar o kadar gerçeğe yakın olacaktır. Ancak bu durumda kütle ve rijitlik matrislerinin boyutları büyüyeceği için işlem yapmak zorlaşacaktır. Çözüm metodu seçimi yapılırken bu husus dikkate alınmalıdır.



## 6.0. UYGULAMA

Tez kapsamında verilen teorik bilgilerin daha iyi pekiştirilmesi için bu kısımda biri deniz tabanına serbest oturan tedrici değişen kesitli ve diğeri de zemine gömülü kademeli değişken kesitli olmak üzere iki adet uygulama çözülecektir. Çözüm sırası olarak ilk önce difüzörlerin hidrolik hesapları yapılarak boyutlandırma yapılacaktır. İkinci adım olarak boyutları belirlenen difüzörlerin buldukları ortamlar için stabilite analizleri yapılarak stabil olmaları temin edilecektir. Üçüncü ve son adımda ise mesnetleri belirlenen difüzör borusunun en büyük açıklığı için statik ve dinamik analiz yapılacak ayrıca aynı sistem yapısal analiz programı olan SAP2000 ile çözüldükten sonra sonuçlar grafik ve çizelgelerle karşılaştırılacaktır.

Uygulama verileri;

Çizelge 6.1. Difüzör Kesit ve Özellikleri.

$\rho_0$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_0$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho_b$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> )	$s$ (m)	$j$	$Q$ (lt/sn)	$D_{baş}$ (m)	$D_{uç}$ (m)
0,999	9,80	7,986	78,34	0.01	0.001	750	1.0	0.4

Çizelge 6.2. Dalga Parametreleri.

$H$ (m)	$T$ (sn)	$\rho_a$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_a$ (kN/m <sup>3</sup> )	$d$ (m)
2,5	8	1,029	10,09	25

Çizelge 6.3. Zemin Parametreleri.

$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$z$ (m)	$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$B$	$k_y$ (kN/m <sup>3</sup> )	$C$ (kN/m <sup>2</sup> )
20	1,5	30°	37,16	22,46	19,13	0,30	5000	20

## 6.1. Tedrici Değişken Kesitli Tabana Serbest Oturan Difüzör Tasarımı

### 6.1.1. Difüzörün Hidrolik Hesabı

$$Q=750 \text{ lt/sn}, d=0.10 \text{ m}, a_1=0,00785 \text{ m}^2 \text{ (sabit)}$$

$$q_1=0.750 / 21=0,0357 \text{ m}^3/\text{sn}$$

1. Deliğın Hesabı,

(Çan ağızlı delik)

$$\frac{V_1^2}{2gE_1} \sim 0.015 \text{ kabulü ile } C_o = 0,969 \text{ alınabilir.}$$

Başlangıç için böyle bir kabul yapmak zorunluluğu vardır.

$$q_1 = C_o a_1 \sqrt{2gE_1} \Rightarrow E_1 = \left( \frac{0,0357}{0,969 \cdot 0,00785 \sqrt{19,62}} \right)^2 = 1,12 \text{ m bulunur.}$$

Hız ise,

$$V = \frac{q_1}{A} = \frac{0,0357}{\pi(0,38)^2 / 4} = 0,3149 \text{ m/sn} > 0.06 \text{ m/sn (uçtaki minimum hız şartı)}$$

Buradan

$$\frac{V_1^2}{2gE_1} = \frac{(0,3149)^2}{19,62 \cdot 1,1218} = 0,0045 < 0.015 \text{ yapılan kabul uygundur.}$$

İkinci deliğın hesabına geçilebilir.

## 2. Deliğın Hesabı,

Difüzör tedrici değişen kesitli olduğu için ikinci delik noktasında difüzörün çapı değişecektir. Değişen bu çap değeri dikkate alınarak hesaplar yapılmaktadır. Buna göre,

boru içi akışkanın bir adım önceki hızı,

$$V = \frac{q_1}{A} = \frac{0,0357}{\pi(0,38)^2 / 4} = 0,3149 \text{ m/sn}$$

Pürüzlülük katsayısı ise,

$$F = \frac{n^2 D 2g}{R^{4/3}} = \frac{0,012^2 \cdot 0,44 \cdot 2 \cdot 9,81}{(0,44/4)^{4/3}} = 0,0236$$

olarak bulunur. Buradan borunun  $L$  boyunca meydana gelen sürekli yük kaybı ise,

$$h_f = \frac{F V^2}{D 2g} L = \frac{0,0236 (0,3149)^2}{0,44 \cdot 19,62} 5 = 0,00135 \text{ m olarak bulunur.}$$

İkinci adımın enerji seviyesi ise,

$$E_2 = E_1 + h_f + \Delta z_1 \frac{\Delta \rho}{\rho} = 1,12 + 0,00135 + 0,0015 \cdot \frac{30}{999} = 1,1215 \text{ m bulunur.}$$

$$\text{Debi dağıtım katsayısı } C_o = 0,975 \left( 1 - \frac{V_1^2}{2gE_2} \right)^{3/8} = 0,9733 \text{ olarak bulunur.}$$

İkinci delikten çıkan debi ise,

$$q_2 = C_o a_2 \sqrt{2gE_2} = 0,9733 \cdot 0,00785 \sqrt{19,62 \cdot 1,1215} = 0,0358 \text{ m}^3/\text{sn olarak bulunur.}$$

İkinci adımdaki hız ise,

$$V_2 = \frac{\sum q_i}{A_i} = \frac{q_1 + q_2}{A_2} = \frac{0.0357 + 0.0358}{\pi \cdot (0.44)^2 / 4} = 0.4770 \text{ m/sn olarak bulunur.}$$

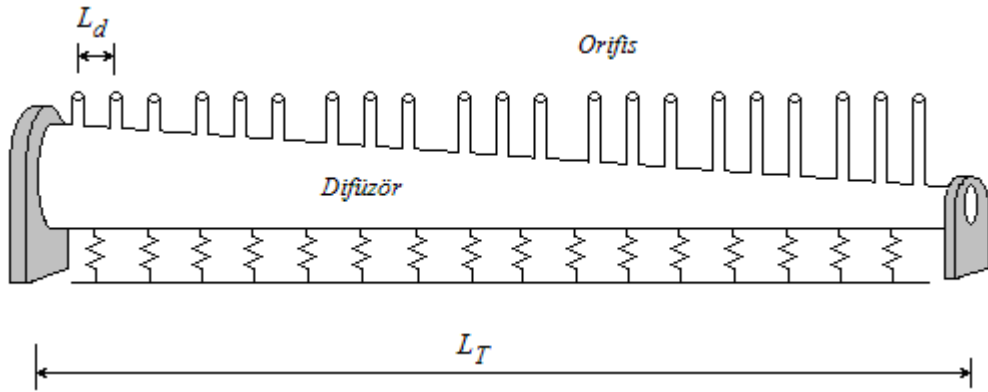
Diğer deliklerin hesabı bilgisayar destekli çözülmüştür. Bilgisayar sonuçları aşağıda verilen çizelge de gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Tedrici Değişken Kesitli Difüzör Hidrolik Hesabı

Delik No	Boru Çapı (D) (m)	Kesit Alanı (A) (m <sup>2</sup> )	Delik Çapı (d) (m)	Enerji (m)	Hız (V) (m/sn)	Debi (qi) (m <sup>3</sup> /sn)	Toplam Debi (Q) (m <sup>3</sup> /sn)
1	0.38	0.1134	0.1	1.12	0.3149	0.0357	0.0357
2	0.4371	0.1501	0.1	1.1215	0.477	0.0358	0.0716
3	0.4657	0.1703	0.1	1.1246	0.6305	0.0358	0.1074
4	0.4943	0.1919	0.1	1.1294	0.7462	0.0358	0.1432
5	0.5229	0.2147	0.1	1.1356	0.8335	0.0358	0.179
6	0.5514	0.2388	0.1	1.1427	0.8994	0.0358	0.2148
7	0.58	0.2642	0.1	1.1505	0.9487	0.0359	0.2507
8	0.6086	0.2909	0.1	1.1587	0.9853	0.0359	0.2866
9	0.6371	0.3188	0.1	1.1669	1.0119	0.036	0.3226
10	0.6657	0.3481	0.1	1.1751	1.0307	0.0361	0.3588
11	0.6943	0.3786	0.1	1.1832	1.0433	0.0362	0.395
12	0.7229	0.4104	0.1	1.191	1.051	0.0363	0.4313
13	0.7514	0.4435	0.1	1.1986	1.0548	0.0365	0.4678
14	0.78	0.4778	0.1	1.2058	1.0555	0.0366	0.5043
15	0.8086	0.5135	0.1	1.2127	1.0536	0.0367	0.541
16	0.8371	0.5504	0.1	1.2193	1.0497	0.0368	0.5778
17	0.8657	0.5886	0.1	1.2256	1.0442	0.0369	0.6147
18	0.8943	0.6281	0.1	1.2315	1.0374	0.037	0.6516
19	0.9229	0.6689	0.095	1.2372	1.0242	0.0335	0.6851
20	0.9514	0.711	0.095	1.2425	1.0108	0.0335	0.7186
21	0.98	0.7543	0.095	1.2474	0.9973	0.0336	0.7523

### 6.1.2. Stabilite Analizi

Deniz tabanına serbestçe oturtulmuş borunun stabilitesini bozan kuvvetler yatay düzlemde dalga hareketinden gelen  $F_I$  ve  $F_D$  kuvvetleridir. Düşey düzlemde ise hidrostatik kaldırma kuvveti, borunun kendi ağırlığı difüzör impuls momentum kuvvetleri ve hidrodinamik kaldırma kuvvetidir. Daha önce kesit ve özellikleri belirtilen tedrici değişken kesitli boru ve ortam için stabilite analizi borunun ucunda ve başındaki birim boy için yapılacaktır. Eğer stabilite iki kesitte sağlanırsa ara kesitlerde de sağlanmıştır kabulü ile dinamik analize geçilecektir.



Şekil 6.1. Deniz Tabanına Serbest Oturan Tedrici Değişen Kesitli Difüzör.

Deşarj borusunda şekil deki gibi boru eksenine dik çıkış olacak şekilde tasarlanmış olan çıkışlardan su tahliyesi esnasında eksene dik düşey kuvvetler oluşacaktır. Debisi, çapı, yoğunluğu ve iç basıncı bilinen bu atık suyun boru ya etki ettireceği düşey kuvvet hesaplanabilmektedir. Hesaplanan bu kuvvet aşağı yönlü olduğu için statik açıdan yararlı ancak zamanla zemine gömülmesine neden olabilir. Ayrıca dalga kuvvetlerinden gelen düşey düzlemdeki yukarı yönlü kuvvet ( $F_L$ ) ve bir diğer düşeydeki yukarı yönlü hidrostatik kaldırma kuvvetinin de dikkate alınması gerekmektedir.

#### **Boru Uç Kısmında Dalga Hız ve İvmelerinin Belirlenmesi:**

Hız denkleminde geçen  $s = z + d$  sabiti, boru hattının ekseninin tabandan yüksekliği ( $z$ ) ile su yüzeyinden olan derinliğinin ( $d$ ) toplamın sabit olduğunu ifade eder. Burada boru ucu için  $s = 0,2$  m dir. Serbest oturan boru ekseninin uç kısmında tabandan yüksekli değeri  $z = 24,8$  olduğundan su derinliği,  $d = 25$  m olarak tesbit edilir.

Dalga boyu hesabı,

Bilinen dalga karakteristikleri yerine yazıldıktan sonra denklem içerisinde kullanılan ve eşitliğin her iki tarafında bulunan dalga boyları birbirine eşitlenene kadar  $L$  için değer verilerek çözüm yapılması gerekmektedir. Buna göre,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad \text{bağıntısı kullanılarak en uygun değerin } L=93,28 \text{ m olduğu}$$

belirlenmiştir.

Dalga yayılma hızı,

$$c = \frac{L}{T} = \frac{93,28}{8} = 11,66$$

Dalğanın frekansı ise,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{8} = 0,785 \text{ olarak belirlenir.}$$

$$k = \frac{2\pi}{L} = \frac{2\pi}{93,28} = 0,067 \text{ olarak belirlendikten sonra bulunan değerler } \Theta = k(x - ct)$$

ifadesinde yerine yazılır. Burada su derinliği sabit olduğu için x parametresi dikkate alınmaz. Bu durumda ifade  $\Theta = -kct$  halini alır. Burada  $\omega = kc$  olduğundan ifadede yerine yazılır ve,

$$\Theta = -\omega.t = -0,785t \text{ olarak elde edilir.}$$

Dalga hızı için bilinen değerler yerine yazılırsa zamana bağlı formda yazılırsa bağıntı aşağıdaki halini alır.

$$\begin{aligned} U &= \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh(2\pi(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \cos(\Theta) \\ &= \frac{2,5}{2} \frac{9,81 \cdot 8}{93,28} \frac{\cosh(2\pi(0,2)/93,28)}{\cosh(2\pi \cdot 25/93,28)} \cos(-0,785.t) = 0,377 \cos(-0,785 t) \end{aligned}$$

İvme terimi ise

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh(2\pi(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \sin(\Theta) \\ &= \frac{9,81\pi \cdot 8}{93,28} \frac{\cosh(2\pi(0,2)/93,28)}{\cosh(2\pi \cdot 25/93,28)} \sin(-0,785 t) = 0,296 \sin(-0,785 t) \end{aligned}$$

Şeklinde ifade edilir.

### **Boru Baş Kısmında Dalga Hız ve İvmelerinin Belirlenmesi:**

Hız denkleminde geçen  $s$  sabiti boru başında  $s = 0,5$  m dir. Serbest oturan boru ekseninin baş kısmında tabandan yüksekli değeri  $z = 24,5$  olduğundan su derinliği,  $d = 25$  m olarak tesbit edilir.

Borunun baş kısmı için dalga hızı için bilinen değerler yerine yazılırsa zamana bağlı formda yazılırsa bağıntı aşağıdaki halini alır.

$$U = \frac{2,5}{2} \frac{9,81.8 \cosh(2\pi(0,5)/93,28)}{93,28 \cosh(2\pi.25/93,28)} \cos(-0,785.t)$$

$$= 0,377 \cos(-0,785 t)$$

İvme terimi ise

$$\dot{U} = \frac{9,81\pi 8 \cosh(2\pi(25)/93,28)}{93,28 \cosh(2\pi.24,5/93,28)} \sin(-0,785 t)$$

$$= 0,296 \sin(-0,785 t)$$

Şeklinde ifade edilir.

Borunun başı için bulunan bu değerler borunun uç hız ve ivme değerleri ile 0,0001 fark ile aynı çıkmıştır. Bulunan bu değerlerin değişik zamanlarda elde edilen hız ve ivme değerleri aşağıdaki Çizelge 6.5.' de gösterilmiştir.

Çizelge 6.5. Serbest Oturan Boruya Etkiyen Maksimum Hız ve ivme değerleri

	t=0	t=T/4	t=T/2	t=3T/4	t=T
Hız (m/sn)	0,377	0	-0,377	0	0,377
İvme (m/sn <sup>2</sup> )	0	-0,296	0	0,296	0

Yüzeydeki lineer dalganın derinliğe bağlı basınç denklemi 4. bölümde anlatıldığı gibi,

$$P_D = \frac{\rho_a g H}{2} \frac{\cosh(2\pi(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \cos(\Theta) - \rho_a g z \text{ şeklinde ifade edilmektedir.}$$

Değerler yerine yazılırsa ifade,

$$P_D = \frac{1,029.9,81.2,5}{2} \frac{\cosh(2\pi(0,5)/93,28)}{\cosh(2\pi.25/93,28)} \cos(-0,785t) - 1,029.9,81.24,5$$

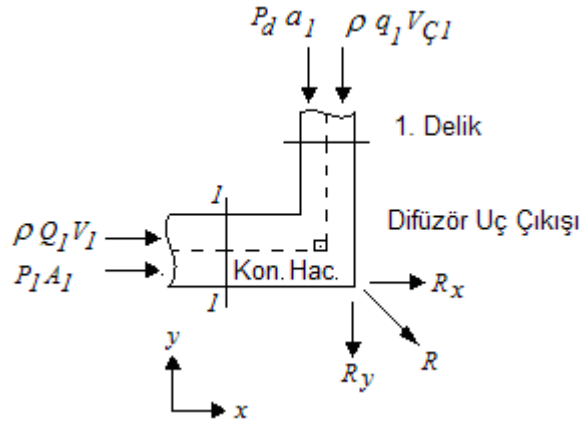
$$P_D = 4,51 \cdot \cos(-0,785t) - 247,315 \text{ olarak bulunur.}$$

$$P_{D,Max} = 251,825 \text{ kN/m}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

### Difüzör İmpuls—Momentum Kuvvetlerinin Belirlenmesi

Atık suyun difüzörden çıkışı esansında impuls momentum kuvvetleri meydana gelir. Bu kuvvetlerin hesabı için gerekli olan debi ( $q$ ), çıkış alanı ( $a$ ), dış ortam su basıncı ( $P$ ), akışkan yoğunluğu ( $\rho_0$ ) ve çıkış hızı ( $V$ ) bilinmektedir. Difüzör çıkışlarından denize deşarj edilen atık suların impuls—momentum kuvvetleri:

Bu kuvvetlerin yönü şekil 6.1.2. de verildiği gibidir.



Şekil 6.2. Difüzör 1. Delik

Difüzör uç yapısına (1. deliğe) etkiyen yatay kuvvet,

$$\sum F_x = 0 \quad R_x = P_1 A_1 + \rho_a Q_1 V_1 = 271,188.0,1134 + 0,999.0,0357.0,3152$$

$$R_x = 29,870 \text{ kN olarak bulunur.}$$

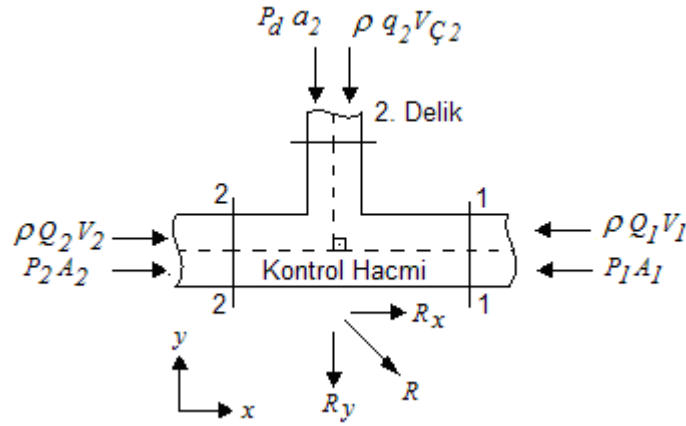


Difüzör uç yapısına etkiyen düşey kuvvet,

$$\sum F_Y = 0 \quad R_Y = P_D a_1 + \rho_a q_1 V_{\zeta 1} = 251,825.0,00785 + 0,999.0,0357.4,56$$

$$R_Y = 2,139 \text{ kN olarak bulunur.}$$

1. Deliğe etkiyen kuvvetleri bulduktan sonra ikinci deliğe geçerseniz,



Şekil 6.3. Difüzör 2. Delik

Genel hali ile kontrol hacminin denge denklemleri:

$$\sum F_X = 0 \quad R_X = P_2 A_2 + \rho_a Q_2 V_2 - P_1 A_1 - \rho_a Q_1 V_1$$

$$= 263,23.0,15 + 0,99.0,72.0,48 - 263,28.0,113 - 0,99.0,038.0,315$$

$$R_X = 9,671 \text{ kN}$$

$$\sum F_Y = 0 \quad R_Y = P_D a_2 + \rho_a q_2 V_{\zeta 2} = 251,825.0,00785 + 0,999.0,0358.4,56$$

$$R_Y = 2,141 \text{ kN}$$

Benzer şekilde diğer deliklerin hesabı bilgisayar destekli çözülmüş ve her bir düğüme etkiyen kuvvetler Çizelge 6.6' da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6. Çıkış Noktalarına Etkiyen Yatay ve Düşey Kuvvetler.

Delik No	Eksenel Kuvvet $N_i$ (kN)	Düşey kuvvet ( $F_{Ç,i}$ ) (kN)
1	29.870	2.1395
2	9.6709	2.1403
3	5.3572	2.1400
4	5.7023	2.1398
5	6.0467	2.1398
6	6.3906	2.1401
7	6.7339	2.1406
8	7.0769	2.1412
9	7.4195	2.1420
10	7.7619	2.1429
11	8.1040	2.1439
12	8.4459	2.1449
13	8.7876	2.1459
14	9.1292	2.1469
15	9.4707	2.1479
16	9.8121	2.1489
17	10.153	2.1499
18	10.494	2.1508
19	10.832	2.1193
20	11.172	2.1200
21	11.513	2.1208

Difüzörlerden atık su çıkışı esnasında (düşey) ve daralan kesit ekseninde (yatay) oluşan impuls momentum kuvvetleri maksimum dalga basıncı etkisinde çözülmüştür. Bu  $t=0$  da maksim olan statik kuvvetler stabilite analizinde düşey ve eksenel yük olarak işlemlerde kullanılacaktır. Düşey çıkış kuvveti bütün delikler için maksimum olan  $F_{Ç} = 2,14$  kN tekil kuvveti olarak alınacaktır. Eksenel kuvvet ise stabilite analizinde toplam olarak  $N_T = 199,946$  kN değeri alınacaktır.

Stabilite analizinde kullanılan hidrodinamik kuvvet katsayıları için aşağıdaki çizelgeden genel durum dikkate alınmıştır.

Çizelge 6.7.  $C_I$ ,  $C_D$ ,  $C_L$  Sabitleri İçin Tavsiye Edilen Değerler (Öztürk, 1996)

Kaynak	e/D=0			e/D>1/4		
	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$
Grace(1978)	3,30	1,00	1,00	2,15	1,00	0,50
Janson(1990)	3,30	1,00	2,00	2,00	0,70	0,00
HRS(1977)	3,77	1,04	-	2,40	0,95	-
SWECO(1978)	3,00	2,00	4,00	2,40	1,10	0
Det Norske Veritas(1978)	3,30	0,70	0,95	2,40	0,70	0
Genel	3,30	1,00	1,00	2,20	1,00	0

Çizelge 6.7' de; e değeri boru hattının tabanının zemine olan mesafesini, D değeride borunun çapını ifade eder. Bu çalışmada taban serbest oturan boru için e=0 m ve Genel duruma göre  $C_I=3,3$   $C_D=1$  ve  $C_L=1$  alınmıştır.

#### **Serbest Oturan Tedrici Boru Uç Kısmı Düşey Stabilite Analizi:**

Düşeydeki hidrodinamik kaldırma kuvveti tabana serbestçe oturan boru için,  $e/D=0$  olduğundan  $C_L=1$  alınabilir bu durumda uç kısmın hidrodinamik kaldırma kuvveti,

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_a D U^2 = \frac{1}{2} 1,1,029 \cdot (0,4) \cdot (0,377)^2 = 0,0029 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Hidrostatik kaldırma kuvveti,

$$F_B = \left( \gamma_a \frac{1}{4} \pi (D^2) \right) - \left( \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D-2s)^2 \right) = 10,09 \frac{\pi}{4} (0,4^2) - 9,80 \frac{\pi}{4} 0,38^2 = 0,156 \text{ kN/m}$$

Boru ağırlığı,

$$F_W = \gamma_b \frac{1}{4} \pi (D^2 - (D-2s)^2) = 78,34 \frac{1}{4} \pi (0,4^2 - 0,38^2) = 0,959 \text{ kN/m}$$

Difüzör çıkış impuls momentum kuvvetleri,

Çizelge 6.6' da çıkış kuvvetleri için bulunan maksimum düşey kuvvet noktasal olarak  $F_{\zeta} = 2,14$  kN dur. Her bir delik arası 5.0 m olduğundan bu kuvveti yayılı yük haline getirmek için 5 m ye bölmek gerekir. O halde,

$$F_{\zeta} = 2,14 / 5 = 0,428 \text{ kN/m olur.}$$

Zemin taşıma kapasitesi,

$$F_C = \left( N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_{\gamma} \gamma_s B \right) B = \left( 0 + \frac{1}{2} 19,13 \cdot 20 \cdot 0,3 \right) 0,3 = 17,217 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Buluna bu değerler aşağıda yerine yazılırsa,

$$\sum F_V = F_{\zeta} + F_W - F_B - F_L \geq 0 \rightarrow 0,428 + 0,959 - 0,156 - 0,029 = 1,202 > 0 \text{ Uygundur.}$$

Ayrıca,

$$F_B + F_L \leq \frac{F_{\zeta} + F_W}{G_s} \rightarrow 0,156 + 0,029 = 0,185 < \frac{0,428 + 0,959}{1,5} = 0,922 \text{ Uygundur.}$$

$$F_C \geq G_s F_V \rightarrow 17,217 > 1,5 \cdot 1,202 = 1,803 \text{ Uygundur.}$$

### **Serbest Oturan Boru Uç Kısmı İçin Yatay Stabilite Analizi:**

Yataydaki hidrodinamik dalga kuvvetleri uç kısım için,

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_a D U^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (1,029) \cdot (0,4) \cdot (0,377)^2 = 0,029 \text{ kN/m}$$

$$F_I = \frac{1}{2} C_I \rho_a D^2 \dot{U} = \frac{1}{2} \cdot (3,3) \cdot (1,029) \cdot (0,4)^2 \cdot (0,296) = 0,080 \text{ kN/m}$$

Sürtünme kuvveti ise kohezyonsuz zeminler için,

$$F_s = F_v \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) = 1,202 \cdot \tan(15) + 0 = 0,322 \text{ kN/m}$$

Yatay düzlemde stabilite şartı,

$$\sum F_H = F_D + F_I - F_s \leq 0 \rightarrow 0,029 + 0,080 - 0,322 = -0,213 \leq 0 \quad \text{Uygundur.}$$

Güvenlik Kontrolü,

$$F_s = 0,322 \geq G_s (F_I + F_D) = 1,5 \cdot (0,109) = 0,164 \text{ kN/m Uygundur.}$$

### **Serbest Oturan Boru Orta Kısmı Düşey Stabilite Analizi:**

$e/D = 0$  için  $C_L = 1$  alınabilir. Bu durumda orta kısmın hidrodinamik kaldırma kuvveti,

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_a D U^2 = \frac{1}{2} 1,1 \cdot 1,029 \cdot (0,7) \cdot (0,377)^2 = 0,051 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Hidrostatik kaldırma kuvveti,

$$F_B = \left( \gamma_a \frac{1}{4} \pi (D^2) \right) - \left( \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D - 2s)^2 \right) = 10,09 \frac{\pi}{4} (0,7)^2 - 9,80 \frac{\pi}{4} (0,68)^2 = 0,324 \text{ kN/m}$$

Boru ağırlığı,

$$F_W = \gamma_b \frac{1}{4} \pi (D^2 - (D - 2s)^2) = 78,34 \frac{1}{4} \pi (0,7^2 - 0,68^2) = 1,698 \text{ kN/m}$$

Difüzör çıkış impuls momentum kuvvetleri,

$$F_\zeta = 2,14 / 5 = 0,428 \text{ kN/m}$$

Zemin taşıma kapasitesi,

$$F_C = \left( N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_\gamma \gamma_s B \right) B = \left( 0 + \frac{1}{2} 19,13 \cdot 20,0 \cdot 3 \right) 0,3 = 17,217 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Buluna bu değerler aşağıda yerine yazılırsa,

$$\sum F_V = F_C + F_W - F_B - F_L \geq 0 \rightarrow 0,428 + 1,698 - 0,324 - 0,051 = 1,751 > 0 \text{ Uygundur.}$$

Ayrıca,

$$F_B + F_L \leq \frac{F_C + F_W}{G_S} \rightarrow 0,324 + 0,051 = 0,375 < \frac{0,428 + 1,698}{1,5} = 1,417 \text{ Uygundur.}$$

$$F_C \geq G_S F_V \rightarrow 17,217 > 1,5 \cdot 1,751 = 2,627 \text{ Uygundur.}$$

### **Serbest Oturan Boru Orta Kısım İçin Yatay Stabilite Analizi:**

Yataydaki hidrodinamik dalga kuvvetleri orta kısım için,

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_a D U^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (1,029) \cdot (0,7) \cdot (0,377)^2 = 0,051 \text{ kN/m}$$

$$F_I = \frac{1}{2} C_I \rho_a D^2 \dot{U} = \frac{1}{2} \cdot (3,3) \cdot (1,029) \cdot (0,7)^2 \cdot (0,296) = 0,075 \text{ kN/m}$$

Sürtünme kuvveti ise kohezyonsuz zeminler için

$$F_S = F_V \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) = 1,751 \cdot \tan(15) = 0,469 \text{ kN/m}$$

Yatay düzlemde stabilite şartı,

$$\sum F_H = F_D + F_I - F_S \leq 0 \rightarrow 0,051 + 0,075 - 0,469 = -0,343 \leq 0 \text{ uygundur.}$$

Sürtünme kuvveti yatay kuvvetleri taşıyabilmektedir. Güvenlik kontrolü,

$$F_I + F_D \leq \frac{F_S}{G_S} \Rightarrow G_S (F_I + F_D) = 1,5 \cdot (0,126) = 0,189 \geq F_S = 0,469 \text{ Uygunur.}$$

Sürtünme direnci yatay düzlemde güvenlidir.

### **Serbest Oturan Boru Baş Kısmı Düşey Stabilité Analizi:**

$e/D = 0$  için  $C_L = 1$  alınabilir. Bu durumda baş kısmın hidrodinamik kaldırma kuvveti,

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_a D U^2 = \frac{1}{2} 1,1 \cdot 0,029 \cdot 1 \cdot (0,377)^2 = 0,073 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Hidrostatik kaldırma kuvveti,

$$F_B = \left( \gamma_a \frac{1}{4} \pi (D^2) \right) - \left( \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D - 2s)^2 \right) = 10,09 \frac{\pi}{4} (1^2) - 9,80 \frac{\pi}{4} 0,98^2 = 0,534 \text{ kN/m}$$

Boru ağırlığı,

$$F_W = \gamma_b \frac{1}{4} \pi (D^2 - (D - 2s)^2) = 78,34 \frac{1}{4} \pi (1^2 - 0,98^2) = 2,436 \text{ kN/m}$$

Difüzör çıkış impuls momentum kuvvetleri,

$$F_C = 2,14 / 5 = 0,428 \text{ kN/m}$$

Zemin taşıma kapasitesi,

$$F_C = \left( N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_\gamma \gamma_s B \right) B = \left( 0 + \frac{1}{2} 19,13 \cdot 20 \cdot 0,3 \right) 0,3 = 17,217 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Buluna bu değerler aşağıda yerine yazılırsa,

$$\sum F_V = F_C + F_W - F_B - F_L \geq 0 \rightarrow 0,428 + 2,436 - 0,535 - 0,073 = 2,248 > 0 \text{ Uygundur.}$$

Ayrıca,

$$F_B + F_L \leq \frac{F_C + F_W}{G_S} \rightarrow 0,535 + 0,073 = 0,608 < \frac{0,428 + 2,436}{1,5} = 1,909 \text{ Uygundur.}$$

$$F_C \geq G_S F_V \rightarrow 17,217 > 1,5 \cdot 2,248 = 3,372 \text{ Uygundur.}$$

### **Serbest Oturan Boru Baş Kısmı İçin Yatay Stabilite Analizi:**

Yataydaki hidrodinamik dalga kuvvetleri baş kısım için,

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_a D U^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (1,029) \cdot (1) \cdot (0,377)^2 = 0,073 \text{ kN/m}$$

$$F_I = \frac{1}{2} C_I \rho_a D^2 \dot{U} = \frac{1}{2} \cdot (3,3) \cdot (1,029) \cdot (1)^2 \cdot (0,296) = 0,502 \text{ kN/m}$$

Sürtünme kuvveti ise kohezyonsuz zeminler için,

$$F_S = F_V \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) = 2,248 \cdot \tan(15) = 0,602 \text{ kN/m}$$

Yatay düzlemde stabilite şartı,

$$\sum F_H = F_D + F_I - F_S \leq 0 \rightarrow 0,073 + 0,502 - 0,602 = -0,027 \leq 0 \text{ uygundur.}$$

Sürtünme kuvveti yatay kuvvetleri taşıyabilmektedir. Güvenlik kontrolü,

$$F_I + F_D \leq \frac{F_S}{G_S} \Rightarrow G_S (F_I + F_D) = 1,5 \cdot (0,575) = 0,863 \geq F_S = 0,602$$



$F_s$  yatay düzlemde güvenli değildir. Bunun için yatay düzlemdeki ağırlığı artırmamız gerekir. Minimum sürtünme kuvveti  $F_v$  ise,

$$F_s' \geq (F_I + F_D)G_s = 0,575 \cdot 1,5 = 0,863 \text{ kN/m olmalıdır.}$$

$$F_s' = F_v' \tan(a) \Rightarrow F_v' = \frac{F_s'}{\tan(a)} = \frac{0,863}{0,364} = 3,221 \text{ kN/m olması gerekmektedir.}$$

Mevcut düşey kuvvet, gereken toplam düşey kuvvetten çıkarılırsa tespit kitlesi gerekli birim ağırlığı bulunur. O halde,

$$F_{TK} = F_v' - F_v = 3,221 - 2,248 = 0,972 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Bulunan bu yeni düşey ağırlık için tekrar kontrol yapmak gerekir. O halde,

$$F_C \geq G_s F_v' \rightarrow 17,217 > 1,5 \cdot 3,221 = 4,832 \text{ uygundur.}$$

Bu şekilde serbest döşenmiş borunun baş kısmı için tespit kitlesi konulmalıdır.

Tedrici değişen borunun uç kısmı ile orta kısmı arası stabildir. Ancak baş kısmı ile orta kısma kadar olan bölge stabil değildir. Bu kısım tespit kitleleri ile stabil hale getirilmelidir. O halde boruya  $x=0'$  dan,  $x=L/2'$  ye kadar  $F_{TK} = 0,972$  kN/m lik bir ağırlık asılmalıdır. Veya borunun ortasına kadar her 15,0 m de bir  $F_T = 15,0$  kN luk bir tespit kitlesi konulabilir. Bu çalışmada borunun orta noktasına kadar her 15 m' de bir 15 kN luk 4 adet beton blok ile boru ağırlaştırılmıştır. Geri kalan 45,0 m ise tek bir açıklık olarak düşünülmüştür.

Buna göre deniz tabanına oturan borunun mesnetler arası maksimum mesafesi 45,0 m olarak belirlenmiş olur.

### 6.1.3. Dinamik Analiz

#### 6.1.3.1. Düşey Düzlemde Dinamik Analiz

Tedrici değişen kesitli borunun deniz tabanında birim boyuna etkiyen toplam düşey dış kuvvet, borunun kendi ağırlığı, deliklerden çıkan dinamik impuls—momentum, hidrostatik kaldırma ve hidrodinamik kaldırma kuvvetinin tesiriyle konumla ve zamanla değişen bir kuvvet olmaktadır.

Pozitif yön kabulü olarak yukarı yönü pozitif kabul edersek ( $\uparrow +$ ) toplam kuvvet,

$$F_{Top}(x, t) = F_B(x) + F_L(x, t) - F_W(x) - F_C(t) \text{ olmaktadır.}$$

Tedrici değişen borunun çapının x doğrultusundaki değişimini veren bağıntı ise,

$$D(x) = D_{bas} - (D_{bas} - D_{uç}) \cdot \frac{x}{L} \text{ şeklindedir.}$$

Boru ve içindeki akışkanın salınımı aynı olacağından toplam kütle olarak alınır. ve kütle x doğrultusunda değişkendir. Denklemi ise, ( $m = \rho_b A_b + \rho_0 A_0$ )

$$m(x) = \rho_b \frac{\pi}{4} (D(x)^2 - (D(x) - 2s)^2) + \rho_0 \frac{\pi}{4} (D(x) - 2s)^2 \text{ şeklindedir.}$$

Boru birim atalet denklemini veren bağıntı ise aşağıda gösterilmiştir (İnan, 1967).

$$I(x) = \frac{\pi}{64} (D(x)^4 - (D(x) - 2e)^4)$$

#### **Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Tanımlanması**

Sistemin dış yük etkileri altında yapacağı deplasmanın başlangıç eğrisi (elastik eğrisi) sap2000 programında ön yükleme yapıp bu yük etkisinde vermiş olduğu düşey deplasmandan yararlanarak eğri uydurma metodu ile aşağıdaki gibi elde edilmiştir.  $\{\psi : 0,1\}$

$$\psi(x) = 6,104 \sin(0,138x + 1,647) + 7,290 \sin(0,187x + 0,639) + 12,67 \sin(0,171x - 2,174)$$

Düşey dinamik dış yük ( $F_V(x,t)$ ) teriminin varlığıyla salınım yapan sönümsüz sistemde uygulama verileri yerine yazılarak bulunan, genel kütle ( $m^*$ ) ve genel rijitlik ( $\bar{k}^*$ ) terimleri; burada zemin yay katsayısı  $k_y$  konumla değişmemektedir.

$$m^* = \int_0^L m(x)\psi(x)^2 dx = 7,45$$

$$k^* = \int_0^L k_y(x)\psi(x)^2 dx + E_b \int_0^L I(x)\psi''(x)^2 dx = 60404,70$$

olarak bulunur. Tedrici değişken boruda  $N(x)$  değerlerini her bir delik hizası için hesaplayan bağıntı,

$$N_n = P_n A_n + \rho_0 Q_n V_n - P_{n+1} A_{n+1} - \rho_0 Q_{n+1} V_{n+1} \text{ dir.}$$

Bu bağıntıya göre hesaplanan  $N(x)$  değerleri Çizelge 6.6' da verilmişti. Kuvvet yönü sola doğru pozitif kabul edilirse ( $\leftarrow +$ ) aksenal kuvvet çekme olduğu için  $-N(x)$  olacaktır.

Buna göre,

$$k_G^* = \int_0^L -N(x)\psi'(x)^2 dx = -5,48 \text{ ve}$$

$$\bar{k}^* = k^* - k_G^* = 60404,70 + 5,48 = 60410,18$$

Düşey yönde etkiyen dış kuvvet terimlerinden biri olan difüzör çıkış kuvveti su yüzeyinin değişiminden zamanla değişen deniz taban basıncı bu kuvvetinde zamanla değişen bir kuvvet haline getirir. Verilen değerler yerine yazılırsa difüzöre etkiyen basınç,

$$P_D = 4,51 \cdot \cos(-0,785t) + 247,315 \text{ kN/m}^2 \text{ olarak bulunmuştu.}$$

Bir delik için bulunan difüzöre çıkış kuvveti ise,

$$F_{\zeta}(t) = P_D(t) \cdot a_{\zeta} + \rho_a \cdot q_{\zeta} \cdot V_{\zeta} \quad \text{bağıntısından,}$$

$$F_{\zeta}(t) = (4,51 \cdot \cos(-0,785t) + 247,315) \cdot 0,00785 + 0,999 \cdot 0,0358 \cdot 4,56$$

$$F_{\zeta}(t) = 0,035 \cos(-0,785t) + 2,105 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Dalga boruya dik geldiği için aynı zamanda bütün çıkış kuvvetleri birbirine eşittir. Buna göre genelleştirilmiş her bir difüzör çıkış kuvveti,

$$F_{\zeta}^*(t) = \sum F_{\zeta,i}(t) \cdot \psi_i(x) \quad \text{bağıntısından hesaplanırsa,}$$

$$F_{\zeta}(t) = 0,222 \cos(-0,785t) + 14,095 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Konumla değişen hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_B(x) = \gamma_a \frac{1}{4} \pi D(x)^2 - \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D(x) - 2s)^2 = 7,928 \cdot D(x)^2 - 7,697 \cdot (D(x) - 2s)^2 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur.

Genelleştirilmiş hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_B^* = \int_0^L F_B(x) \psi(x) dx = 6,876 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Dalganın boru eksenindeki hızı,  $U(t) = 0,377 \cos(-0,785t)$  olarak bulunmuştu. Buna göre konumla ve zamanla değişen hidrodinamik kaldırma kuvveti ise,

$$F_L(x,t) = \frac{1}{2} C_L \rho_a D(x) U(t)^2 = 0,073 \cdot D(x) \cos^2(-0,785t) \text{ olarak bulunur.}$$

Genelleştirilmiş hidrodinamik kaldırma kuvveti ise aşağıdaki bağıntıdan hesaplanırsa,

$$F_L^*(t) = \int_0^L F_L(x,t)\psi(x)dx = 1,184 \cos(-0,785t)^2 \text{ kN olarak bulunur}$$

Boru ağırlığından gelen kuvvet ise,

$$F_W(x) = \gamma_b \frac{\pi}{4} \left( D(x)^2 - (D(x) - 2s)^2 \right) = 61,528 \left( D(x)^2 - (D(x) - 0,02)^2 \right) \text{ kN/m}$$

Genelleştirilmiş halde,

$$F_W^* = \int_0^L F_W(x)\psi(x)dx = 46,362 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Buna göre genelleştirilmiş zamanla değişen düşey düzlemdeki toplam dinamik dış kuvvet,

$$F_{Top}^*(t) = 6,876 + 1,184 \cos(-0,785t)^2 - 39,143 - 0,222 \cos(-0,785t) - 14,095$$

denklemini düzenlersek,

$$F_{Top}^*(t) = 1,184 \cos(-0,785t)^2 - 0,222 \cos(-0,785t) - 46,362 \text{ kN olarak bulunur.}$$

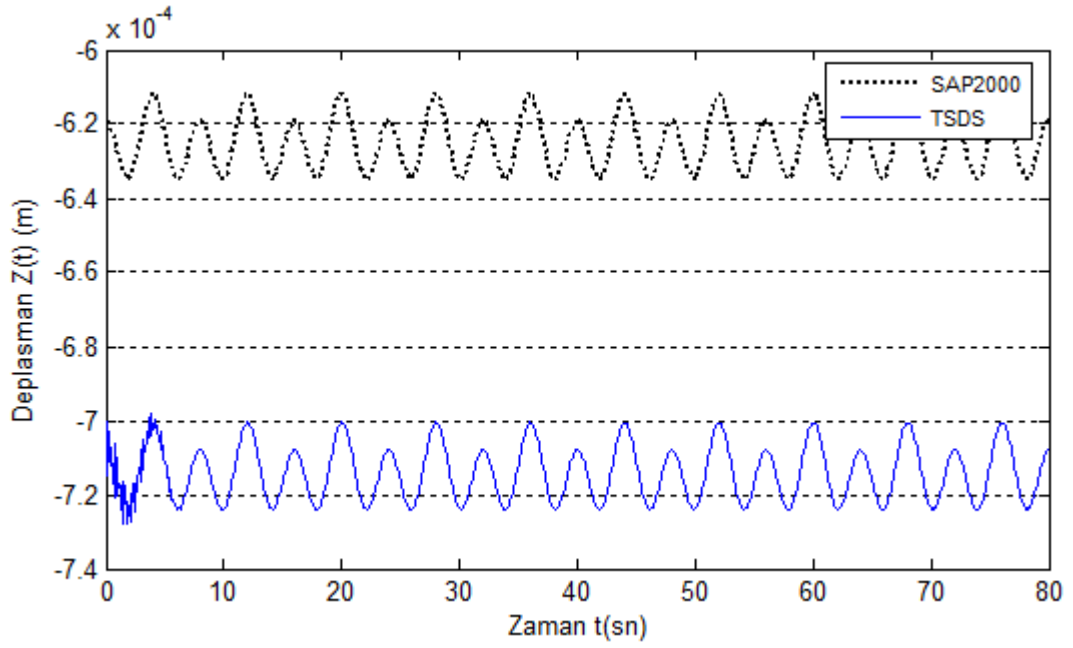
Bulunan bu değerler hareket denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$7,45 \cdot \ddot{Z}(t) + 60410,18 \cdot Z(t) = 1,184 \cos(-0,785t)^2 - 0,222 \cos(-0,785t) - 46,362$$

Bulunan bu hareket denklemini EK 2.a'da verilen bilgisayar programı ile başlangıç şartları olarak  $t=0$  da deplasman ve hız sıfır olduğu,

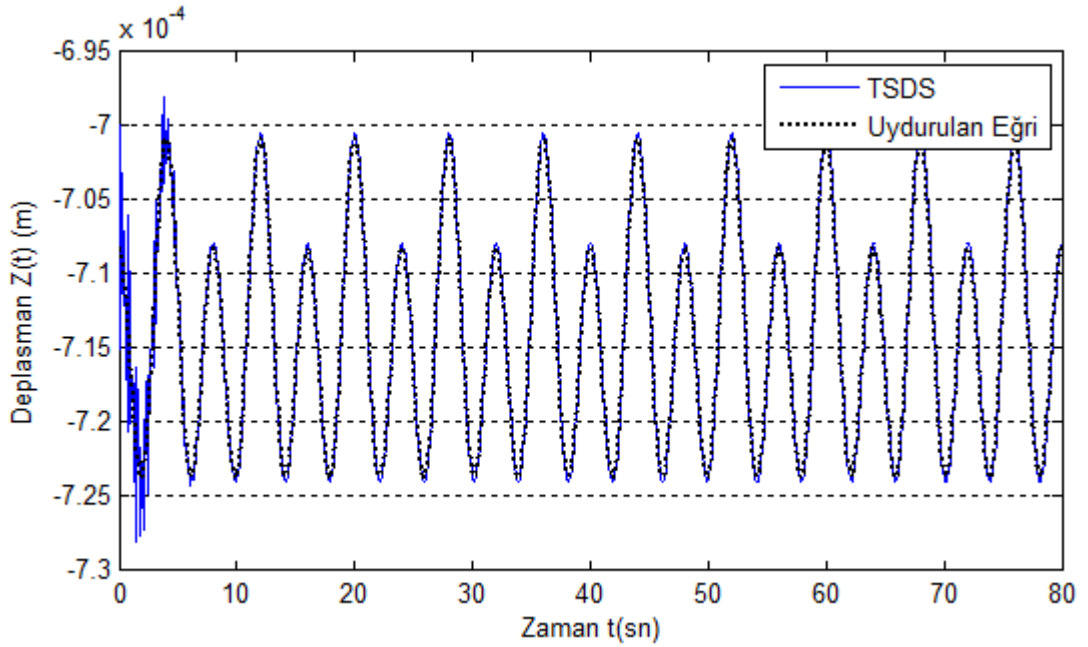
$$t=0 \Rightarrow Z(0)=0 \quad \text{ve} \quad t=0 \Rightarrow \dot{Z}(0)=0$$

kabul edilip çözüm yapılırsa aşağıdaki deplasman zaman grafiği elde edilir. (Şekil 6.4)



Şekil 6.4. TSD Sistem İle SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.

TSDS ile yapılan analiz ile SAP2000 programı ile yapılan analiz karşılaştırılmış ve sonuçların uyumluluğu Şekil 6.4.' de gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması

Sistemin salınım hareketi yaklaşık 10 sn den sonra belirli bir genliğe inerek devam etmektedir. Sistemin salınım denklemi belirlenirken 10 sn den sonraki genlik dikkate alınmış ve yukarıdaki grafikte de görüldüğü gibi Deplasman–Zaman eğri denklemi eğri uydurma metodu ile aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$Z(t) = -7,14 \times 10^{-4} + 9,82 \times 10^{-6} \sin(1,57t + 1,52) + 3,67 \times 10^{-6} \sin(0,785t - 1,59)$$

Bulunan zamanla değişim terimi konumla değişim terimi ile çarpılırsa sistemim konumla ve zamanla değişen deplasman denklemi olan  $v(x,t)$  elde edilmiş olur. Buna göre,

$$v(x,t) = \psi(x)Z(t)$$

$$v(x,t) = (6,104 \sin(0,138x + 1,647) + 7,290 \sin(0,187x + 0,639) + 12,67 \sin(0,171x - 2,174)) \times 10^{-6} (-714 + 9,82 \sin(1,57t + 1,52) + 3,67 \sin(0,785t - 1,59))$$

Sisteme etkileyen her bir kuvvetin yaptırdığı deplasman, SAP2000 yapısal analiz programı sonucu ile genelleştirilmiş TSD sistemin sonucu ve toplam deplasmanlar arasındaki farklar olarak aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 6.8. Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ( $x=7,5$  m)

Kuvvet	TSDS (m)	SAP2000 (m)	Fark (TSDS & SAP2000)
$F_L$	$1,96 \times 10^{-5}$	$1,87 \times 10^{-5}$	%5
$F_B$	$1,07 \times 10^{-4}$	$0,95 \times 10^{-4}$	%11
$F_W$	$-6,10 \times 10^{-4}$	$-5,18 \times 10^{-4}$	%15
$F_C$	$-2,21 \times 10^{-4}$	$-2,12 \times 10^{-4}$	%4
Toplam	$-7,044 \times 10^{-4}$	$-6,163 \times 10^{-4}$	%12

Yukarıdaki Çizelge 6.8' de görüldüğü gibi her iki çözüm yönteminde de birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Aradaki küçük farklar ise genelleştirilmiş TSD sistemin yaklaşık sonuçlar veren bir yöntem olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca başlangıçta kabul edilen elastik eğri denklemimin ne kadar doğruya yakın olursa sonuçlarında doğruya o kadar yaklaşacağı bilinmektedir. Bunun için başlangıç denklemi elde edilirken kullanılan kuvvetler ön yükleme olduğu için sistem gerçek sonuçlara yakınsak kalmakta ama kesin sonucu verememektedir.

### 6.1.3.2. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz

Sistemin elastik eğrisi ön yükleme yapılarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Burada hesaplanan ifadeler düşey düzlemde yapılan hesaplarla aynı yolu izlemektedir. Buna göre,  $\{\psi : 0 - 1\}$

$$\psi(x) = 1,089 \sin(0,073x + 0,0245) + 0,138 \sin(0,118x + 2,952)$$

olarak bulunur. Sistemin genelleştirilmiş kütle ve genelleştirilmiş rijitlik ifadeleri ise,

$$m^* = \int_0^L m(x) \psi(x)^2 dx = 7,597$$

$$k^* = E_b \int_0^L I(x) \psi''(x)^2 dx = 60,722$$

$$k_G^* = \int_0^L -N(x) \psi'(x)^2 dx = -5,489 \text{ ve}$$

$$\bar{k}^* = k^* - k_G^* = 60,722 + 5,489 = 66,211$$

Deniz tabanına serbest oturan difüzöre etkiyen yanal kuvvetler dalga hareketinden gelen hidrodinamik sürüklenme ve atalet kuvvetleridir. Deniz tabanında difüzör eksenini seviyesinde dalga hız ve ivmeleri daha önce bulunmuştu. Bunlar,

$$U = 0,377 \cos(-0,785 t) \quad \text{ve} \quad \dot{U} = 0,296 \sin(-0,785 t) \text{ dir.}$$

Bu değerlerden sürüklenme kuvveti,

$$F_D(x, t) = \frac{1}{2} C_D \rho_a D(x) U^2 = 0,073 D(x) \cos^2(-0,785 t) \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Genelleştirilirse,

$$F_D^*(t) = \int_0^L F_D(x, t) \psi(x) dx = 1,184 \cos^2(-0,785 t) \text{ kN olur.}$$



Atalet kuvveti ise,

$$F_I(x,t) = \frac{1}{2} C_I \rho_a D^2 \dot{U} = 0,502 D(x)^2 \sin(-0,785 t) \text{ kN/m olarak bulunur. Genelleştirilirse,}$$

$$F_I^*(t) = \int_0^L F_I(x,t) \psi(x) dx = 4,3 \sin(-0,785 t) \text{ kN olur.}$$

Buna göre genelleştirilmiş zamanla değişen yatay düzlemdeki toplam dinamik dalga kuvvet,

$$F_{Dal}^*(t) = F_D^*(t) + F_I^*(t) = 1,184 \cos(-0,785 t)^2 + 4,3 \sin(-0,785 t) \text{ kN olarak bulunur.}$$

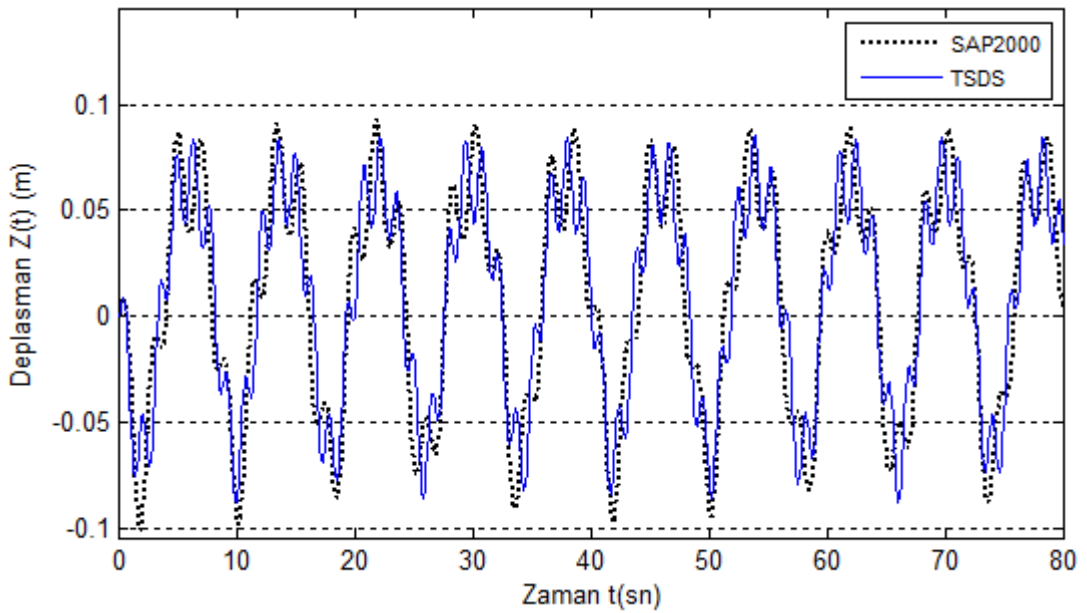
Bulunan bu değerler hareket denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$7,597 \ddot{Z}(t) + 66,211 Z(t) = 1,184 \cos(-0,785 t)^2 + 4,3 \sin(-0,785 t)$$

Bulunan bu hareket denklemi EK 2.a' de verilen bilgisayar programı ile başlangıç şartları olarak  $t=0$  da deplasmanlı ve hızsız olduğu,

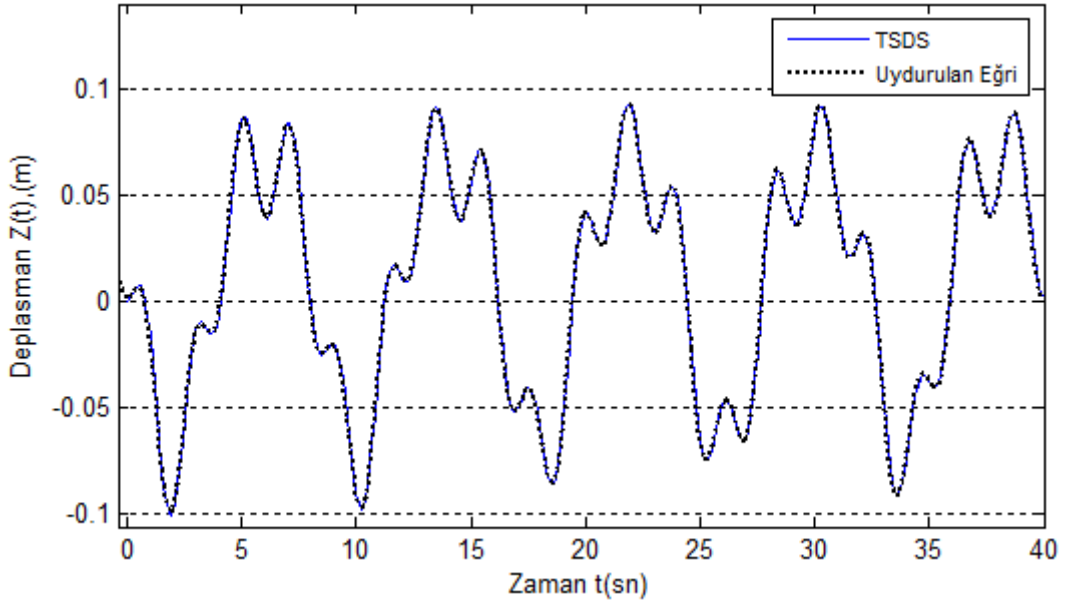
$$t=0 \Rightarrow Z(0)=0 \quad \text{ve} \quad \dot{Z}(0)=0$$

kabul edilip çözüm yapılırsa aşağıdaki deplasman zaman grafiği elde edilir. (Şekil 6.6)



Şekil 6.6 Dalga Kuvveti Etkisinde TSDS İle SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.

TSDS ile yapılan analiz ile SAP2000 programı ile yapılan analiz karşılaştırılmış ve sonuçların uyumluluğu Şekil 6.6' da gösterilmiştir. Sistemin salınım hareketi belirli bir genlikte devam etmektedir. Sistemin salınım denklemi belirlenirken TSDS çözümü dikkate alınmış ve aşağıdaki grafikte de görüldüğü gibi Deplasman–Zaman eğri denklemi eğri uydurma metodu ile belirlenmiştir.(Şekil 6.7)



Şekil 6.7. Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması

Deplasman zaman grafiği bulunan difüzörün deplasman zaman denklemi eğri uydurma metodu ile bulunursa denklem aşağıdaki halini alır.

$$Z(t) = \{0,069 \sin(0,785t + 3,141) + 0,026 \sin(2,982t - 0,86) \\ + 0,009 \sin(0,004t + 1,485) + 0,012 \sin(1,57t + 1,568)\}$$

Bulunan zamanla değişim terimi konumla değişim terimi ile çarpılırsa sistemim konumla ve zamanla değişen deplasman denklemi olan  $v(x,t)$  elde edilmiş olur. Buna göre,

$$v(x,t) = \psi(x)Z(t)$$

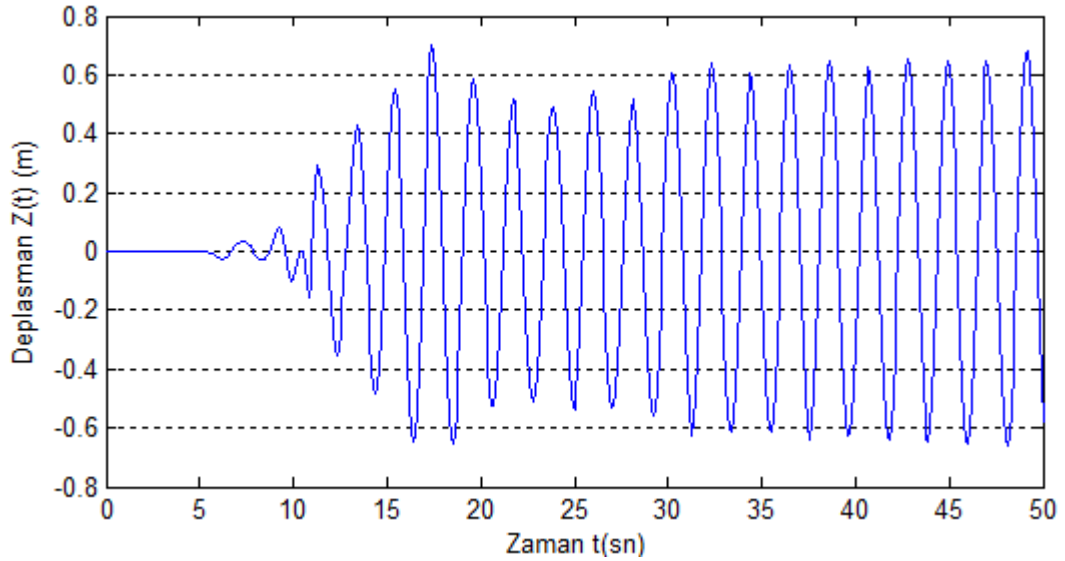
$$v(x,t) = (1,089 \sin(0,073x + 0,0245) + 0,138 \sin(0,118x + 2,952)) \\ \times \{0,069 \sin(0,785t + 3,141) + 0,026 \sin(2,982t - 0,86) \\ + 0,009 \sin(0,004t + 1,485) + 0,012 \sin(1,57t + 1,568)\}$$

Sonuç olarak sistemin deplasman zaman denklemi elde edilmiştir.

Deprem kuvveti olarak bu sisteme Şekil 4.15' te verilen 1999 Düzce depremi etki ettirilirse yapı kütlelerine bağlı olarak genelleştirilmiş halde

$$F_{Dep}^*(t) = \ddot{v}_g(t) \int_0^L m(x) \psi(x) dx = 10,213 \ddot{v}_g(t) \text{ kN olarak ifade edilebilir.}$$

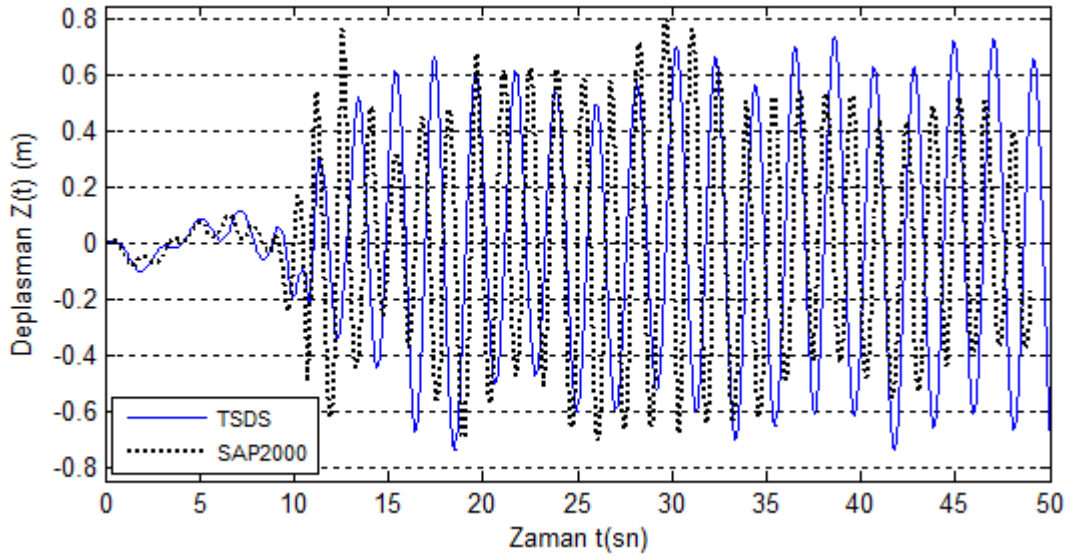
Difüzörün depreme maruz kalması durumunda sisteme etkileyecek deprem kuvveti etkisiyle yapacağı salınım aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. (Şekil 6.8)



Şekil 6.8 Sistemin Deprem Etkisinde Salınım Grafiği.

Bu çalışma kapsamında dış veya iç sönümleyici sistemler dikkate alınmadığı için sistem deprem dolayısı ile başladığı salınım uzun süre devam edecektir.

Eğer difüzöre dalga kuvvetleri ile birlikte deprem kuvvetinin de etki etmesi durumunda sistemin yapacağı salınım grafiği SAP2000 sonuçları ile birlikte aşağıda gösterilmiştir. (Şekil 6.9)



Şekil 6.9 TSDS ile SAP2000 Analizi Sonuçlarının Karşılaştırılması.

Sisteme etkileyen her bir kuvvetin yaptırdığı deplasman, SAP2000 yapısal analiz programı sonucu ile geliştirilmiş TSD sistemin sonucu ve toplam deplasmanlar arasındaki farklar olarak aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 6.9. Yatay Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ( $x=L/2$ )

Kuvvet	TSDS (m)	SAP2000 (m)	Fark(TSDS&SAP2000)
$F_I$	0.07556	0.07740	%2
$F_D$	0.04022	0.03991	%1
$F_{Dep}$	0.7056	0.7373	%4
Toplam	0.8214	0.8546	%4

Yukarıdaki Çizelge 6.9' de görüldüğü gibi her iki çözüm yönteminde de birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Aradaki küçük farklar ise geliştirilmiş TSD sistemin yaklaşık sonuçlar veren bir yöntem olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca başlangıçta kabul edilen elastik eğri denkleminin ne kadar doğruya yakın olursa sonuçlarında doğruya o kadar yaklaşacağı bilinmektedir. Bunun için başlangıç denklemi elde edilirken kullanılan kuvvetler ön yükleme olduğu için sistem gerçek sonuçlara yakınsak kalmakta ama kesin sonucu verememektedir.

## 6.2. Zemine Gömülü Kademeli Değişken Kesitli Difüzör Tasarımı

### 6.2.1. Difüzörün Hidrolik Hesabı

$$Q=750 \text{ lt/sn}, d=0.10 \text{ m}, a_1=0,00785 \text{ m}^2 \text{ (sabit)}$$

$$q_1 = 0.750 / 21 = 0,0357 \text{ m}^3/\text{sn}$$

1. Deliğin Hesabı,

(Çan ağızlı delik)

$$\frac{V_1^2}{2gE_1} \sim 0.015 \text{ kabulü ile } C_o = 0,969 \text{ alınabilir.}$$

Başlangıç için böyle bir kabul yapmak zorunluluğu vardır.

$$q_1 = C_o a_1 \sqrt{2gE_1} \Rightarrow E_1 = \left( \frac{0,0357}{0,969 \cdot 0,00785 \sqrt{19,62}} \right)^2 = 1,12 \text{ m bulunur.}$$

Hız ise,

$$V = \frac{q_1}{A} = \frac{0,0357}{\pi(0,38)^2 / 4} = 0,3149 \text{ m/sn} > 0.06 \text{ m/sn (uçtaki minimum hız şartı)}$$

$$\text{Buradan } \frac{V_1^2}{2gE_1} = \frac{(0,3149)^2}{19,62 \cdot 1,12} = 0,0045 < 0.015 \text{ yapılan kabul uygundur. İkinci deliğin}$$

hesabına geçilebilir.

## 2. Deliğın Hesabı,

Boru içi akışkanın bir adım önceki hızı,

$$V = \frac{q_1}{A} = \frac{0,0357}{\pi(0,38)^2 / 4} = 0,3149 \text{ m/sn}$$

Pürüzlülük katsayısı ise,

$$F = \frac{n^2 D 2g}{R^{4/3}} = \frac{0,012^2 \cdot 0,38 \cdot 2 \cdot 9,81}{(0,38/4)^{4/3}} = 0,0248$$

olarak bulunur. Buradan borunun L boyunca meydana gelen sürekli yük kaybı ise,

$$h_f = \frac{F V^2}{D 2g} L = \frac{0,0248 (0,3149)^2}{0,38 \cdot 19,62} 5 = 0,00165 \text{ m olarak bulunur.}$$

İkinci adımın enerji seviyesi ise,

$$E_2 = E_1 + h_f + \Delta z_1 \frac{\Delta \rho}{\rho} = 1,12 + 0,00165 + 0,0015 \cdot \frac{30}{999} = 1,1218 \text{ m bulunur.}$$

$$\text{Debi dağıtım katsayısı } C_o = 0,975 \left( 1 - \frac{V_1^2}{2gE_2} \right)^{3/8} = 0,9733 \text{ olarak bulunur.}$$

İkinci delikten çıkan debi ise,

$$q_2 = C_o a_2 \sqrt{2gE_2} = 0,9733 \cdot 0,00785 \sqrt{19,62 \cdot 1,1218} = 0,0358 \text{ m}^3/\text{sn olarak bulunur.}$$

İkinci adımdaki hız ise,

$$V_2 = \frac{\sum q_i}{A_i} = \frac{q_1 + q_2}{A_2} = \frac{0,0357 + 0,0358}{\pi \cdot (0,38)^2 / 4} = 0,6313 \text{ m/sn olarak bulunur.}$$

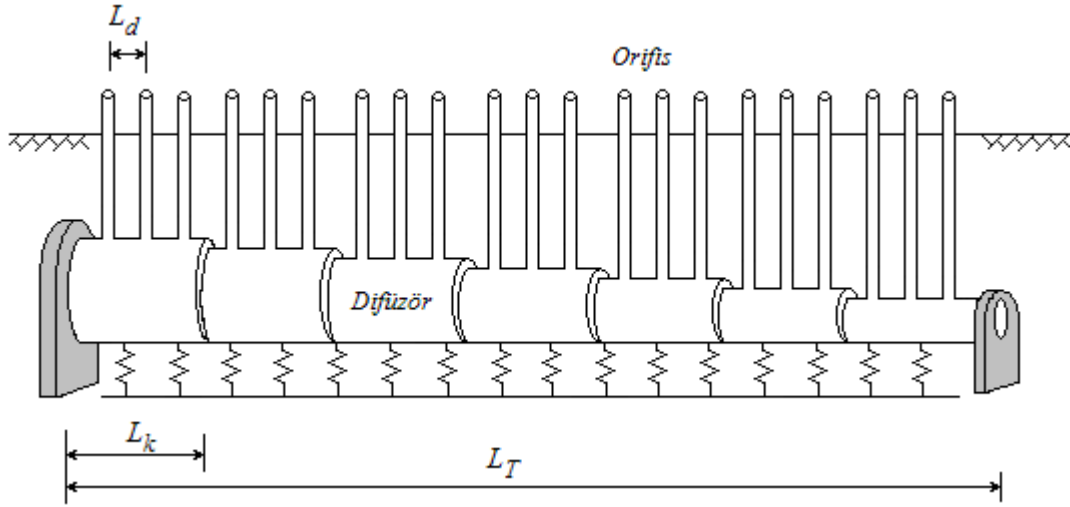
Diğer deliklerin hesabı bilgisayar destekli çözülmüştür. Bilgisayar sonuçları aşağıda verilen Çizelge 6.10. da gösterilmiştir.

Çizelge 6.10. Kademeli Değişen Kesitli Difüzör Hidrolik Tasarımı

Delik No	Boru Çapı (D) (m)	Kesit Alanı (A) (m <sup>2</sup> )	Delik Çapı (d) (m <sup>2</sup> )	Enerji (m)	Hız (V) (m/sn)	Debi (q <sub>i</sub> ) (m <sup>3</sup> /sn)	Toplam Debi (Q) (m <sup>3</sup> /sn)
1	0.38	0.1134	0.1	1.12	0.3149	0.0357	0.0357
2	0.38	0.1134	0.1	1.1218	0.6313	0.0358	0.0716
3	0.38	0.1134	0.1	1.1286	0.9467	0.0358	0.1074
4	0.48	0.181	0.1	1.1396	0.7903	0.0356	0.143
5	0.48	0.181	0.1	1.1474	0.9889	0.0359	0.1789
6	0.48	0.181	0.1	1.1595	1.1873	0.0359	0.2148
7	0.58	0.2642	0.1	1.1729	0.9489	0.0359	0.2507
8	0.58	0.2642	0.1	1.1816	1.0863	0.0363	0.287
9	0.58	0.2642	0.1	1.1929	1.2238	0.0363	0.3233
10	0.68	0.3632	0.1	1.2045	0.9903	0.0363	0.3596
11	0.68	0.3632	0.1	1.2122	1.0914	0.0367	0.3964
12	0.68	0.3632	0.1	1.2215	1.1926	0.0368	0.4331
13	0.78	0.4778	0.1	1.2307	0.9834	0.0368	0.4699
14	0.78	0.4778	0.1	1.237	1.0611	0.0371	0.507
15	0.78	0.4778	0.1	1.2443	1.1388	0.0372	0.5442
16	0.88	0.6082	0.1	1.2515	0.9558	0.0372	0.5813
17	0.88	0.6082	0.1	1.2566	1.0174	0.0375	0.6188
18	0.88	0.6082	0.1	1.2624	1.0791	0.0375	0.6563
19	0.98	0.7543	0.095	1.268	0.9149	0.0338	0.6901
20	0.98	0.7543	0.095	1.2721	0.9601	0.0341	0.7242
21	0.98	0.7543	0.095	1.2766	1.0053	0.0341	0.7583

**6.2.2. Stabilité Analizi:**

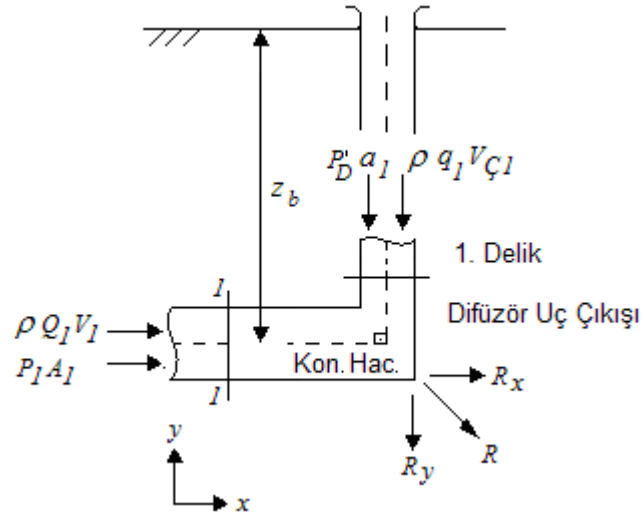
Deniz tabanında zemine gömülmüş kademli değişen kesitli borunun stabilitesini yatay düzlemde bozan kuvvet yoktur. Düşey düzlemde ise hidrostatik kaldırma kuvveti ve borunun kendi ağırlığı ve boru üzerindeki zeminin ağırlığı vardır. Borunun uç ve baş kısmı için stabilite analizi yapılacaktır. Eğer stabilite sağlanırsa ara kesitlerde de sağlanmıştır kabulü ile dinamik analize geçilecektir.



Şekil 6.10. Zemine Gömülü Kademeli Değişen Kesitli Difüzör.

### Difüzör İmpuls—Momentum Kuvvetlerinin Belirlenmesi

Tedrici değişen difüzör örneğinde boru deniz tabanına serbest oturduğu için difüzör çıkış basıncı olarak deniz taban basıncı alınmıştır burada ise difüzör eksenini deniz tabanının 1,50 m aşağısındadır. Bu yüzden difüzör eksenindeki basınç, deniz taban basıncı ( $P_D$ ) ile tabandan derinliğe bağlı oluşan ilave basıncın ( $\gamma_0 z_b$ ) toplamına eşittir.



Şekil 6.11. Difüzör 1. Delik

Buna göre difüzör çıkış basıncı

$$P'_D = P_D + \gamma_0 z_b \text{ (kN/m}^2\text{) olur.}$$



$P'_{D,Max} = P_{D,Max} + \gamma_0 z_b = 251,825 + 14,7 = 266,525 \text{ kN/m}^2$  olarak bulunur.

Difüzör çıkışlarından denize deşarj edilen atık suların impuls—momentum kuvvetleri:

Difüzör uç yapısına (1. deliğe) etkiyen yatay kuvvet,

$$\sum F_x = 0 \quad R_x = P_1 A_1 + \rho_a Q_1 V_1 = 278,423.0,1134 + 0,999.0,0357.0,3152$$

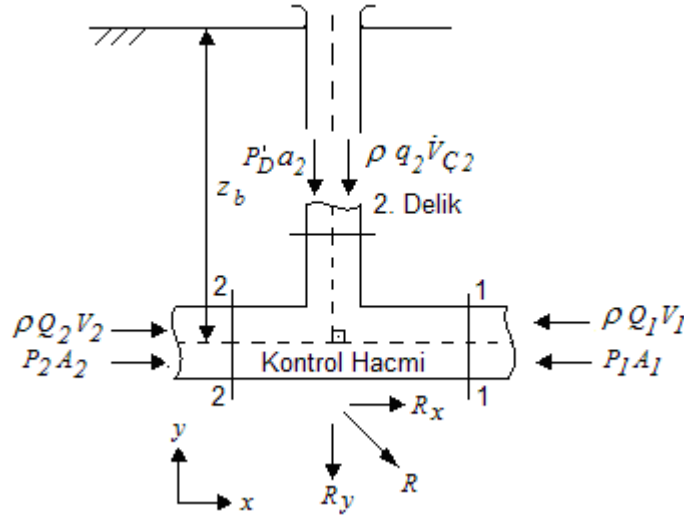
$R_x = 31,588 \text{ kN}$  olarak bulunur.

Difüzör uç yapısına etkiyen düşey kuvvet,

$$\sum F_y = 0 \quad R_y = P_D a_1 + \rho_a q_1 V_{C1} = 266,525.0,00785 + 0,999.0,0357.4,56$$

$R_y = 2,255 \text{ kN}$  olarak bulunur.

1. Deliğe etkiyen kuvvetleri bulduktan sonra ikinci deliğe geçerseniz,



Şekil 6.12. Difüzör 2. Delik

Genel hali ile kontrol hacminin denge denklemleri:

$$\sum F_x = 0 \quad R_x = P_2 A_2 + \rho_a Q_2 V_2 - P_1 A_1 - \rho_a Q_1 V_1$$

$$= 278,291.0,113 + 0,99.0,72.0,63 - 278,423.0,113 - 0,99.0,038.0,315$$

$$R_x = 0,019 \text{ kN}$$

$$\sum F_y = 0 \quad R_y = P_D a_2 + \rho_a q_2 V_{C2} = 266,525.0,00785 + 0,999.0,0358.4,56$$

$$R_y = 2,256 \text{ kN}$$

Benzer şekilde diğer deliklerin hesabı bilgisayar destekli çözülmüş ve her bir düğümüne etkiyen kuvvetler Çizelge 6.11. da gösterilmiştir.

Çizelge 6.11. Kademeli Boruya Etkiyen Difüzör Çıkış Kuvvetleri

Delik No	Eksenel Kuvvet $N_i$ (kN)	Düşey Kuvvet $F_{C,i}$ (kN)
1	31.5876	2.2549
2	0.019	2.2557
3	0.0357	2.2551
4	18.8402	2.2539
5	0.0457	2.2565
6	0.0604	2.2563
7	23.242	2.2558
8	0.0594	2.26
9	0.0712	2.2601
10	27.65	2.26
11	0.0654	2.264
12	0.0749	2.2642
13	32.0619	2.2642
14	0.0675	2.2677
15	0.0751	2.2679
16	36.4758	2.268
17	0.0674	2.2709
18	0.0736	2.271
19	40.8875	2.2379
20	0.0621	2.2399
21	0.0666	2.2401
Toplam	211,589	47.424

Difüzörlerden atık su çıkışı esnasında (düşey) ve daralan kesit ekseninde (yatay) oluşan impuls momentum kuvvetleri maksimum dalga basıncı etkisinde çözülmüştür. Bu t=0 da maksimum olan statik kuvvetler stabilite analizinde düşey ve eksenel yük olarak işlemlerde kullanılacaktır. Düşey çıkış kuvveti bütün delikler için maksimum olan  $F_{\zeta} = 2,26$  kN tekil kuvveti olarak alınacaktır. Eksenel kuvvet ise stabilite analizinde toplam olarak  $N_T = 211,589$  kN değeri alınacaktır.

### **Zemine Gömülü Boru Uç Kısmı Düşey Stabilite Analizi:**

Hidrostatik kaldırma kuvveti,

$$F_B = \left( \gamma_a \frac{1}{4} \pi (D^2) \right) - \left( \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D - 2s)^2 \right) = 10,26 \frac{\pi}{4} (0,4^2) - 9,99 \frac{\pi}{4} 0,38^2 = 0,156 \text{ kN/m}$$

Boru ağırlığı,

$$F_W = \gamma_b \frac{1}{4} \pi (D^2 - (D - 2s)^2) = 78,34 \frac{1}{4} \pi (0,4^2 - 0,38^2) = 0,959 \text{ kN/m}$$

Difüzör çıkış kuvveti,

$$F_{\zeta} = 2,26 / 5 = 0,452 \text{ kN/m (Çizelge 6.2.2.)}$$

Boru üstündeki zeminin ağırlığı

$$F_Z = \gamma_s \cdot D \cdot z = 20 \cdot 0,4 \cdot 1,5 = 12 \text{ kN/m}$$

Zemin taşıma kapasitesi, burada B değeri çap (D) değerine eşittir. (z=1,5 m)

$$F_C = \left( N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_{\gamma} \gamma_s B \right) B = \left( 22,46 \cdot 20 \cdot 1,5 + \frac{1}{2} 19,13 \cdot 20 \cdot 0,4 \right) 0,4 = 330,736 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur.

Buluna bu değerler aşağıda yerine yazılırsa,

$$\sum F_V = F_C + F_W + F_Z - F_B \geq 0 \rightarrow 0,452 + 0,959 + 12 - 0,156 = 13,252 > 0$$

Uygundur.

Ayrıca,

$$F_B \leq \frac{F_C + F_W + F_Z}{G_s} \rightarrow 0,156 \leq \frac{13,019}{1,5} = 8,835 \quad \text{Uygundur.}$$

$$F_C \geq G_s F_V \rightarrow 330,736 > 1,5 \cdot 13,252 = 19,878 \quad \text{Uygundur.}$$

#### **Zemine Gömülü Boru Uç Kısmı İçin Yatay Stabilite Analizi:**

Deniz tabanında gömülü bir boruya yatay hareket ettirecek bir kuvvet yoktur. Sürtünme kuvveti sistemi yeterince stabil kılmaktadır. Uç kısım için,

$$F_s = F_v \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) = 13,252 \cdot \tan(15) + \frac{1}{2} \cdot 20 \cdot 1,5^2 \tan^2(60)$$

$$F_s = 71,051 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

#### **Zemine Gömülü Boru Baş Kısmı Düşey stabilite analizi:**

Hidrostatik kaldırma kuvveti,

$$F_B = \left( \gamma_a \frac{1}{4} \pi (D^2) \right) - \left( \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D - 2s)^2 \right) = 10,09 \frac{\pi}{4} (1)^2 - 9,8 \frac{\pi}{4} (0,98)^2 = 0,532 \text{ kN/m}$$

Boru ağırlığı,

$$F_w = \gamma_b \frac{1}{4} \pi (D^2 - (D - 2s)^2) = 78,34 \frac{1}{4} \pi (1^2 - 0,98^2) = 2,436 \text{ kN/m}$$

Difüzör çıkış yükü,

$$F_C = 2,26 / 5 = 0,452 \text{ kN/m}$$

Boru üzerindeki zeminin yükü (D=1,0 m)

$$F_Z = 20.1.1,5 = 30 \text{ kN/m}$$

Zemin taşıma kapasitesi, (B=1,0 m)

$$F_C = \left( N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_\gamma \gamma_s B \right) B = \left( 22,46.20.1,5 + \frac{1}{2} 19,13.20.1 \right) 1 = 865,1 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur. Buluna bu değerler aşağıda yerine yazılırsa,

$$\sum F_V = F_C + F_W + F_Z - F_B \geq 0 \rightarrow 0,452 + 2,436 + 30 - 0,532 = 32,888 > 0 \text{ Uygundur.}$$

Ayrıca,

$$F_B \leq \frac{F_C + F_W + F_Z}{G_s} \rightarrow 0,532 < \frac{32,888}{1,5} = 21,925 \text{ kN/m Uygundur.}$$

$$F_C \geq G_s F_V \rightarrow 865,1 > 1,5.32,888 = 49,332 \text{ kN/m Uygundur.}$$

### **Zemine Gömülü Boru Baş Kısmı İçin Yatay Stabilite Analizi:**

Deniz tabanında gömülü bir boruya yatay hareket ettirecek bir kuvvet yoktur. Sürtünme kuvveti sistemi yeterince stabil kılmaktadır. Sürtünme kuvveti, kohezyonsuz zeminler için,

$$F_S = F_V \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) = 32,888. \tan(15) + \frac{1}{2} 20.(1,5)^2 \tan^2(60)$$

$$F_S = 76,312 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Bu şekilde serbest döşenmiş borunun baş kısmı stabildir.

Zemine gömülü kademeli difüzör için tespit kitlesine gerek yoktur. Eksenel yükleri zemin boyunca sürtünme kuvveti taşıyacaktır. Ancak bu çalışmada boru 30,0—30,0—45 m olarak 3 açıklık halinde mesnetler konularak sistem çözülecektir. Dinamik analiz ise en büyük açıklık için yapılacaktır. En büyük açıklık borunun uç kısmı olan 9 çıkışlık kısmı içine almaktadır. Toplam eksenel yük Çizelge 6.2.2. de hesaplanmıştır. Buna göre,  $N = 211,589$  kN bu tekil yük boru boyunca yayılırsa,

$F_A = 211,529 / 105 = 2,015$  kN/m olarak bulunur. Kademeli boru için bulunan  $F_S$  kuvvetleri bu değerden büyük olduğu için boru eksenel doğrultuda stabildir.

### 6.2.3. Dinamik Analiz

#### 6.2.3.1. Düşey Düzlemde Dinamik Analiz

Kademeli değişen kesitli borunun zemine gömülü halde birim boyuna etkiyen toplam düşey dış kuvvet, borunun kendi ağırlığı, deliklerden çıkan dinamik impuls—momentum kuvvetleri, hidrostatik kaldırma kuvveti ve boru üzerindeki zemin ağırlığından gelen kuvvetin tesiriyle konumla ve zamanla değişen bir kuvvet olmaktadır. Pozitif yön kabulü olarak yukarı yönü pozitif kabul edersek ( $\uparrow +$ ) toplam kuvvet,

$$F_{Top}(x,t) = F_B(x) - F_W(x) - F_Z(x) - F_C(t)$$

olmaktadır.

Sistem üç kademedan oluşmaktadır. Buna göre kütle ve atalet 3 kısımda incelenecektir. Boru içindeki akışkan boru ile aynı hareketi yapacağından ( $m = \rho_b A_b + \rho_0 A_0$ ), kütleler,

$$m_1 = \rho_b \frac{\pi}{4} (D_1^2 - (D_1 - 2s)^2) + \rho_0 \frac{\pi}{4} (D_1 - 2s)^2 = 0,412$$

$$m_2 = \rho_b \frac{\pi}{4} (D_2^2 - (D_2 - 2s)^2) + \rho_0 \frac{\pi}{4} (D_2 - 2s)^2 = 0,304$$

$$m_3 = \rho_b \frac{\pi}{4} (D_3^2 - (D_3 - 2s)^2) + \rho_0 \frac{\pi}{4} (D_3 - 2s)^2 = 0,211$$

Atalet momenti terimleri ise,

$$I_1 = \frac{\pi}{64} \left( D_1^4 - (D_1 - 2s)^4 \right) = 8,10 \cdot 10^{-4}$$

$$I_2 = \frac{\pi}{64} \left( D_2^4 - (D_2 - 2s)^4 \right) = 4,62 \cdot 10^{-4}$$

$$I_3 = \frac{\pi}{64} \left( D_3^4 - (D_3 - 2s)^4 \right) = 2,33 \cdot 10^{-4} \text{ şeklindedir.}$$

### **Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Tanımlanması**

Sistemin dış yük etkileri altında yapacağı deplasmanın başlangıç eğrisi (elastik eğrisi) sap2000 programında ön yükleme yapıp yükleme etkisinde vermiş olduğu düşey deplasmanlardan yararlanarak eğri uydurma metodu ile elde edilmiştir.  $\{\psi : 0, 1\}$

$$\psi(x) = 2,671 \sin(0,12x + 2,015) + 1,772 \sin(0,261x + 0,241) + 3,691 \sin(0,175x - 2,266)$$

Düşey dinamik dış yük ( $F_V(x, t)$ ) teriminin varlığıyla salınım yapan sönümsüz sistemde uygulama verileri yerine yazılarak bulunan, genel kütle ( $m^*$ ) ve genel rijitlik ( $k^*$ ) terimleri; burada zemin yay katsayısı  $k_y(x)$  konumla değişen zemin yay katsayısıdır.

$$m^* = m_1 \int_0^{L/3} \psi(x)^2 dx + m_2 \int_{L/3}^{2L/3} \psi(x)^2 dx + m_3 \int_{2L/3}^L \psi(x)^2 dx = 7,09$$

$$k^* = \int_0^L k_y(x) \psi(x)^2 dx + E_b \left( I_1 \int_0^{L/3} \psi''(x)^2 dx + I_2 \int_{L/3}^{2L/3} \psi''(x)^2 dx + I_3 \int_{2L/3}^L \psi''(x)^2 dx \right)$$

$$k^* = 60452$$

olarak bulunur. Tedrici değişken boruda  $N_n$  değerlerini her bir delik hizası için hesaplayan bağıntı,

$N_n = P_n A_n + \rho_0 Q_n V_n - P_{n+1} A_{n+1} - \rho_0 Q_{n+1} V_{n+1}$  dir. Bu bağıntıya göre hesaplanan  $N_n$  değerleri çizelge 6.11 de verilmişti. Eksenel kuvvet  $x=0$  maksimum olur ve her bir delik hizasında

azalarak  $x=45$  m de sıfırlanmaktadır. Kuvvet yönü sola doğru pozitif kabul edilirse ( $\leftarrow +$ ) eksenel kuvvet çekme olduğu için  $-N(x)$  olacaktır. Buna göre,

$$k_G^* = \int_0^L -N(x)\psi'(x)^2 dx = -6,938 \text{ ve}$$

$$\overline{k^*} = k^* - k_G^* = 60452 + 6,938 = 60458,938 \text{ olarak bulunur.}$$

Düşey yönde etkiyen dış kuvvet terimlerinden biri olan difüzör çıkış kuvveti su yüzeyinin değişiminden zamanla değişen deniz taban basıncı bu kuvvetin de zamanla değişen bir kuvvet haline getirir. Boru zemine gömülü olduğu için derinliğe bağlı ilave basınçta dikkate alınarak Difüzör çıkış basıncı zamanla değişen formda

$$P'_D = 4,51 \cdot \cos(-0,785t) + 262,015 \text{ kN/m}^2 \text{ olarak bulunmuştur}$$

Bir delik için bulunan difüzöre çıkış kuvveti ise,

$$F_\zeta(t) = P'_D(t) \cdot a_\zeta + \rho_a \cdot q_\zeta \cdot V_\zeta \text{ bağıntısından,}$$

$$F_\zeta(t) = (4,51 \cdot \cos(-0,785t) + 262,015) \cdot 0,00785 + 0,999 \cdot 0,0358 \cdot 4,56$$

$$F_\zeta(t) = 0,035 \cos(-0,785t) + 2,22 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Dalga boruya dik geldiği için aynı zamanda bütün çıkış kuvvetleri birbirine eşittir. Buna göre genelleştirilmiş her bir difüzör çıkış kuvveti,

$$F_\zeta^*(t) = \sum F_{\zeta,i}(t) \cdot \psi_i(x) \text{ bağıntısından hesaplanırsa,}$$

$$F_\zeta^*(t) = 0,227 \cos(-0,785t) + 14,435 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Konumla değişen hidrostatik kaldırma kuvveti her üç kademe için,

$$F_{B,1} = \gamma_a \frac{\pi}{4} D_1^2 - \gamma_0 \frac{\pi}{4} (D_1 - 2s)^2 = 0,265 \text{ kN/m}$$



$$F_{B,2} = \gamma_a \frac{\pi}{4} D_2^2 - \gamma_0 \frac{\pi}{4} (D_2 - 2s)^2 = 0,209 \text{ kN/m}$$

$$F_{B,3} = \gamma_a \frac{\pi}{4} D_3^2 - \gamma_0 \frac{\pi}{4} (D_3 - 2s)^2 = 0,157 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur.

Genelleştirilmiş hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_B^* = \int_0^{L/3} F_{B,1} \psi(x) dx + \int_{L/3}^{2L/3} F_{B,2} \psi(x) dx + \int_{2L/3}^L F_{B,3} \psi(x) dx = 6,536 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Her bir kademe için boru ağırlığından gelen kuvvet ise,

$$F_{W,1} = \gamma_b \frac{\pi}{4} (D_1^2 - (D_1 - 2s)^2) = 1,452 \text{ kN/m}$$

$$F_{W,2} = \gamma_b \frac{\pi}{4} (D_2^2 - (D_2 - 2s)^2) = 1,206 \text{ kN/m}$$

$$F_{W,3} = \gamma_b \frac{\pi}{4} (D_3^2 - (D_3 - 2s)^2) = 0,960 \text{ kN/m}$$

Genelleştirilmiş halde ise,

$$F_W^* = \int_0^{L/3} F_{W,1} \psi(x) dx + \int_{L/3}^{2L/3} F_{W,2} \psi(x) dx + \int_{2L/3}^L F_{W,3} \psi(x) dx = 37,739 \text{ kN}$$

olarak bulunur

Her bir kademe için boru üzerindeki zemin ağırlığından gelen kuvvet ise,

$$F_{Z,1} = \gamma_b \frac{\pi}{4} (D_1^2 - (D_1 - 2s)^2) = 16,8 \text{ kN/m}$$

$$F_{Z,2} = \gamma_b \frac{\pi}{4} (D_2^2 - (D_2 - 2s)^2) = 15,0 \text{ kN/m}$$

$$F_{Z,3} = \gamma_b \frac{\pi}{4} (D_3^2 - (D_3 - 2s)^2) = 12,8 \text{ kN/m}$$

Genelleştirilmiş halde ise,

$$F_Z^* = \int_0^{L/3} F_{Z,1} \psi(x) dx + \int_{L/3}^{2L/3} F_{Z,2} \psi(x) dx + \int_{2L/3}^L F_{Z,3} \psi(x) dx = -469,0 \text{ kN}$$

olarak bulunur

Buna göre genelleştirilmiş zamanla değişen düşey düzlemdeki toplam dinamik dış kuvvet,

$$F_{Top}^*(t) = 6,536 - 37,739 - 469,0 - 0,227 \cos(-0,785t) - 14,435 \text{ kN}$$

Dış kuvvetleri düzenlersek,

$$F_{Top}^*(t) = -0,227 \cos(-0,785t) - 514,638 \text{ kN}$$

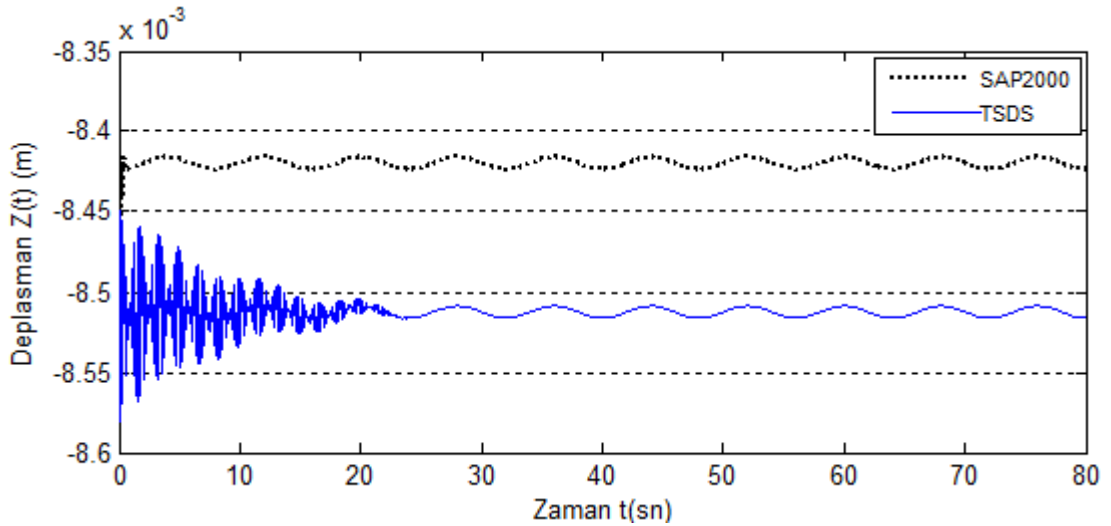
Bulunan bu değerler hareket denkleminde yerine yazılırsa,

$$7,09 \cdot \ddot{Z}(t) + 60458,938 \cdot Z(t) = -0,227 \cos(-0,785t) - 514,638$$

Bulunan bu hareket denklemi EK 2.b' de verilen bilgisayar programı ile başlangıç şartları olarak  $t=0$  da deplasmanlı ve hızsız olduğu,

$$t=0 \Rightarrow Z(0)=0 \quad \text{ve} \quad t=0 \Rightarrow \dot{Z}(0)=0$$

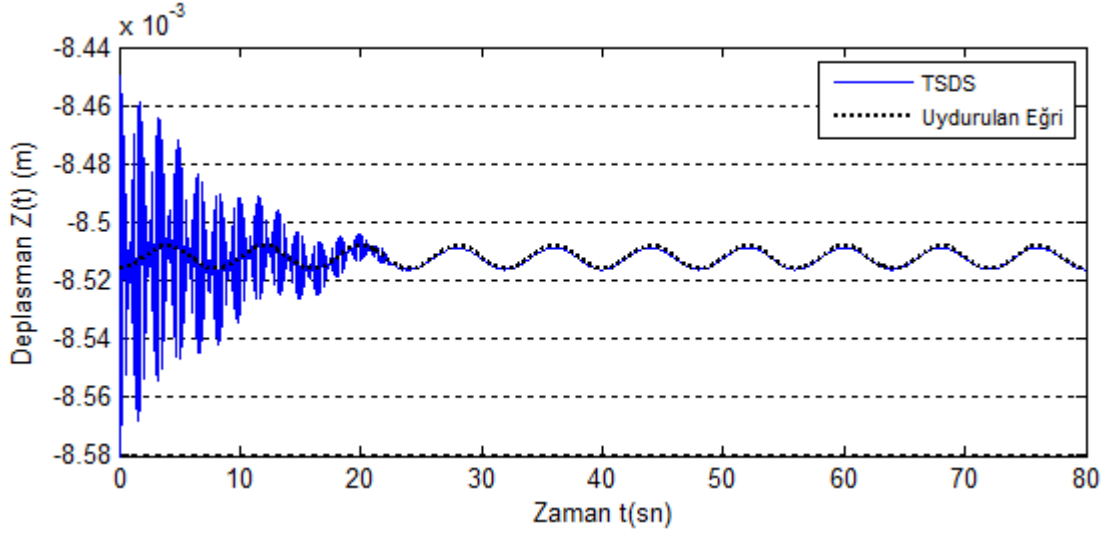
kabul edilip çözüm yapılırsa aşağıdaki deplasman zaman grafiği elde edilir.



Şekil 6.13 TSDS ile SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması

TSDS ile yapılan analiz ile SAP2000 programı ile yapılan analiz karşılaştırılmış ve sonuçların uyumluluğu şekil 6.13 de gösterilmiştir.

Sistemin salınım hareketi yaklaşık 20 sn den sonra belirli bir genliğe inerek devam etmektedir. Sistemin salınım denklemleri belirlenirken TSD sistemin salınımı dikkate alınmış ve aşağıdaki grafikte de görüldüğü gibi Deplasman–Zaman eğri denklemleri eğri uydurma metodu ile belirlenmiştir.(Şekil 6.14)



Şekil 6.14. Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması

Deplasman zaman grafiği bulunan difüzörün deplasman zaman denklemleri eğri uydurma metodu ile bulunursa denklem aşağıdaki halini alır.

$$Z(t) = -8,512 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-6} \sin(0,785t - 1,6)$$

Bulunan zamanla değişim terimi konumla değişim terimi ile çarpılırsa sistemim konumla ve zamanla değişen deplasman denklemleri olan  $v(x,t)$  elde edilmiş olur. Buna göre,

$$v(x,t) = \psi(x)Z(t)$$

$$v(x,t) = (2,671 \sin(0,12x + 2,015) + 1,772 \sin(0,261x + 0,241) + 3,691 \sin(0,175x - 2,266)) \times (-8,512 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-6} \sin(0,785t - 1,6))$$

Sonuç olarak sistemin deplasman zaman denklemleri elde edilmiştir.

Sisteme etkiyen her bir kuvvetin yaptırdığı deplasman, SAP2000 yapısal analiz programı sonucu ile geliştirilmiş TSD sistemin sonucu ve toplam deplasmanlar arasındaki farklar olarak aşağıdaki Çizelge 6.12' de verilmiştir.

Çizelge 6.12. Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar (x=37,5 m)

	TSDS (m)	SAP2000 (m)	Fark (TSDS & SAP2000)
$F_B$	$10,81 \times 10^{-5}$	$9,27 \times 10^{-5}$	%14
$F_W$	$-6,24 \times 10^{-4}$	$-5,14 \times 10^{-4}$	%18
$F_C$	$-2,38 \times 10^{-4}$	$-2,44 \times 10^{-4}$	%2
$F_Z$	$-7,76 \times 10^{-3}$	$-6,87 \times 10^{-3}$	%11
Toplam	$-8,52 \times 10^{-4}$	$-7,54 \times 10^{-4}$	%11

Yukarıdaki çizelgede görüldüğü her iki çözüm yönteminde de birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Aradaki küçük farklar ise borunun kademeli olmasından kaynaklanmaktadır. Daha önce tedrici değişen boru ile yapılan analizde sonuçlar arasındaki farklar bu çözüme nazaran daha küçük bulunmuştu. Burada ise kesitin tedrici değil de kademeli azalması deplasman sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir. Ayrıca farklar geliştirilmiş TSD sistemin yaklaşık sonuçlar veren bir yöntem olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca başlangıçta kabul edilen kademeli difüzör elastik eğri denkleminin ne kadar doğruya yakın olursa sonuçlarında doğruya o kadar yaklaşacağı bilinmektedir. Bunun için başlangıç denklemi elde edilirken kullanılan kuvvetler ön yükleme olduğu için sistem gerçek sonuçlara yakınsak kalmakta ama kesin sonucu verememektedir.

### 6.2.3.2. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz

Zemine gömülü difüzör yapısına yatay düzlemde deplasman yapmasına neden olacak bir kuvvet bulunmamaktadır. Boru yanal yüzeyine etkiyen zemin itkileri karşılıklı olarak birbirlerini dengelemektedir. Ancak bu yanal itkiler nedeniyle dairesel boru enkesiti eliptik ovalleşme yaparak deformasyona uğrayabilir. Bu çalışmada eliptik ovalleşme durumu incelenmemiştir.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, iki tip difüzör için dinamik analiz çalışması yapılmıştır. Bunlardan biri deniz tabanına serbest oturan kesitleri tedrici değişken batık difüzörler, diğeri ise deniz tabanına gömülü olan kesitleri ise kademeli değişken difüzörlerdir. Difüzörler; iç ve dış akışkan basıncı, kendi öz ağırlığı, hidrodinamik kaldırma kuvveti, deprem, toprak kitlesi ağırlığı etkisindedirler. Stabilitate hesaplamasında deprem hariç diğer yüklerin dengesi göz önüne alınmıştır. Yüzmeyen ve durağan bir difüzör elde edebilmek için maksimum dalga kuvvetinin eşdeğer statik yük olarak alınmasıyla difüzör stabilitesi yapılmıştır. Ancak dalga kuvvetinin zamanla değişken olması ve deprem ivmesinin varlığı, stabiliteyi bozan hususlardır. Bu kuvvetler boru üzerinde yatay (akış yönünde) ve düşey (akış diki yönde) salınımlara neden olmaktadır. İlk salınım, diğesine göre daha dikkate değer büyüklükte olup batık difüzörün salınımına neden olduğundan dolayı hesaplamalarda dikkate alınmıştır.

İç akış için temel akışkanlar mekaniği bağıntıları olan süreklilik, impuls momentum ve enerji bağıntıları yardımıyla kesit değişimleri, bu bölgelerdeki momentum kuvvetleri ve çıkışlardaki su jetinden doğan reaksiyon kuvvetleri dikkate alınmıştır. Bu kuvvetlerin difüzörün rijitlik parametresi üzerine etkisi dikkate alınmıştır. Çıkış kollarına etkiyen dalga kuvvetleri dikkate alınmamıştır. Dış basınç sadece hareket denkleminin zorlayıcı dış kuvvetinin hesaplanmasında rol oynamaktadır. Tabana serbestçe oturan borularda zemin sürtünme kuvveti dikkate alınmamıştır. Gömülü borularda yanal zemin etkisi ve deprem ivmesi dikkate alınmamıştır.

Dalğanın ivmesi ve hızı, atalet kuvvetini ve sürüklenme kuvvetini doğurmaktadır. Deprem ivmesinden oluşacak kuvvetin de dalga kuvvetleri ile birlikte dış zorlayıcı kuvvet olarak alınmasıyla, difüzörün dinamik analizi Tek Serbestlik Dereceli Sistem (TSDS) olarak çözümlenme ile gerçekleştirilmiştir. Borunun hareket denklemini yazılırken biçim fonksiyonuna ihtiyaç duyulmuştur. Bu fonksiyon için yapılan kabul; iki ucundan basit mesnetli bir boru problemine benzetilen difüzörün maksimum yanal yüklemeye altında statik analizinden elde edilen elastik eğrisinin normalleştirilmesine dayanmaktadır.

Hareket denkleminin MATLAB yazılımıyla çözümlenmesi sonucunda zamanla değişen deplasman bağıntısına akabinde de bu değerlerin biçim fonksiyonu ile çarpılması sonucunda zaman ve konumla değişen difüzör deplasman bağıntısına ulaşılmıştır. Bu bağıntıya göre çizilen titreşim grafiği; SAP2000 yazılımında yer alan Zaman Tanım Alanında Çözümleme ile elde edilen grafiklerle karşılaştırılarak uyumluluğu tespit edilmiştir,

Tabana serbest oturan değişken kesitli difüzörler için yapılan çözümlerde; her iki çözüm yolu arasındaki düşey deplasman değerlerine bakıldığında toplam %10, yatay deplasmanlarda ise toplam %4 farklılık görülmüştür. Benzer işlemler gömülü borularda uygulandığında toplam %11 deplasmanlarda farklılık tespit edilmiştir. Her iki durumda da hareket denkleminin TSDS ile hesaplanmasında SAP2000 bulguları gerçeği temsil ederse gerçekte TSDS arası deplasman farklılığı %20 sınırının altında kalmaktadır (Clough ve Penzien,1993). Geliştirilen konum-zaman deplasman bağıntıları tolerans sınırları içinde kaldığından dolayı kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- (1) Aksoğan, S. Ve Yücel, M.(1987). Su Getirme - Kanalizasyon ve Suların Arıtılması, Cilt 2 Pimaş Yayınları, Yayın No.9.
- (2) Arceivala, S.J. (1981). Wastewater Treatment and Disposal. Marcel Dekker Inc.
- (3) Beattie, J.F., Brown, L.P. and Webb, B. (1971). Lift and Drag Forces on a Submerged Circular Cylinder. Offshore Technology Conference. Houston, Texas. April 19—21, Paper No. OTC 1358, pp. I-139 through I-328.
- (4) Benefield, L.D., Judkins, J.F. and Parr, A.D. (1984). Treatment Plant Hydraulics for Environmental Engineers. Prentice—Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey 07632.
- (5) Bowles, J. E., 1996. Foundation Analysis and Design: McGraw-Hill Companies, Inc., New York, USA.
- (6) Brooks, N.H. (1970). Conceptual Design of Submarine Outfalls. Hydraulic Design of Diffusers. Program VII, Pollution of Coastal and Estuarine Waters, University of California.
- (7) Brooks, N.H., (1973). Dispersion in Hydrological and Coastal Environments. U.S. Environment Protection Agency. Washington D.C. 20460.
- (8) Chakrabarti, S., K. 1987, Hydrodynamics of Offshore Structures, Springer Verlag, Berlin
- (9) Chakrabarti, S., K. 1990, Nonlinear Methods in Offshore Engineering, Elsevier Science Publishers, Amsterdam
- (10) Celep, Z ve Kumbasar N. ( 2001 ). Yapı Dinamiği ( üçüncü baskı ). İstanbul: İTÜ, Rehber Matbaacılık.
- (11) Celep, Z ve Kumbasar N. ( 2004 ). Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarım ( üçüncü baskı ). Beta Dağıtım, İstanbul.
- (12) Clough, R.W. ve Penzien, J. ( 1993 ). Dynamics of Structures ( 2<sup>nd</sup> edition ). Singapore: Mc Graw—Hill, Inc.

- (13) Det Norske Veritas, 1981, Rules for Marine Pipeline Systems, Oslo
- (14) Fischer, H.B., Koh, C.Y. ve Brooks N.H., (1979). Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Pres, Inc., New York.
- (15) Grace, R.A., (1978). Marine Outfall Systems—Planning, Design and Construction. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice—hall, Inc. 600 p
- (16) Gökkuş, Ü., 1992, Deniz Boruhatlarının Teknik ve Ekonomik Optimizasyonu, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir
- (17) İnan M. (1967) Cisimlerin Mukavemeti, Birsen Yayınevi, İstanbul
- (18) Janson, L. E.(1990). Plastic Pipes of Water Supply and Sewage Disposal. Stokholm. Neste Cheminal Publication.
- (19) Karal, K. (1977). Lateral Stability of Submarine Pipelines. Offshore Technology Conference. Houston, Texas. May 2—5, Paper No. OTC 2968, pp. 71 through 78.
- (20) Lakhan, V.C., Trenhaile, A.S. 1989, Applications in Coastal Modelling, Elsevier Oceanography Series, 49, Amsterdam
- (21) Lambe, T.W. and Whitman R.W. (1969). Soil Mechanics. New York. John Wiley & Sons. 553 p.
- (22) Layton, J.A., (1976). Edsign Procedures for Ocean Outfall. Proceedings of Fifteenth International Coastal Engineering Conference. ASCE. Honolulu. Hawaii. July. Vol.4, pp. 2919—2940.
- (23) Leylek,E.İ.,(2005). Yapı Dinamiği: Depreme Dayanıklı Yapılar, Çağlayan Kitabevi, İstanbul
- (24) Machemehl, J.L., (1978). Pipelines in the Coastal Ocean. Proceeding of Pipelines in Adverse Enviroment. ASCE. New Orleans. January 15—17, Vol-I, pp. 204—221.



- (25) Öztürk İ.,(1996). Atıksu Ön Artıma ve Deniz Deşarj Sistemleri. İ.T.Ü, İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- (26) Parmakian, I. (1963). Water Hammer Analysis Dover Publications, Inc, New York.
- (27) Rawn, A.M., Bowerman, F. and Brooks, N.H., (1960). Diffusers for Disposal of Sewage in Seawater , Proc. A.S.C.E., Vol.86, pp.65-106.
- (28) Sarpkaya, T., Isaacson, M., 1981, Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold Company, New York
- (29) Sümer, B.M., Ünsal İ, ve Bayazıt, M.,(1983). Hidrolik, İ.T.Ü, İnşaat Mühendisliği bölümü, İstanbul
- (30) Sumer,B.M. and Fredsoe,J.,1997, Hydrodynamics Around Cylindrical Structures, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol.12, World Scientific, Singapore
- (31) Sumer,B.M. And Fredsoe, J. 1994, A Review on Vibrations of Marine Pipelines, Proceedings of the Fourth Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.II, April 10-15, Osaka
- (32) Şekerdağ, N. (1993). Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik Problemleri, Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü. Elazığ
- (33) Uzuner, B. A. (2006). Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, Trabzon
- (34) WPCF, ASCE, (1970). Desing and Construction of Sanitary and Storm Sewers.
- (35) Yamamoto, T., Nath, J.H. and Slotta, L.S., (1974). Wave Force on Cylinders Near Plane Boundary. Journal of the Water—ways, Harbors, and Coastal Engineering Division. ASCE. Vol.100, No.WW4. Nowember 1974. Pp.345—359.
- (36) Zienkiewicz, O.C., Lewis, R.W., Stagg, K.G. 1978, Numerical Methods in Offshore Engineering, John Wiley & Sons, New York

## EKLER

## EK 1 : Basıncılı Borular İçin Yersel Yük Kaybı Katsayıları.

Ekipman	Tip	Oran	$f$
Kelebek vanalar	Tam açık		0,3
	Kısmen kapalı	10	0,6
		30	3,6
		50	31
		60	96
Çek Valfler	Küresel (tam açık)		2,5—3,5
	İleri Geri Hareketli tip		0,6—2,3
Ani Daralma	$v_2 / v_1$	4/1	0,42
		2/1	0,33
		4/3	0,19
Dirsek(90° lik)	Düzgün Flanşlı		0,21—0,30
	Geniş Açılı Flanşlı		0,18—0,30
	Vidalı(Dar Açılı)		0,9
	Vidalı (Geniş Açılı)		0,6
Dirsek(45° lik)	Düzgün Flanşlı		0,20—0,30
	Geniş Açılı Flanşlı		0,18—0,20
	Vidalı(Normal)		0,30—0,42
Ani Genişleme	$v_2 / v_1$	4/1	0,92
		2/1	0,56
		$\frac{3}{4}$	0,19
Giriş Kayıpları	Çan Ağızlı Giriş		0,04
	Borudan Tankaya Giriş		0,50
	Kısmen Yuvarlatılmış Giriş		0,23
Sürgülü Vanalar	Tam Açık		0,19
	1/2 Kapalı		5,6
	3/4 Kapalı		24,0
Orifisler	$d_1 / d_2$	0,25	4,8
		0,50	1,0
		0,75	0,24
Çıkış Kayıpları	Çan Ağızlı Çıkış		$0,1 (v_1^2 - v_2^2) / 2g$
	Keskin Kenarlı Çıkış		$1 (v_1^2 - v_2^2) / 2g$
	Depodan Boru İle Çıkış		1
Geri Dönüş (iki adet 90° dirsekle)	Düzgün Flanşlı		0,38
	Geniş Flanşlı		0,25
	Vidalı		2,2
T 'ler	Standart 90° lik		1,80
	Farklı Çaplı $v_2 / v_1$	2/1	0,90
		4/1	0,75
Venturi metreler	$v_2 / v_1$	1/3	1,0—1,2
		$\frac{1}{2}$	0,44—0,52
		2/3	0,25—0,30
		$\frac{3}{4}$	0,20—0,23

**EK 2** : Sayısal Analiz İçin Yazılan Bilgisayar Programının Kodları.

## Ek 2.a ) Tedrici Değişen Kesitli Difüzör Çözüm Kodları

<b>Tedrici</b>	<b>Düşey</b>	<b>Program;</b>	[t,z]=ode23('tedrici',0:0.1:50,[0 0]), hold on, grid on, plot(t,z(1:size(t),1),'b'); xlabel(' Zaman t(sn)'), ylabel(' Deplasman Z(t) (m) ')
		<b>Altprogram;</b>	function mey=tedrici(t,z) FCx=.2222181*cos(-.7850000*t)+13.36484; FLx=1.1838*cos(-.7850000*t)^2; FBx=6.483568; FWx=36.84413; Ftop=-FCx+FLx+FBx-FWx; k =60.72187+5.489; m =7.451; z(3)=((Ftop)-(k*z(1)))/m; mey=[z(2);z(3)];
	<b>Yatay</b>	<b>Program;</b>	[t,z]=ode23('tedrici',0:0.1:50,[0 0]), hold on, grid on, plot(t,z(1:size(t),1),'b'); xlabel(' Zaman t(sn)') ylabel(' Deplasman Z(t) (m) ')
		<b>Altprogram</b>	function ensar=tedrici(t,z) Flx=4.300952*sin(-.7850000*t); FDx=1.1838*(cos(.7850000*t))^2; Fdep=10.21291*duzce(t,2); Ftop=FDx+Flx+Fdep; k =60404.68+5.489; m =7.451; z(3)=((Ftop)-(k*z(1)))/m; ensar=[z(2);z(3)];

## Ek 2.b ) Kademeli Değişken Kesitli Difüzör Çözüm Kodları

<b>Kademeli</b>	<b>Düşey</b>	<b>Program;</b>	[t,z]=ode23('kademeli',0:0.1:50,[0 0]), hold on, grid on, plot(t,z(1:size(t),1),'b'); xlabel(' Zaman t(sn)'), ylabel(' Deplasman Z(t) (m) ')
		<b>Altprogram;</b>	function yigit=kademeli(t,z) FBx=6.536384; FWx=37.73923; FCx=.2275809*cos(-.7850000*t)+14.43514; FZx=469.0028; Ftop=FBx-FWx-FCx-FZx; k =60450.61+6.938; m =7.094058; z(3)=((Ftop)-(k*z(1)))/m; yigit=[z(2);z(3)];