

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DENİZ BORUHATLARININ DEĞİŞİK TASARIM TİPLERİ VE
DİNAMİK MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisi İbrahim Halil ÖLMEZ

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Hidrolik

MANİSA 2013

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DENİZ BORUHATLARININ DEĞİŞİK TASARIM TIPLERİ VE
DİNAMİK MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisi İbrahim Halil ÖLMEZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Tezin Savunulduğu Tarih :

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Bekir SOLMAZ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet Ali YURDUSE

: Yrd. Doç. Dr. Tuğrul YANIK

MANİSA 2013

İÇİNDEKİLER

SEMBOL LİSTESİ	IV
ŞEKİL LİSTESİ	VII
ÇİZELGE LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ	IX
TEŞEKKÜR	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. DALGA HAREKETİ.....	3
2.1. Lineer Teori.....	3
2.2. Derinlik Sınıflamalarına Göre Dalga Hareketi.....	8
2.3. Dalga Kuvvetleri.....	9
2.3.1. Sürüklenme Kuvveti	9
2.3.2. Atalet Kuvveti.....	9
2.3.3. Hidrodinamik Kaldırma Kuvveti.....	10
2.3.4. Hidrodinamik Kuvvet Katsayılarının Seçimi.....	11
3. GENELLEŞTİRİLMİŞ TEK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEM	12.
4.0. STABİLİTE HESABI.....	16
4.1. Boru Hatlarının Stabilizesi.....	16
4.2. Stabilizasyonu Etkileyen Kuvvetler.....	18
4.2.1. Hidrostatik Kaldırma Kuvveti.....	18
4.2.2. Boru Birim Ağırlığı.....	19
4.2.3. Zemin Yatak Taşıma Kapasitesi.....	19
4.2.4. Sürtünme Kuvveti.....	20
4.2.5. Pasif Zemin Direnci.....	21
4.2.6. Ayrılma Direnci.....	21
4.3. Zemin Yatak Katsayısı.....	22
4.4. Yatay ve Düşey Stabilitate Hesabı.....	24
5. UYGULAMA.....	26
5.1. Askıdaki Deniz Borularının Dinamik Analizi.....	27

5.1.1. Deniz Taban Hız ve İvmelerinin Belirlenmesi.....	27
5.1.2. Stabilize Analizi.....	29
5.1.3. Düşey Düzlemde Dinamik Analiz.....	32
5.1.4. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz.....	35
5.2. Deniz Tabanına Serbest Oturan Boruların Dinamik Analizi.....	40
5.2.1. Deniz Taban Hız ve İvmelerinin Belirlenmesi.....	40
5.2.2. Stabilize Analizi.....	42
5.2.3. Düşey Düzlemde Dinamik Analiz.....	45
5.2.4. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz.....	50
5.3. Zeminde Gömülü Döşenmiş Boruların Dinamik Analizi.....	55
5.3.1. Stabilize Analizi.....	55
5.3.2. Düşey Düzlemde Dinamik Analiz.....	57
5.3.3. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz.....	61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR.....	64
EKLER.....	68

SEMBOL LİSTESİ

A	: Boru enkesit alanını,(m^2)
B	: Borunun zemine oturan kısmının genişliği,(m)
B_p	: Plaka genişliği (veya çapı),(m)
B_t	:Temel genişliğini,(m)
C	: Zemin kohezyon oranı,
C_b	: Boru cinsine bağlı boyutsuz katsayı
C_D	: Boyutsuz sürüklenme katsayısı,
C_I	: Boyutsuz atalet katsayısı,
C_L	: Boyutsuz hidrodinamik kaldırma katsayısı
D	: Boru dış çapı,(m)
D_m	: Borunun ortalama çapı, (m)
E_b	: Boru malzemesi elastisite modülü (kN/m^2)
E'	: Zemin reaksiyon modülü, (kN/m^2)
E_w	: Suyun elastisite modülü,(kN/m^2)
F	: Kuvveti,(kN)
F_A	: Eksenel kuvveti,(kN)
F_B	: Hidrostatik kaldırma kuvveti, (kN/m)
F_C	: Zemin yatak taşıma kapasitesi, (kN/m)
F_D	: Sürüklenme kuvveti,(kN/m)
F_H	: Toplam yatay kuvveti,(kN/m)
F_I	: Atalet kuvveti,(kN/m)
F_L	: Hidrodinamik kaldırma kuvveti,(kN/m)
F_S	: Birim sürtünme kuvvetini,(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)
I	: Boru Enkesit atalet momenti,(m ⁴)
K_y	: Boru yataklama sabiti,(kN/m ³)
L	: Boru hattı açıklık uzunluğunu,(m)
N	: Eksenel kuvveti,(kN)
N_c, N_q, N_γ	: Zemin yatak kapasite faktörleri,
Q	: Debi,(m ³ /sn)
U	: Boru dışı akışın hızı,(m/sn)
$\dot{U}$	: Boru dışı akışın ivmesi,(m/sn ²)
Z	: Zamanla ifade edilen titreşim fonksiyonu,(m)
Z_0	: Deplasman genliği,(m)
α	: Zemin yüzeyssel sürtünme açısı,(Derece)
α_c	: Sönüm katsayısı,
c	: Sönümü,(kN.sn/m)
c^*	: Genelleştirilmiş sönümü,(kN.sn/m)
g	: Yerçekimi ivmesi,(m/sn ²)
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 ³)
k_s	: Yatak katsayısı,(kN/m ³)
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	: Sabit,
r_m	: Ortalama boru yarıçapı,(m)
s	: Boru et kalınlığı,(m)
t	: Zaman, süre(sn)

$u, \dot{u}$: Su partikülünün akış yönünde hızı, (m/sn) ve ivmesi, (m/sn²)

x : Konum, (m)

z : Boru hattının zemin yüzeyinden olan uzaklığı, (m)

$\sum \vec{F}$: Bir m kütlesine etkiyen kuvvetlerin toplamı, (kN)

ρ_d : Deniz suyu yoğunluğu, (t/m³)

ρ_b : Boru malzemesi yoğunluğu, (t/m³)

ρ_a : Boru içi akışkan yoğunluğu, (t/m³)

γ_a : Akışkan birim hacim ağırlığı, (kN/m³)

γ_d : Deniz suyu birim hacim ağırlığı, (kN/m³)

γ_s : Zemin birim hacim ağırlığını, (kN/m³)

γ_b : Boru birim hacim ağırlığını, (kN/m³)

ϕ : Zemin içsel sürtünme açısı, (Derece)

Φ : Hız potansiyeli,

Ψ : Akım fonksiyonu,

$\psi(x)$: Konumla ifade edilen biçim (shape) fonksiyonu, (m)

ω : Frekansı, (1/sn)

ξ : Parçacık yatay deplasmanı

δ : Düşey deformasyon (m)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1.	Deniz Boru Hattı Tasarım Tipleri.....	1
Şekil 1.2.	Zemine Gömülmeyi Engelleyici Yapılar.....	2
Şekil 1.3.	Deniz Tabanına Serbest Döşenmiş Boru.....	2
Şekil 2.1.	Lineer Dalga Parametrelerinin Genel Tanımı.....	3
Şekil 2.2.	Lineer Teoriye Göre Partikül Yörünge ve Kinematikleri.....	7
Şekil 3.1.	Genelleştirilmiş Tek Serbestlik Dereceli Sistem (TSD).....	13
Şekil 4.1.	Difüzöre Etkiyen Kuvvetler,.....	16
Şekil 4.2.	Askıdaki Deniz Borularına Etkiyen Kuvvetler	17
Şekil 4.3.	Deniz Tabanına Serbest Oturan Borulara Etkiyen Kuvvetler.....	17
Şekil 4.4.	Zemine Gömülü Deniz Borularına Etkiyen Kuvvetler.....	18
Şekil 4.5.	Yatak Katsayısının Tanımı ve Bir Yayla Olan Benzeşimi.....	23
Şekil 5.1.	Deniz Boru Hattı (Askıda).....	27
Şekil 5.2.	Askıda Dizayn Edilmiş Deniz Boru Hattı.....	29
Şekil 5.3.	TSD Sistem İle Elde Edilen Deplasman Zaman Grafiği.....	35
Şekil 5.4.	Dalga Kuvveti Etkisinde Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	37
Şekil 5.5.	Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması.....	38
Şekil 5.6.	Deniz Boru Hattı (Tabana Serbest Oturan).....	40
Şekil 5.7.	Deniz Tabanına Serbest Oturan Boru Hattı.....	42
Şekil 5.8.	TSD Sistem İle SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	48
Şekil 5.9.	Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması.....	48
Şekil 5.10.	Dalga Kuvveti Etkisinde Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	52
Şekil 5.11.	Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması.....	53
Şekil 5.12.	Deniz Boru Hattı (Zemine Gömülü).....	55
Şekil 5.13.	Deniz Tabanında Zemine Gömülü Tasarlanmış Boru Hattı.....	55
Şekil 5.14.	TSD Sistem ile Elde Edilen Deplasman–Zaman Grafiği.....	60

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1.	Özetle Lineer Dalga Teorisi Dalga Karakteristikleri.....	8
Çizelge 2.2.	C_I , C_D , C_L Sabitleri İçin Tavsiye Edilen Değerler.....	11
Çizelge 4.1.	Zemin Cinsine Göre Tipik Yatak Katsayısı Değerleri.....	24
Çizelge 5.1.	Deniz Borusunun Kesit ve Özellikleri.....	26
Çizelge 5.2.	Deniz Parametreleri.....	26
Çizelge 5.3.	Zemin Parametreleri.....	26
Çizelge 5.4.	Serbest Oturan Boruya Etkiyen Maksimum Hız ve ivme değerleri.....	29
Çizelge 5.5.	Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ($x=L/2$).....	35
Çizelge 5.6.	Yatay Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ($x=L/2$).....	39
Çizelge 5.7.	Serbest Oturan Boruya Etkiyen Maksimum Hız ve ivme değerleri.....	42
Çizelge 5.8.	Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ($x=L/2$ m).....	49
Çizelge 5.9.	Yatay Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ($x=L/2$).....	54
Çizelge 5.10.	Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ($x=L/2$ m).....	61
Çizelge 6.1.	Sonuçların Karşılaştırılması.....	62

KISALTMALAR LİSTESİ

TSDS : Tek Serbestlik Dereceli Sistem

TEŞEKKÜR

Tez projem süresince çalışmalarımda bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Bekir SOLMAZ 'a en içten duygularıyla TEŞEKKÜR ederim.

ÖZET

Deniz ortamında askıda, tabana serbest oturan ve zemine gömülü boru hatlarının dinamik analizi yapılarak elde edilen sonuçlar arasında maksimum deplasmanlar bakımından bir karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan bu analizle dış etkenler bağlamında en uygun tasarım seçeneğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deniz boru hatları deniz tabanının dalgalı ve kırıklı olması durumunda veya taban derinliğinin büyük olması durumunda askıda tasarlanabilir. Askıdaki boru hatları belirli aralıklarla mesnetlenerek boru üzerindeki yükler zemine zemine aktarılır. Deniz taban durumunun düzgün olması durumunda boru hattı tabana serbest oturan şekilde tasarlanabilir. Bu şekilde döşenen boru elastik zemine oturan boru problemi mantığıyla çözülebilir. Bir diğer tasarım yöntemi olan zemine gömülü borular ise deniz ortamında boru hattına zarar verecek veya boru hattının stabilitesini etkileyecek dış etkenlerden korunmak amaçlı yapılan tasarımlardır. Yapılan bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konu hakkında giriş bilgisi verilmiş tasarım tiplerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde deniz ortamında boru hatlarına etkiyen dalda kuvvetlerinin hesap edildiği denklemlerden bahsedilmiş, sığ, orta ve derin sularda kullanılacak dalga hız ve ivme kuvvetlerinin veren bağıntılardan ve bunlardan elde edilen hidrodinamik kuvvetleri hesaplayan denklemlerden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde ise dinamik çözümde kullandığımız yöntem olan genelleştirilmiş tek serbestlik dereceli sistemden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde boru hattının stabilite hesabında kullanılacak olan kuvvetler, kuvvetleri veren bağıntılar ve bu kuvvetlerin maksimum veya minimum alabileceği eşik değerlerin hesap yöntemi gösterilmiştir. Beşinci bölümde ilk dört bölümde bahsedilen konuların pekiştirilmesi için üç ayrı tipte deniz boru hattı tasarlanmış, Genelleştirilmiş Tek Serbestlik Dereceli Sistem (TSDS) ve yapısal analiz programı ile elde edilen sonuçların uyumluluğu gösterilmiştir. Sonuçların uyumluluğundan sonra sistemin TSDS ile yapmış olduğu Deplasman-Zaman grafiğinin denklemi eğri uyurma metodu ile belirlenerek sistemin konum ve zamanla değişen deplasman denklemi elde edilmiştir. 6. Bölümde ise farklı tipte tasarlanan boru hatlarının deplasmanları karşılaştırılmış ve tasarım tiplerinde karşılaşılan sorunlar veya faydalar hakkında kısa tespitlerde bulunulmuştur. Tasarımlarda zemine gömülü boru hattının en az deplasman yaptığı ve askıda boru hattının da en fazla deplasman yaptığı tespit edilmiştir. Deniz tabanına kısmen oturan boru hattı elastik zeminde katkısıyla deplasmanı askıdaki boru hattına oranla daha az değerde çıkmaktadır. Yanal deplasman olarak da askıdaki boru hatlarının en fazla deplasman değeri verdiği belirlenmiştir. Zemine gömülü boru hatlarında yanal dış kuvvet dikkate alınmadığı için deplasman yoktur.

Anahtar Kelimeler; Deniz Boru Hattı, Dalga Kuvvetleri, Tek Serbestlik Dereceli Sistem, , Stabilite Analizi, Deniz-Boru-Zemin Etkileşimi

ABSTRACT

In this study, the maximum displacements of suspended, free standing and buried submarine pipelines obtained from dynamic analyses are compared.

In this analysis, it is aimed to determine the most appropriate design options in the context of external factors. Submarine pipelines can be suspended designed in the case of the sea bed which is fractured or wavy and in the deep water. Suspended pipelines are supported to the sea bed at certain spans to transfer the loads. These pipelines can be analysed by the logic of the pipe resting on elastic foundations.

Another method of constructing the pipelines is to bury the pipeline in to the seabed. This method is utilized to avoid the damage of external factors to the pipeline or instability of the pipeline.

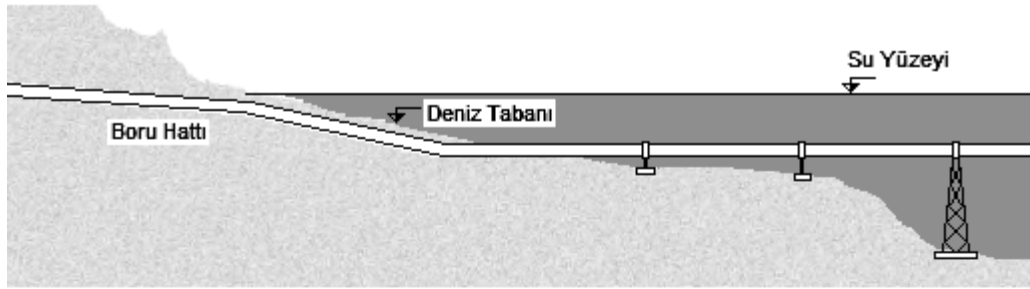
This study consists of six chapters. The first chapter is the introduction part of the study and the general idea of the study is given. The types of constructing the pipelines are discussed. In the second chapter, the calculation of the wave forces acting on the pipelines are discussed. The equations of shallow, medium and deep water wave velocities and accelerations using in calculating the wave forces are explained. The generalized single degree of freedom system that is used in this study are explained in details in third chapter. The forces utilized in calculation of stability of the pipeline, equations of those forces and the calculation of the maximum or minimum threshold values of those forces are explained in fourth chapter. In the fifth chapter, in order to consolidate the statements referred to the previous sections, three different types of pipelines are designed. The compability of the solutions obtained from generalized single degree of freedom system (GSDOF) and structural analyses program are presented. By the compability of the solutions, displacement-time values are utilized to find time and location depended equation of displacement by curve fitting method. In the last chapter, different designed pipelines are compared in terms of to maximum displacements. Brief observations are made related to problem types in desing phase.

It is seen that while buried pipelines have minimum displacement values, suspended ones have maximum displacements. Free standing pipelines have less displacement than suspended ones due to elastic sea bed. Suspended pipelines have maximum lateral displacement values. Since external forces are not taken into consideration, there aren't any displacement values occured in buried pipelines.

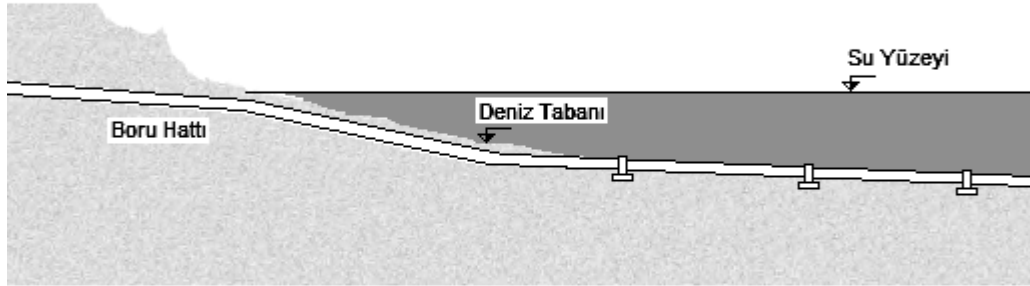
Key words; Submarine pipelines, Wave Loads, Single Degree Of Freedom System, Stability Analyses, Sea-Pipeline-Soil Interaction.

1. GİRİŞ

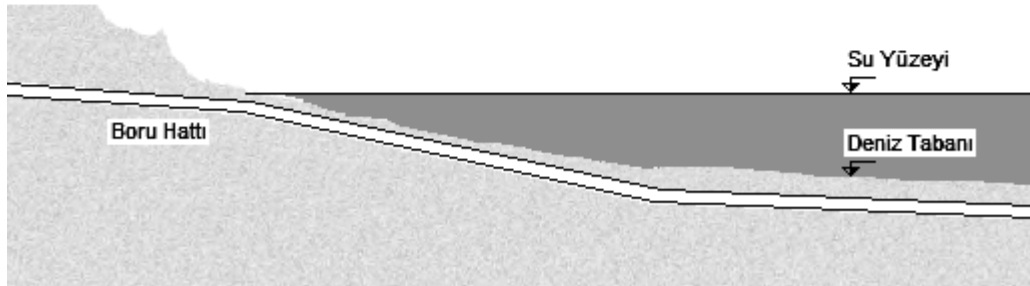
Boru hattı güzergâhında göl veya deniz ortamından geçmek gerekebilir. Bu durumda boru hattı deniz ortamından askıda, tabana serbest oturan veya zemine gömülü olarak geçilebilir.(Şekil 1.1) Deniz tabanına serbest döşenen, zemine gömülen veya askıdaki boru hattı zemine gömülme veya kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle yüzmeye ihtimaline karşı stabilite analizi yapılarak bu durumlarda gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir. Yüzme riskine karşın boru ağırlık kitleleri ile sabitlenebilir. Zemine gömülme durumda ise zemin taşıma kapasitesi artırılabilir. Aşağıdaki şekilde deniz boru hatlarının tasarım tipleri gösterilmiştir.



a) Askıdaki Dizayn Edilmiş Deniz Boru Hattı



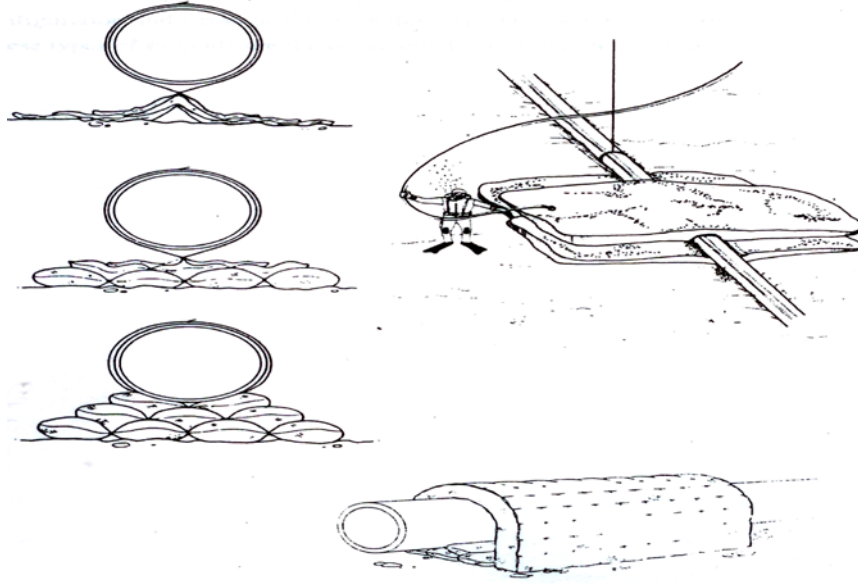
b) Deniz Tabanına Serbest Oturan Deniz Boru Hattı



c) Zemine Gömülü Deniz Boru Hattı

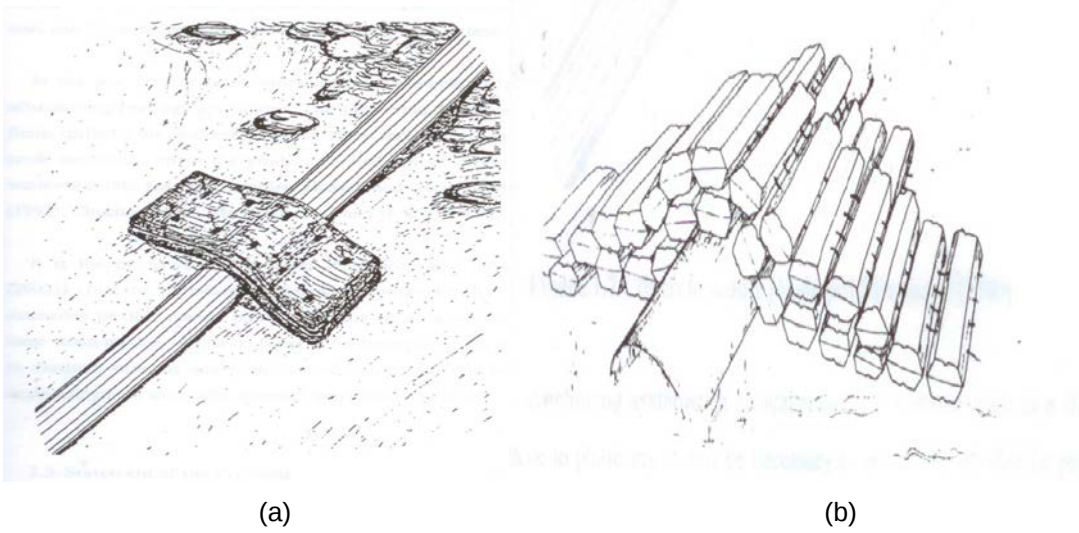
Şekil 1.1. Deniz Boru Hattı Tasarım Tipleri

Deniz tabanına serbest oturan boru hatlarının dış etkenler etkisinde stabilitesinin değişmesini engelleyici yapılar olarak şekil 1.2.'de verilen tedbirler alınabilir.



Şekil 1.2. Zemine Gömülmeyi Engelleyici Yapılar

Boru hatları deniz ortamında geçilen güzergah boyunca değişik tiplerde tasarlanabilir. Kara ortamından deniz ortamına geçişteki kısımlarda boru hattı zemine gömülü olarak geçilmesi boru hattının dış etkenlerden korunması açısından önemlidir. Zemine gömülü boru hattı deniz tabanı boyunca zemine gömülü olarak geçebileceği gibi deniz ortamında tabana serbest oturarak da devam edebilir. Ayrıca deniz ortamında derinlik veya yer şekillerinin düzensiz, dalgalı olması durumunda boru hattı mesnetler üzerinde yerden yüksekte askıda geçilebilir.



(a) (b)
Şekil 1.3. Deniz Tabanına Serbest Döşenmiş Boru.

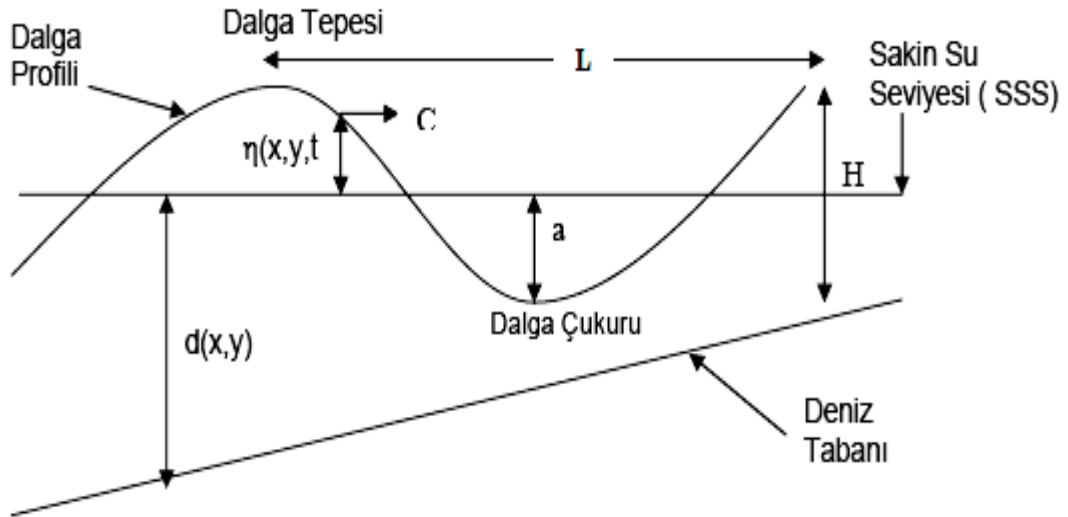
2. DALGA HAREKETİ

2.1. 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;

$$c = \frac{L}{T} \quad (2.1)$$

olarak verilebilir.



Şekil 2.1. 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.

Bir dalga hareketi genelde H,T,d ile ifade edilir ve bu değerlere bağlı olarak $L = 2\pi / k$, $T = 2\pi / kc$, $c=L/T$, $kc=w$ parametreleri elde edilir. Buradan sonra $s=y+d$ ve $\Theta = k(x - ct)$ yazılarak birinci mertebe hız potansiyeli

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \sin \Theta \quad (2.2)$$

olarak yazılabilir.

Lineer ayrılma ilişkisi

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Φ için alternatif bir form olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Phi = \frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (2.4)$$

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

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \quad (2.5)$$

yazılabilir.

Dalga boyu için de aynı şekilde;

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (2.6)$$

yazılabilir.

Denklem (2.6)'da 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. Bilgisayar programcılığının gelişmiş olduğu günümüzde basit bir kod yazımıyla kolaylıkla bu değer belirlenebilmektedir.

$$L = L_0 [\tanh(2\pi d/L_0)]^{1/2} \quad (2.7)$$

Burada L_0 derin sulardaki dalga boyudur. Verilen bir su derinliği ve periyotta, dalganın kırılmaya başladığı bir üst sınır vardır.

X yönünde akışkan parçacığı hızı;

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.8)$$

ile verilebilir.

Denklem (2.8) x'e göre diferansiyelini alırsak, akışkan parçacığının yatay hızı;

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \Theta \quad (2.9)$$

olarak yazılabilir.

Aynı şekilde akışkan parçacığının x yönündeki ivmesi;

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (2.10)$$

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 anlaşılabılır. Parçacığın deplasmanı u'nun t' ye göre integre edilmesiyle bulunabilir. İntegre edilirken integral sabiti için uygun sınır koşulu eklenmelidir.

Parçacığın yatay deplasmanı ξ ;

$$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (2.11)$$

ile verilebilir.

Burada parçacığın normal su seviyesindeki maksimum dikey deplasmanının dalga genliği olan $H/2$ 'ye eşit olduğu unutulmamalıdır. Bu durumda dinamik basınç (P) aşağıdaki gibi ifade edilir.

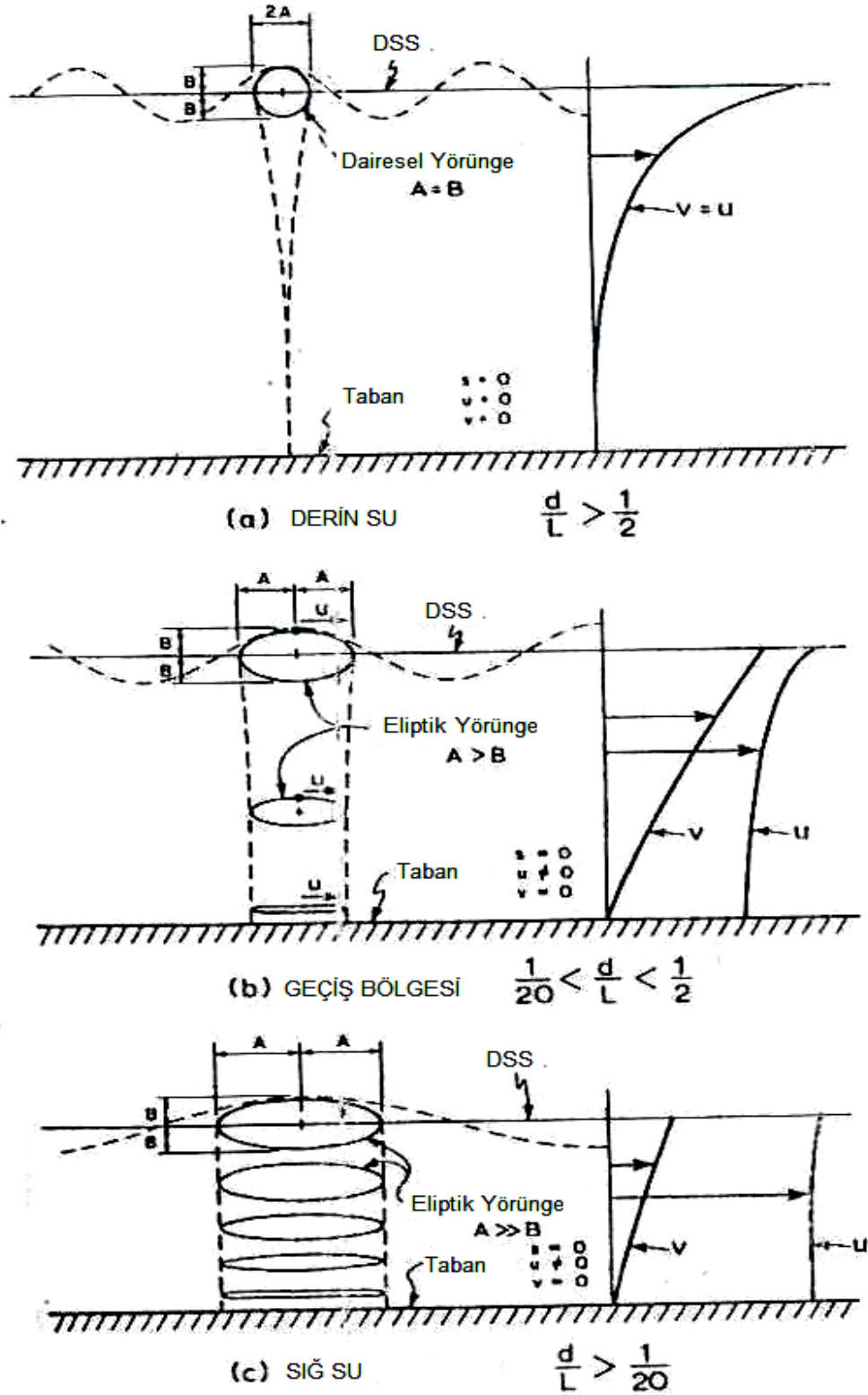
$$p = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \cos \Theta \quad (2.12)$$

2.2. 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	$\frac{d}{L} < \frac{1}{20}$	$L = T\sqrt{g.d}$

Akışkan parçacığı yörüngeleri ve hız profilleri; sığ, orta ve derin sular için Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Sığ suda u sabit (v lineerken) olduğu unutulmamalıdır. Derin sularda ise parçacık yörüngeleri daireseldir ve $u = v$ ifadesi yazılabilir. (Şekil 2.2). Lineer dalga karakteristikleri ise özetle Çizelge 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.2. Lineer Teoriye Göre Partikül Yörünge ve Kinematikleri (Chakrabarti,1987).

DERİNLİK	SİĞ 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 2.1. Özetle Lineer Dalga Teorisi Dalga Karakteristikleri (Chakrabarti,1987).

2.3. Dalga Kuvvetleri

Deniz ortamında askıda veya tabanına serbest oturan şekilde tasarlanmış boru hattına etkiyen hidrodinamik dalga kuvvetleri; sürüklenme kuvveti, atalet kuvvetini ve hidrodinamik kaldırma kuvvetidir. Askıda tasarlanan boru hatlarında boru alt kenarın yerden yüksekliği e/D oranına bağlı olarak hidrodinamik kaldırma kuvvet katsayıları değişebilmektedir. $e/D > 1/4$ ise boru hattına hidrodinamik kuvvet etkisi genel olarak sıfır kabul edilmektedir. Zemine gömülü boru hatları bu hidrodinamik kuvvetlerin tesirinden korunmuştur.

2.3.1. Sürüklenme Kuvveti

Dalgalı bir ortamda boru eksenine dik doğrultuda etkiyen su partikülleri, dalganın hızına bağlı olarak, boru üzerinde yatay sürüklenme kuvvetinin doğmasına neden olur. Bu kuvvetleri veren bağıntı ise: (Beattie, v.d., 1971), (Grace, 1978), (Yamamoto v.d., 1974)

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_a D U^2 \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir

Burada, F_D : Sürüklenme kuvvetini (kN/m),

C_D : Boyutsuz sürüklenme katsayısını,

D : Boru dış çapını (m),

U : Boru dışı akışın hızını (m/sn),

ρ_a : Deniz suyu birim hacim yoğunluğunu, (t/m^3)

göstermektedir.

Boyutsuz sürüklenme katsayısı olarak alınabilecek değeri değişik kaynaklarda belirtilmiştir. Bu kaynaklar ve genel durumda alınabilecek ifade Çizelge 2.2 de verilmiştir.

2.3.2. Atalet Kuvveti

Dalgalı bir ortamda boru eksenine dik doğrultuda etkiyen su partikülleri, dalganın ivmesine bağlı olarak, boru üzerinde yatay atalet kuvvetinin doğmasına neden olur. Bu kuvvetleri veren bağıntı ise: (Beattie, v.d., 1971), (Grace, 1978), (Yamamoto v.d., 1974)

$$F_I = \frac{\pi}{4} C_I \rho_a D^2 \dot{U} \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilmektedir

Burada, F_I : Atalet kuvvetini (kN/m),

C_I : Boyutsuz atalet katsayısını,

D :Boru dış çapını (m),

$\dot{U}$: Boru dışı akışın ivmesini, (m/sn²)

ρ_a : Deniz suyu birim hacim yoğunluğunu, (t/m³)

göstermektedir.

Boyutsuz atalet katsayısı olarak alınabilecek değeri değişik kaynaklarda belirtilmiştir. Bu kaynaklar ve genel durumda alınabilecek ifade Çizelge 2.2 de verilmiştir.

2.3.3. Hidrodinamik Kaldırma Kuvveti

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; .(Beattie, v.d., 1971), (Grace, 1978), (Yamamoto v.d., 1974)

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_a D U^2 \quad (2.15)$$

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

Burada, F_L : Hidrodinamik kaldırma kuvvetini (kN/m),

C_L : Boyutsuz kaldırma katsayısını,

D :Boru dış çapını (m),

U : Boru dışı akışın hızını (m/sn),

ρ_a : Deniz suyu birim hacim yoğunluğunu, (t/m³)

göstermektedir. Diğer büyüklükler daha önce tanımlandığı gibidir.

Boyutsuz hidrodinamik kaldırma kuvvet katsayısı olarak alınabilecek değeri değişik kaynaklarda belirtilmiştir. Bu kaynaklar ve genel durumda alınabilecek ifade Çizelge 2.2 de verilmiştir.

2.3.4. Hidrodinamik Kuvvet Katsayılarının Seçimi

Hidrodinamik kuvvet katsayıları için aşağıdaki çizelgeden genel durum dikkate alınmıştır.

Çizelge 2.2. C_I , C_D , C_L Sabitleri İçin Tavsiye Edilen Değerler (Öztürk, 1996)

Kaynak	$e/D=0$			$e/D>1/4$		
	C_I	C_D	C_L	C_I	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 2.2' de; e değeri boru hattının tabanının zemine olan mesafesini, D değeri de 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 $C_L=1$ alınabilir.

3. GENELLEŞTİRİLMİŞ TEK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEM

Deniz borusunun tek serbestlik dereceli sistemle modellenmesinin amacı deniz borusunun statik ve dinamik dış yükler etkisi altında konum ve zamana bağlı deplasmanını ($v(x,t)$) elde etmektir. Deplasman fonksiyonu konum ve zamana bağlı terimlerle ayrıştırılırsa; (Clough and Penzien,1993)

$$v(x,t) = \psi(x)Z(t) \quad (3.1)$$

bağıntısıyla izah edilebilir.

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

$Z(t)$: Zamanla ifade edilen titreşim fonksiyonunu göstermektedir.

Genelleştirilmiş Tek Serbestlik Dereceli Sistemin hareket denklemi dinamik dış yük etkisi altında; (Clough and Penzien,1993)

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + \bar{k}^* Z(t) = F_{Top}^*(t) \quad (3.2)$$

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

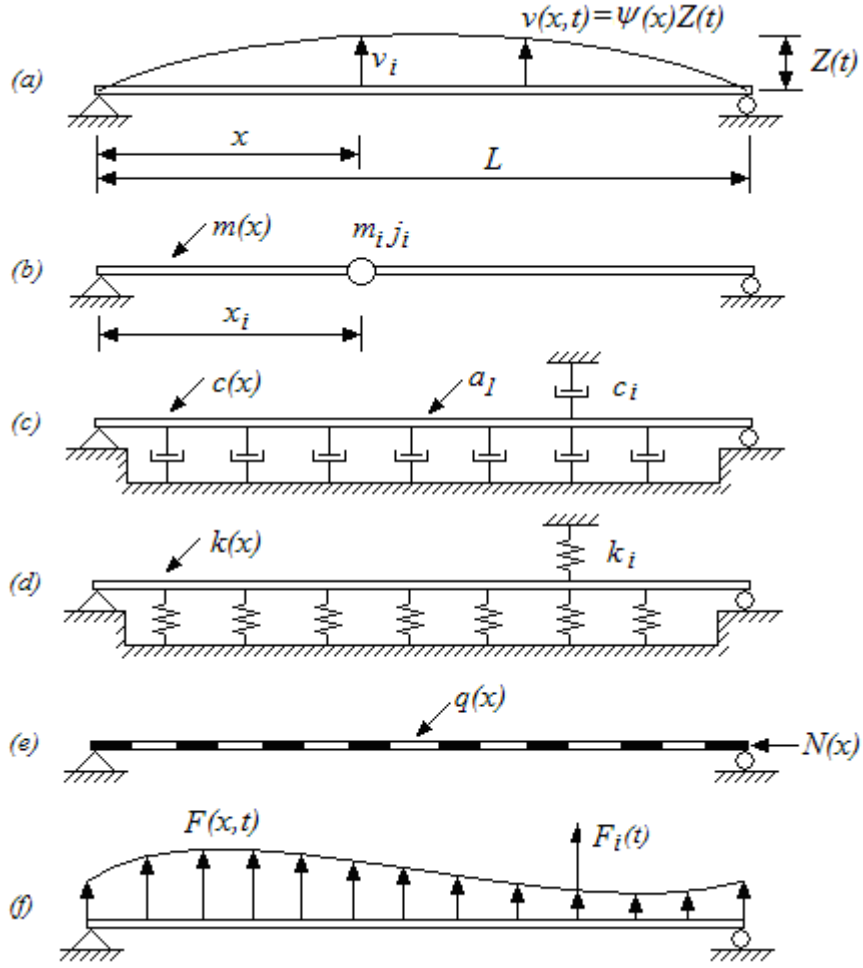
Burada, m^* : Genelleştirilmiş kütle (ton),

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

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

$F_{Top}^*(t)$: Genelleştirilmiş dinamik dış yükü (kN)

göstermektedir.



Şekil 3.1. Genelleştirilmiş Tek Serbestlik Dereceli Sistem (Clough and Penzien,1993).

Dinamik dış yük teriminin varlığıyla homjen olmayan formdaki denklemde genelleştirilmiş kütle (m^*), genelleştirilmiş sönüm (c^*) ve genelleştirilmiş rijitlik (k^*) terimleri; (Clough and Penzien,1993) (Celep,1996)

$$m^* = \int_0^L m(x) \psi(x)^2 dx + \sum m_i \psi_i^2 + \sum j_i \psi_i'^2 \quad (3.3)$$

$$c^* = \int_0^L c(x) \psi(x)^2 dx + a_c \int_0^L E_b I(x) \psi''(x)^2 dx + \sum c_i \psi_i^2 \quad (3.4)$$

$$k^* = \int_0^L k_y(x) \psi(x)^2 dx + \int_0^L E_b I(x) \psi''(x)^2 dx + \sum k_{y,i} \psi_i^2 \quad (3.5)$$

$$k_G^* = \int_0^L N(x) \psi'(x)^2 dx \quad (3.6)$$

$$\overline{k^*} = k^* - k_G^* \quad (3.7)$$

formunda tanımlanmaktadır.

Burada, $m(x)$: Değişken kütle (ton),

$I(x)$: 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 boru hattına etkiyen yanal dış yükler sürüklenme atalet kuvvetidir. Genelleştirilmiş yanal dış kuvvet; (Clough and Penzien,1993) (Celep,1996)

$$F_{Top}^*(t) = \int_0^L (F_I(x,t) + F_D(x,t)) \psi(x) dx \quad (3.8)$$

eşitliğiyle ifade edilebilir

Sisteme düşey doğrultuda etkiyen toplam dış yük, boru kendi ve boru içi akışkan ağırlığı, hidrostatik kaldırma kuvveti ve hidrodinamik kaldırma kuvvetinin toplamı olacağından yatay kuvvet bağıntısı

$$F_{Top}^*(t) = -F_W^* + F_B^* + F_L^*(t) \quad (3.9)$$

İle ifade edilir.

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

Sistemin yatay düzlemdeki genel hareket denklemi,

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + \overline{k^*} Z(t) = F_D^*(t) + F_I^*(t) \quad (3.10)$$

Sistemin düşey düzlemdeki genel hareket denklemi,

$$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + \overline{k^*} Z(t) = -F_W^* + F_B^* + F_L^*(t) \quad (3.11)$$

bağıntıları ile ifade edilir.

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

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.12)$$

olarak ifade edilir. Bu sistemde kütle ve rijitlik genelleştirilmiş halde hesaplandığı için frekans aynı şekilde hesaplanabilmektedir. Frekansı veren bağıntı,

$$\omega^2 = \frac{k^*}{m^*} \quad (3.13)$$

şeklindedir. Denklem (3.3) ve Denklem (3.5) deki ifadeler yukarıdaki denklemde yerine yazılırsa doğal frekans:

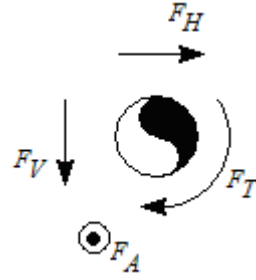
$$\omega^2 = \frac{\int_0^L E_b I(x) [\psi''(x)]^2 dx}{\int_0^L m(x) [\psi(x)]^2 dx} \quad (3.14)$$

şeklinde elde edilebilir. (Clough and Penzien,1993)

4.0. STABİLİTE HESABI

4.1. Boru Hatlarının Stabilitesi

Borunun deniz ortamında 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. Askıdaki deniz borularına etkiyen kuvvetler borunun kendi ağırlığı, hidrostatik, hidrodinamik kuvvetler ve birçok dış kuvvetler etkimektedir. Deniz tabanına serbest oturtulmuş borulara da askıdaki borulara benzer kuvvetler etkimektedir. Zemine gömülmüş bir boruya ise kendi ağırlığı, boru üzerindeki zemin yükü ve hidrostatik kaldırma kuvveti etkimektedir.



Şekil 4.1. Boru Hattına Etkiyen Kuvvetler (Jeffrey vd, 1980)

Şekil 4.1. de deniz ortamında boru hattına etkiyen kuvvetlerin bileşkesi görülmektedir.

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

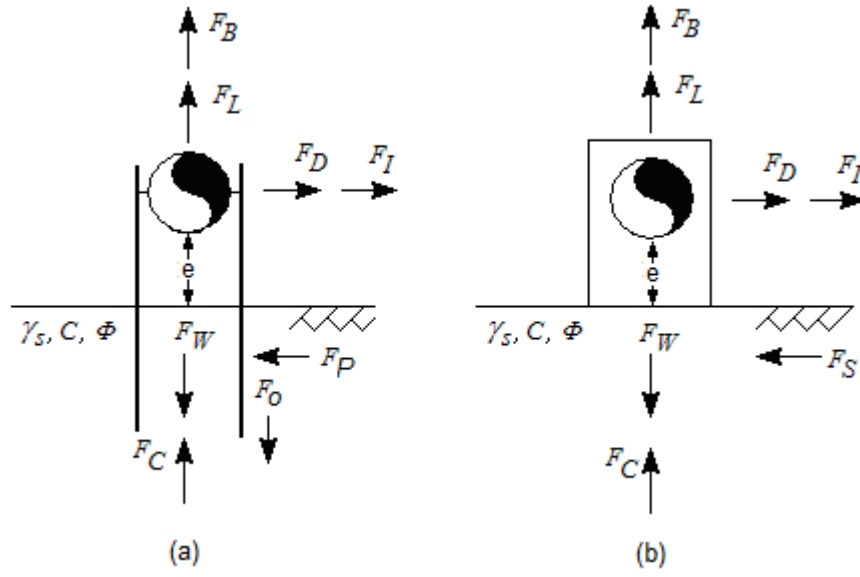
F_H : Toplam yatay kuvveti (kN/m),

F_T : Döndürme kuvvetini (kN/m),

F_V : Toplam düşey kuvveti (kN/m)

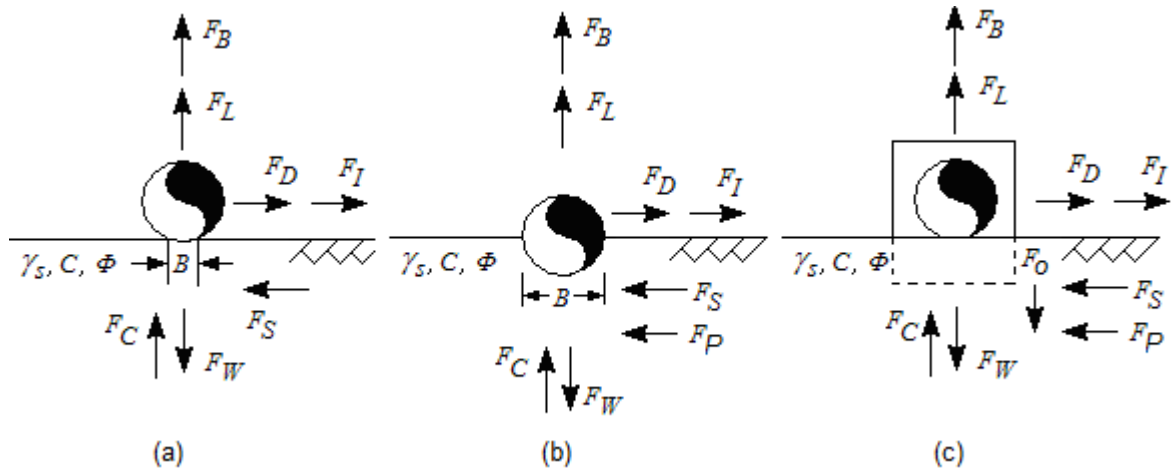
göstermektedir.

Deniz tabanında askıda tasarlanan boru hatlarında başlıca iki tip yapım yöntemi bulunur. (Şekil 4.2.a-b) Birinci tip tasarımda boru hattı zemine ankrajlarla tutturularak ayaklar üzerinde inşa edilebilmektedir. (Şekil 4.2.a) İkinci tip tasarımda ise tesbit kitleleri ile zemine mesnetlenen boru hattı askıda tasarlanabilir (Yiğit, 2010).



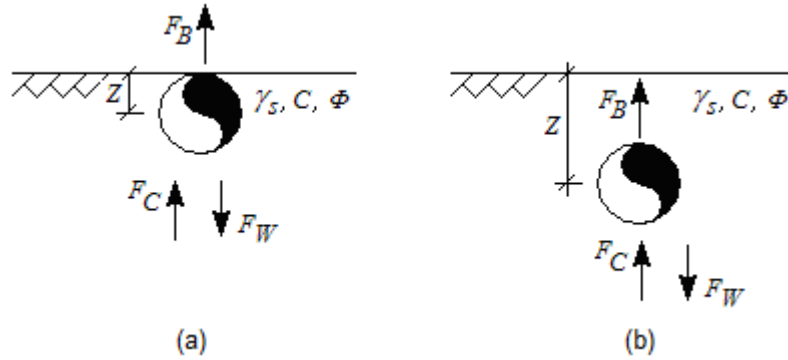
Şekil 4.2. Askıdaki Deniz Borularına Etkiyen Kuvvetler (Jeffrey vd, 1980)

Boru hatları deniz tabanına serbest oturarak da tasarlanabilir. (Şekil 4.3.a-b-c) Bu durumda boru hattı birinci tip olarak kısmen boru hattı deniz tabanına oturarak tasarlanabilir. (Şekil 4.3.a) İkinci tip olarak boru hattı borunun yarısı zemine gömülü yarısı deniz ortamında olarak tasarlanabilir (Şekil 4.3.b) Üçüncü tip ise deniz tabanına oturtulan boru boru boyunca beton vb. malzemelerle kaplanarak kompozit bir kesit elde edilerek tasarlanabilir (Şekil 4.3.c)



Şekil 4.3. Deniz Tabanına Serbest Oturan Borulara Etkiyen Kuvvetler (Jeffrey vd, 1980)

Zemine gömülü boru hatları ise iki tip olarak dizayn edilebilir.(Şekil 4.4.a-b) Birinci tip olarak boru üst kotu zemin yüzeyinin altında kalacak şekilde yüze yakın inşa edilebilir.(Şekil 4.4.a) İkinci tip olarak ta boru hattı zemin yüzeyinden belirli bir derinlikte gömülü olarak tasarlanabilir.(Şekil.4.4.b)



Şekil 4.4. Zemine Gömülü Deniz Borularına Etkiyen Kuvvetler (Jeffrey vd, 1980)

4.2. Stabilitayı Etkileyen Kuvvetler

4.2.1. Hidrostatik Kaldırma Kuvveti

Deniz ortamında buluna cisimlere içinde bulunduğu su tarafından hacmi oranınca yukarı yönlü kaldırma kuvveti etkimektedir. Bu kuvvete karşılık cisimler öz ağırlıklarından dolayı aşağı yönlü bir kuvvet oluşmaktadır. Boruya etkileyen hidrostatik kaldırma kuvvetini veren bağıntı; boru hattının birim boyuna ve boru dışına etkileyen birim kuvvet ile boru içindeki akışkandan ileri gelen birim kuvvetin farkı olarak hesaplanır.(Layton, 1976) Buna göre bağıntı,

$$F_B = \left(\gamma_a \frac{1}{4} \pi (D^2 - (D - 2s)^2) \right) - \left(\gamma_d \frac{1}{4} \pi D^2 \right) \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Burada, F_B : Hidrostatik kaldırma kuvvetini,(kN/m),

γ_a : Akışkan birim hacim ağırlığını,(kN/m³),

γ_d : Deniz suyu birim hacim ağırlığı, (kN/m³),

D : Boru dış çapını,(m),

s : Boru et kalınlığını,(m)

göstermektedir.

4.2.2. Boru Birim Ağırlığı

Deniz ortamındaki boru hatlarının yapıldığı malzeme veya boru hattını meydana getiren malzeme gruplarının ağırlıklarından dolayı yer çekimi doğrultusunda bir kuvvet oluşturmaktadır. Boru birim uzunluğunun ağırlığını veren bağıntı; boru hattının tek tip malzemeden yapılması durumunda aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır. Bu bağıntı;

$$F_w = \gamma_b \frac{1}{4} \pi (D^2 - (D - 2s)^2) \quad (4.2)$$

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

Burada, F_w : Borudan ağırlığından kaynaklanan kuvveti,(kN/m),

D : Boru dış çapını,(m),

γ_b : Boru birim hacim ağırlığını, (kN/m³) göstermektedir.

s : Boru et kalınlığını,(m)

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

4.2.3. Zemin Yatak Taşıma Kapasitesi

Üzerinde inşa edilen boru hattını taşıyan zemin ilk önce yapılan yapıyı güvenle taşıyabilmesi istenmektedir. Bu durumda zeminin gereken yapıyı taşıyıp taşıyamayacağı önceden tahkik edilmelidir. Zemin yatak taşıma kapasitesini veren bağıntı aşağıda verilen;

$$F_C = \begin{cases} \left(N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_\gamma \gamma_s B \right) B & \text{kohezyonsuz zemin için} \\ (N_C C + \gamma_s z) B & \text{kohezyonlu zemin için} \end{cases} \quad (4.3)$$

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

Burada, F_C : Zemin yatak taşıma kapasitesini,(kN/m),

γ_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_γ : Zemin yatak kapasite faktörlerini

göstermektedir.

4.2.4. Sürtünme Kuvveti

Askıdaki boru hattında mesnetlerin zemin yüzeyi ile arasındaki sürtünme kuvveti, mesnetin taban alanı ve mesnete etkiyen düşey kuvvete bağlı olarak hesaplanır. Yatay yönde sistemin hareketini engelleyen Sürtünme kuvvetini veren bağıntı:

$$F_s = \begin{cases} F_v \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) & \text{kohezyonsuz zemin için} \\ C B + \left(\frac{1}{2} \gamma_s z + 2C \right) z & \text{kohezyonlu zemin için} \end{cases} \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir.(Karal, 1977)

Burada, F_s : Birim sürtünme kuvvetini,(kN/m),

γ_s : Zemin birim hacim ağırlığını,(kN/m),

ϕ : Zemin içsel sürtünme açısını(Derece),

C : Zeminin kohezyon oranını,

B : Borunun zemine oturan kısmının genişliğini,(m),

a : zemin yüzeyel 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.

4.2.5. Pasif Zemin Direnci

Kısmen veya tamamen tabana oturan boru hatlarında, yanal pasif zemin kuvvetleri tarafından boru hattına yatay kuvvetler direnç gösterir. Bu kuvvetler aslında yanal yer değiştiren zemin kütesinin direncidir. Yanal zemin direnci aşağıdaki verildiği gibi; (Kara1, 1977)

$$F_p = \begin{cases} N_q \gamma_s z D & \text{kohezyonsuz zeminler için} \\ N_c C D & \text{kohezyonlu zeminler için} \end{cases} \quad (4.5)$$

olarak ifade edilebilir.

Burada, F_p : Birim pasif zemin direncini (kN/m),

γ_s : Zemin birim hacim ağırlığını,(kN/m),

C : Zeminin kohezyon oranını,

D : Boru dış çapını,(m),

z : Boru hattının zemin yüzeyine olan uzaklığını,(m),

göstermektedir. Diğer büyüklükler daha önce tanımlandığı gibidir.

4.2.6. Ayrılma Direnci

Her ne sebeple eğer boru hattındaki net düşey kuvvet yukarı yönlü artarsa bu yukarı yönlü kuvvet ayrılma direnci tarafından dengelenebilir. Ayrılma direnci boru hattı veya ankraj boyunca hesaplanabilir. Boru hattında ayrılma direnci yüzey sürtünmesi etkisinde aşağıdaki gibi hesaplanabilir. (Kara1, 1977)

$$F_o = \begin{cases} \left(\frac{1}{2} K P_p z_p^2 \gamma_s \tan \alpha \right) / L_p & \text{kohezyonsuz zeminler için} \\ (C P_p z_p / S_t) / L_p & \text{kohezyonlu zeminler için} \end{cases} \quad (4.6)$$

Burada, F_o : Birim ayrılma direncini (kN/m),

K : Yanal yer basınç katsayısını,

γ_s : Zemin birim hacim ağırlığını, (kN/m),

S_t : Kohezyonlu zemin duyarlılığını,

P_p : Boru çevre uzunluğunu, (m),

z_p : Gömülü boru uzunluğunu, (m),

a : zemin yüzeyssel sürtünme açısı, (Derece) ($a = \phi / 2$)

göstermektedir. Diğer büyüklükler daha önce tanımlandığı gibidir.

Ankrajlı bağlantı durumunda ise ayrılma direnci batık zemin ve ankraj ağırlığının fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi

$$F_o = W_A + \gamma_s z A_A \quad (4.7)$$

ifade edilir.

Burada, W_A : Ankraj ağırlığı, (kN/m)

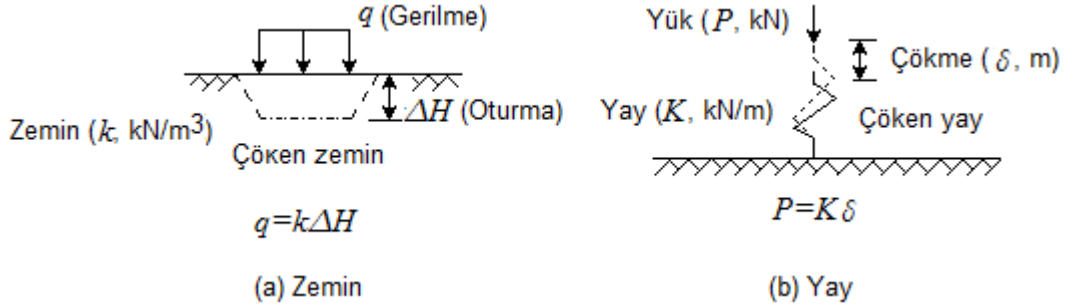
A_A : Ankraj yanal yüzey alanı, (m²)

göstermektedir. Diğer büyüklükler daha önce tanımlandığı gibidir.

4.3. Zemin Yatak Katsayısı

Yatak katsayısı k_s ; zemin üzerinde, bir noktadaki basınç (q) ile, bunun meydana getirdiği oturma (ΔH) arasında aşağıdaki gibi tanımlanır. q (kN/m²), ΔH (m), k_s (kN/m³) (Uzuner, 2006)

$$k_s = \frac{q}{\Delta H} \quad \text{veya} \quad q = k_s \Delta H, \quad (4.8)$$



Şekil 4.5. 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.),

$$k_s = k_p \frac{B_p}{B_t} \quad (4.9)$$

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

$$k_s = k_p \left(\frac{B_p + B_t}{2B_t} \right)^2 \quad (4.10)$$

kullanılır.

Burada, k_p : Plaka için yatak katsayısı, (kN/m³)

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

B_t :Temel genişliğini,(m)
göstermektedir.

Yatak katsayısı kabaca çizelgelerden de, zemin cinsine bağlı olarak alınabilir.(Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1. Zemin Cinsine Göre Tipik Yatak Katsayısı Değerleri (Bowles, 1996)

Zemin Cinsi	k_s (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

4.4. 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

$$\sum F_v = F_w - F_B - F_L \geq 0 \quad (4.11)$$

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

$$(F_B + F_L)G_S \leq F_W \quad \text{ve} \quad F_C \geq G_S F_W \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilebilir.

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

$$\sum F_H = F_D + F_I - F_S \leq 0 \quad (4.13)$$

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

$$(F_I + F_D)G_S \leq F_S \quad (4.14)$$

şeklinde ifade edilebilir.

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

$$\sum F_V < F_C \quad \sum F_H < F_S \quad (4.15)$$

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

5. UYGULAMA

Uygulama verileri;

Çizelge 5.1. Deniz Borusunun Kesit ve Özellikleri.

ρ_b (t/m ³)	γ_b (kN/m ³)	D (m)	E(kN/m ²)	s (m)	ρ_a (t/m ³)	γ_a (kN/m ³)
7,986	78,334	1.00	2,11x10 ⁸	0.01	0,999	9,08

Çizelge 5.2. Deniz Parametreleri.

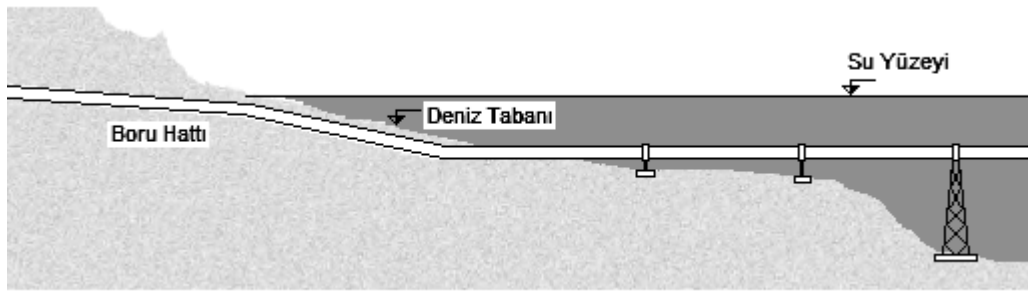
H (m)	T (sn)	d (m)	ρ_d (t/m ³)	γ_d (kN/m ³)
2,5	8	25	1,029	10,090

Çizelge 5.3. Zemin Parametreleri.

γ_s (kN/m ³)	ϕ	N_c	N_q	N_γ	B	k_y kN/m	C (kN/m ²)
20	30°	37,16	22,46	19,13	0,30	5000	20

5.1. Askıdaki Deniz Borularının Dinamik Analizi

Deniz ortamında boru hattı yapılırken taban yüzeyinin kırıklı olması veya derin çukurlar olması durumunda boru hattı kafes veya kazıklı yapılarla boru hattı askıda geçilebilir. Derin çukurların bulunduğu ortamda boru hattının tabanda inşa edilmesinin zorlaştığı durumlarda da bu şekilde boru hattı tabandan yukarda daha kolay inşa edilmesi için askıda tasarlanabilir. Şekil 5.1 de görüldüğü gibi boru hattı güzergahında karşılaşılan derin bir çukur durumunda boru hattı kafes bir mesnetle tabandan yukarda boru hattının eğimine uygun olarak geçilmiştir.



Şekil 5.1. Deniz Boru Hattı (Askıda)

5.1.1. Deniz Taban 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 ekseninin deniz tabanında yüksekliği için $s = 1,5$ m dir. Askıdaki boru hattının bulunduğu yerdeki deniz tabanı ile su yüzeyi arasındaki uzaklık değerinin uygulama için $d = 25,0$ m tespit edildiği için, boru ekseninin su yüzeyine olan uzaklığı $z = -23,5$ olarak 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,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \text{ bağıntısı kullanılarak en uygun değerin } L=93,26 \text{ m olduğu belirlenmiştir.}$$

Dalga yayılma hızı ve frekansı ise,

$$c = \frac{L}{T} = \frac{93,26}{8} = 11,66 \text{ , } \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{8} = 0,785 \text{ , } k = \frac{2\pi}{L} = \frac{2\pi}{93,26} = 0,0674$$

olarak belirlenir.

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,

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

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

$$\begin{aligned} U &= \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh(2\pi(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \cos(\Theta) \\ &= \frac{2,5}{2} \frac{9,81 \cdot 8}{93,26} \frac{\cosh(2\pi(1,5)/93,26)}{\cosh(2\pi \cdot 25/93,26)} \cos(-0,785 \cdot t) \\ &= 0,379 \cos(-0,785 t) \end{aligned}$$

İvme terimi ise

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh(2\pi(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \sin(\Theta) \\ &= \frac{9,81\pi \cdot 2,5}{93,26} \frac{\cosh(2\pi(1,5)/93,26)}{\cosh(2\pi \cdot 25/93,26)} \sin(-0,785 t) \\ &= 0,298 \sin(-0,785 t) \end{aligned}$$

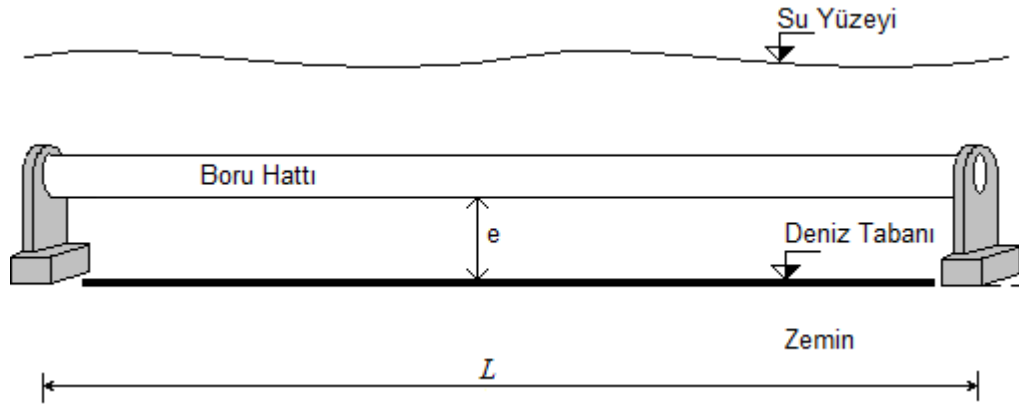
Şeklinde ifade edilir.

Çizelge 5.4. Serbest Oturan Boruya Etkiyen Maksimum Hız ve ivme değerleri

	$t=0$	$t=T/4$	$t=T/2$	$t=3T/4$	$t=T$
Hız (m/s)	0,379	0	-0,379	0	0,379
İvme (m/s)	0	-0,298	0	0,298	0

5.1.2. Stabilite Analizi

Deniz ortamında askıda dizayn edilmiş borunun stabilitesini bozan kuvvetler yatay düzlemde dalga hareketinden gelen F_L ve F_D kuvvetleridir. Düşey düzlemde ise hidrostatik kaldırma kuvveti, borunun kendi ağırlığı ve hidrodinamik kaldırma kuvvetidir.



Şekil 5.2. Askıda Dizayn Edilmiş Deniz Boru Hattı.

a-) Askıdaki Boru Düşey Stabilite Analizi:

Düşeydeki hidrodinamik kaldırma kuvveti tabana serbestçe oturan boru için, $e/D > 1/4$ olduğundan genel durum için $C_L = 0$ alınabilir bu durumda uç kısmın hidrodinamik kaldırma kuvveti,

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_d D U^2 = 0 \text{ olarak bulunur.}$$

Hidrostatik kaldırma kuvveti,

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

Boru ağırlığı,

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

Zemin taşıma kapasitesi,

$$F_C = \left(N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_\gamma \gamma_s B_T \right) B_T L_T = \left(0 + \frac{1}{2} 19,13 \times 20 \times 1,5 \right) 1,5 \times 1,5 = 645,64 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur.

Buluna bu değerler aşağıda yerine yazılırsa,

$$\sum F_V = F_W - F_B - F_L \geq 0 \rightarrow 2,436 - 0,534 - 0 = 1,902 > 0 \text{ Uygundur.}$$

Ayrıca,

$$F_B + F_L \leq \frac{F_W}{G_s} \rightarrow 0,534 + 0 < \frac{2,436}{1,5} = 1,624 \text{ Uygundur.}$$

$$F_C \geq G_s F_V \rightarrow 645,63 > 1,5 \cdot 1,902 = 2,704 \text{ Uygundur.}$$

b-) Askıdaki Boru Yatay Stabilite Analizi:

Boru hattına etkiyen yanal hidrodinamik dalga kuvvetleri,

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_d D U^2 = \frac{1}{2} (1) (1,029) (1) (0,379)^2 = 0,075 \text{ kN/m}$$

$$F_I = \frac{\pi}{4} C_I \rho_d D^2 \dot{U} = \frac{\pi}{4} (3,3) (1,029) (1)^2 (0,298) = 0,795 \text{ kN/m}$$

olarak hesaplanır. Bulunan bu yanal kuvvet boru boyu ile çarpılarak her iki mesnete aktarılacak olan yanal hidrodinamik kuvvet her bir mesnet için aşağıdaki gibi bulunur..

$$F_{I,D} = (F_I + F_D) L = (0,795 + 0,075) L = 13,05 \text{ kN}$$

Her bir mesnete etkiyen bu hidrodinamik kuvveti karşılayacak olan sürtünme kuvveti güvenle taşıyabilmelidir. Mesnetlere etkiyen toplam düşey kuvvet boru boyu ile çarpılarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$F_{V,T} = F_V \times L = 1,902 \times 15 = 28,53 \text{ kN}$$

Her bir mesnete etkiyen sürtünme kuvveti kohezyonlu zeminler için aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_S = F_{V,T} \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = 28,53 \tan(15) = 7,6445 \text{ kN}$$

Yatay düzlemde stabilite şartı,

$$\sum F_H = F_{I,D} - F_S \leq 0 \rightarrow 13,05 - 7,6445 = 5,4055 \not\leq 0 \text{ uygun değil.}$$

Sürtünme kuvveti, yatay kuvvetlere karşı direnç gösterememektedir. Bunun için sürtünme kuvvetini artırmak gerekmektedir.

Minimum sürtünme kuvveti F'_S ise;

$$F'_S \geq F_{I,D} G_S = 13,05 \times 1,5 = 19,575 \text{ kN olmalıdır.}$$

$$F'_S = F'_V \tan(a) \Rightarrow F'_V = \frac{F'_S}{\tan(a)} = \frac{19,575}{\tan(15)} = 73,055 \text{ kN olması gerekmektedir.}$$

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

$$F_{TK} = F'_V - F_{V,T} = 73,055 - 28,53 = 44,525 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Bulunan bu ilave düşey ağırlık için tekrar zemin taşıma kontrolü yapmak gerekir.

$$F_C \geq G_s F'_V \rightarrow 645,63 > 1,5 \times 73,055 = 536,047 \text{ kN}$$

Bu şekilde askıda tasarlanmış boru için tesbit kitlesi olarak mesnet noktasına $F_{TK} = 44,525$ kN'luk bir ağırlık asılmalıdır. Veya ağırlığı boru boyunca yayarak birim boy için $F_{T,K} = 44,525 / 15 = 2,968 \approx 3 \text{ kN/m}$ luk bir tesbit kitlesi konulabilir.

5.1.3. Düşey Düzlemde Dinamik Analiz

Borunun deniz tabanında birim boyuna etkiyen toplam düşey dış kuvvet, borunun kendi ağırlığı, hidrostatik kaldırma kuvvetidir. Boru hattı tabandan yeterince yüksek olduğu için hidrodinamik kaldırma kuvveti sıfır olarak bulunmuştu. Pozitif yön kabulü olarak yukarı yönü pozitif kabul edersek ($\uparrow +$) toplam kuvvet,

$$F_{Top} = F_B - F_W \text{ olmaktadır.}$$

Boru ve içindeki akışkanın salınımı aynı olacağından toplam kütle olarak alınır. Denklemi ise, $(m = \rho_b A_b + \rho_a A_a)$

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

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

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

Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Tanımlanması

Sistemin dış yük etkileri altında yapacağı deplasman-konum eğrisi (şekil fonksiyonu) iki ucu basit mesnetli boru için normalleştirilmiş halde aşağıdaki gibi alınmıştır. $\{\psi(L/2)=1\}$

$$\psi(x) = \sin\left(\pi \frac{x}{L}\right)$$

Düşey dinamik dış yük ($F_V(x,t)$) teriminin varlığıyla homojen olmayan formdaki sönümsüz sitemde uygulama verileri yerine yazılarak bulunan, genel kütle (m^*) ve genel rijitlik ($\bar{k}^*$) terimleri;

$$m^* = m \int_0^L \psi(x)^2 dx = 7,705 \text{ ton}$$

$$k^* = E_b I_b \int_0^L \psi''(x)^2 dx = 11603,48 \text{ kN}$$

olarak bulunur. Boru hattında aksenal kuvvet dikkate alınmadığı için,

$$k_G^* = \int_0^L -N(x) \psi'(x)^2 dx = 0$$

olarak bulunur. Genel rijitlik ise;

$$\bar{k}^* = k^* - k_G^* = 11603,48 \text{ kN}$$

Sisteme etkileyen birim hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_B = \gamma_d \frac{1}{4} \pi D^2 - \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D - 2s)^2 = 0,538 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur.

Genelleştirilmiş hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_B^* = F_B \int_0^L \psi(x) dx = 5,214 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Boru ağırlığından gelen kuvvet;

$$F_w = \gamma_b \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2s)^2) = 2,437 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Genelleştirilmiş boru ağırlığı ise,

$$F_w^* = F_w \int_0^L \psi(x) dx = 23,712 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Buna göre genelleştirilmiş düşey düzlemdeki toplam dış kuvvet,

$$F_{Top}^* = 5,214 - 23,712 \text{ kN olarak bulunur.}$$

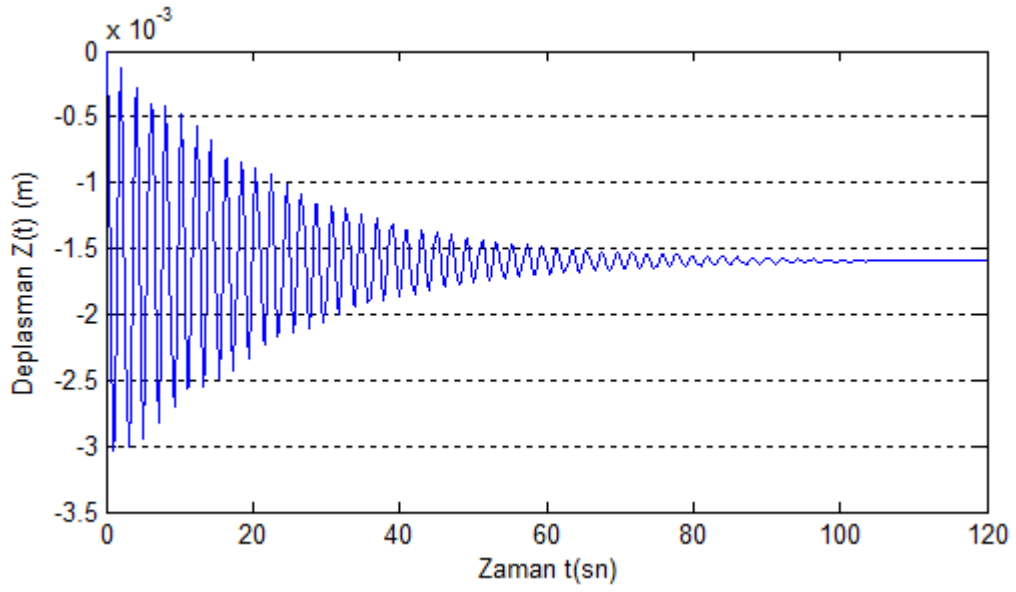
Bulunan bu değerler hareket denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$7,705 \cdot \ddot{Z}(t) + 11603,48 \cdot Z(t) = -18,498$$

Bulunan bu diferansiyel denklemi Ek1. 'de verilen bilgisayar programı ile başlangıç şartları olarak $t=0$ da deplasmansız 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 5.3)



Şekil 5.3. TSD Sistem İle Elde Edilen Deplasman Zaman Grafiği.

TSDS ile yapılan analiz Şekil 5.3. te gösterilmiştir. Sistem $Z = 1,59 \times 10^{-4}$ m civarında salınım yapmaktadır. TSDS ile SAP2000 programı aracılığı ile Zaman Tanım alanında Newmark- β metodu ile yapılan analiz sonuçları aşağıdaki Çizelge 5.5 te gösterilmiş ve arada %5 farkla yaklaşık bir sonuç bulunmuştur.

Çizelge 5.5. Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ($x=L/2$)

Kuvvet	TSDS (m)	SAP2000 (m)	Fark(TSDS&SAP2000)
F_B	$4,493 \times 10^{-4}$	$4,739 \times 10^{-4}$	% 5
F_W	$-2,044 \times 10^{-3}$	$-2,15 \times 10^{-3}$	% 5
Toplam	$-1,595 \times 10^{-3}$	$-1,676 \times 10^{-3}$	% 5

5.1.4. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz

Sistemin dış yük etkileri altında yapacağı deplasman-konum eğrisi (şekil fonksiyonu) iki ucu basit mesnetli boru için normalleştirilmiş halde aşağıdaki gibi alınmıştır. Burada hesaplanan ifadeler düşey düzlemde yapılan hesaplarla aynı yolu izlemektedir. Buna göre, $\{\psi(L/2) = 1\}$

$$\psi(x) = \sin\left(\pi \frac{x}{L}\right)$$

olarak kabul edilir. Sistemin genelleştirilmiş kütle ve genelleştirilmiş rijitlik ifadeleri ise,

$$m^* = \bar{m} \int_0^L \psi(x)^2 dx = 7,705 \text{ ton}$$

$$k^* = E_b I_b \int_0^L \psi''(x)^2 dx = 11603,48 \text{ kN}$$

$$k_G^* = \int_0^L -N(x) \psi'(x)^2 dx = 0 \quad \text{ve}$$

$$\overline{k^*} = k^* - k_G^* = 11603,48 \text{ kN}$$

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

$$U = 0,379 \cos(-0,785 t) \text{ m/s} \quad \text{ve} \quad \dot{U} = 0,298 \sin(-0,785 t) \text{ m/s dir.}$$

Bu değerlerden sürüklenme kuvveti,

$$F_D(t) = \frac{1}{2} C_D \rho_d D U^2 = 0,075 \cdot \cos(-0,785 t)^2 \text{ kN/m olarak bulunur. Genelleştirilirse,}$$

$$F_D^*(t) = F_D \int_0^L \psi(x) dx = 0,716 \cos(-0,785 t)^2 \text{ kN olur.}$$

Atalet kuvveti ise,

$$F_I(t) = \frac{\pi}{4} C_I \rho_d D^2 \dot{U} = 0,795 \sin(-0,785 t) \text{ kN/m olarak bulunur. Genelleştirilirse,}$$

$$F_I^*(t) = F_I(t) \int_0^L \psi(x) dx = 7,592 \sin(-0,785t) \text{ kN olur.}$$

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

$$F_{Top}^*(t) = F_D^*(t) + F_I^*(t) = 0,716 \cos(-0,785t)^2 + 7,592 \sin(-0,785t) \text{ kN olarak bulunur.}$$

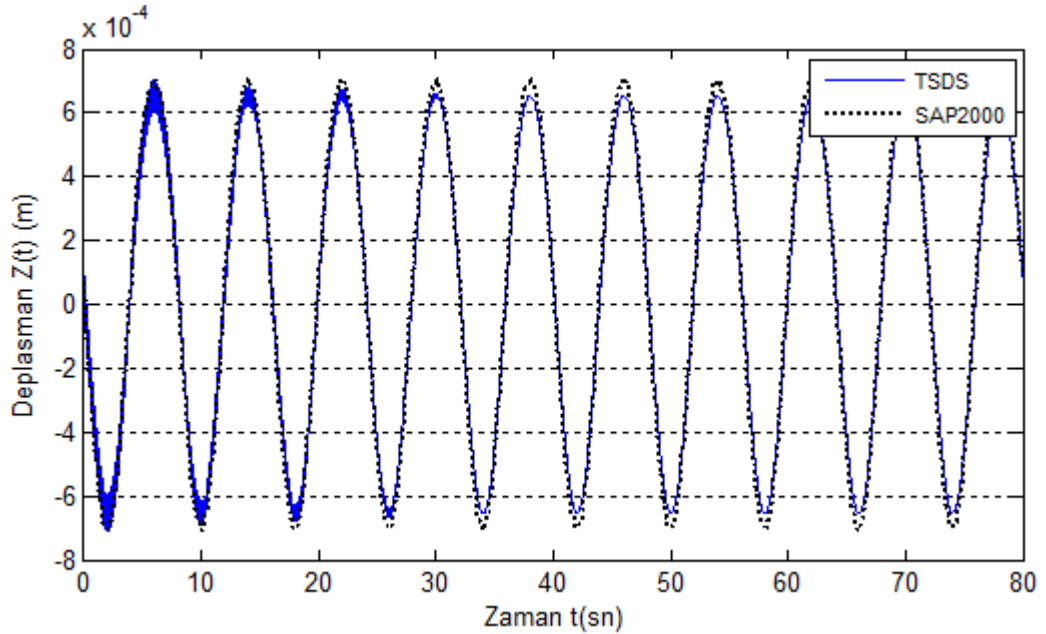
Bulunan bu değerler hareket denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$7,705.\ddot{Z}(t) + 11603,47.Z(t) = 0,716 \cos(-0,785t)^2 + 7,592 \sin(-0,785t)$$

Bulunan bu diferansiyel denklemin başlangıç şartları olarak $t=0$ da deplasman sıfır ve hız sıfır olduğu,

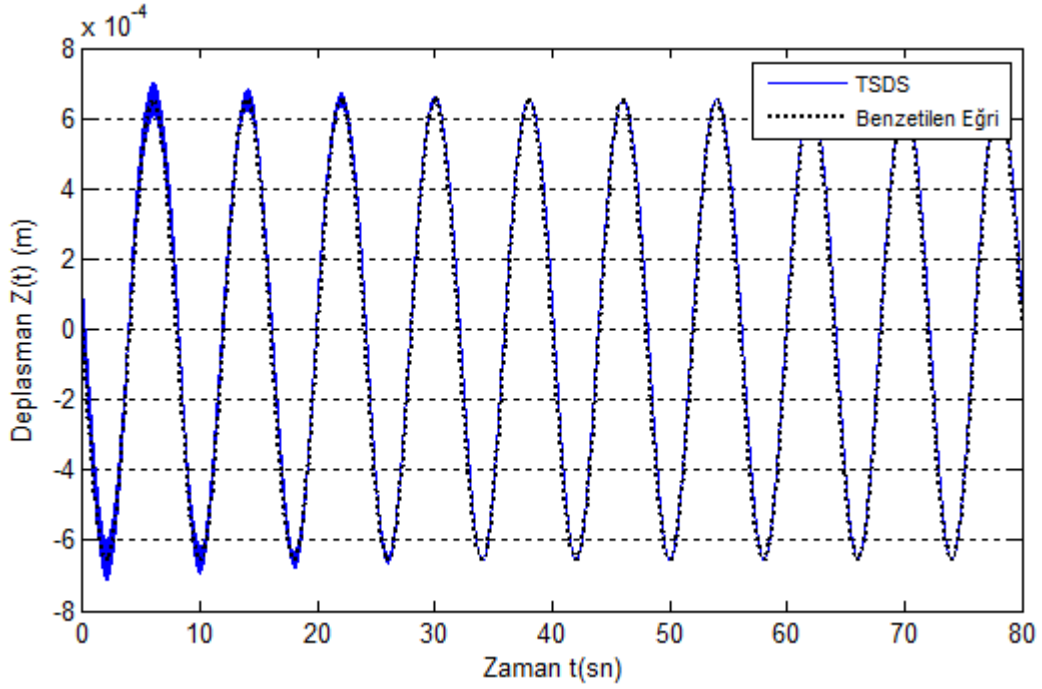
$$t = 0 \Rightarrow Z(0) = 0 \quad \text{ve} \quad t = 0 \Rightarrow \dot{Z}(0) = 0$$

kabul edilip Ek1. 'de verilen bilgisayar programı ile çözüm yapılırsa aşağıdaki deplasman zaman grafiği elde edilir.(Şekil 5.4)



Şekil 5.4. Dalga Kuvveti Etkisinde TSDS İle SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.

TSDS ile SAP2000 programı aracılığı ile Zaman Tanım alanında Newmark- β metodu ile yapılan analiz sonuçları yukarıda karşılaştırılmış ve sonuçların uyumluluğu Şekil 5.4' te gösterilmiştir. Sistemin salınım hareketi yaklaşık 30 sn den sonra belirli bir genliğe inerek devam etmektedir. Sistemin salınım denklemi belirlenirken 30 sn den sonraki genlik dikkate alınmış ve aşağıdaki grafikte de görüldüğü gibi Deplasman–Zaman eğri denklemi eğri uydurma metodu ile belirlenmiştir.(Şekil 5.5)



Şekil 5.5. Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması

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

$$Z(t) = 6,54 \times 10^{-4} \sin\left(\frac{\pi}{4}x - \pi\right)$$

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,

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

$$v(x,t) = \sin\left(\pi \frac{x}{L}\right) \times \left(6,54 \times 10^{-4} \sin\left(\frac{\pi}{4} x - \pi\right)\right)$$

Sonuç olarak sistemin deplasman zaman denklemi elde edilmiştir.

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

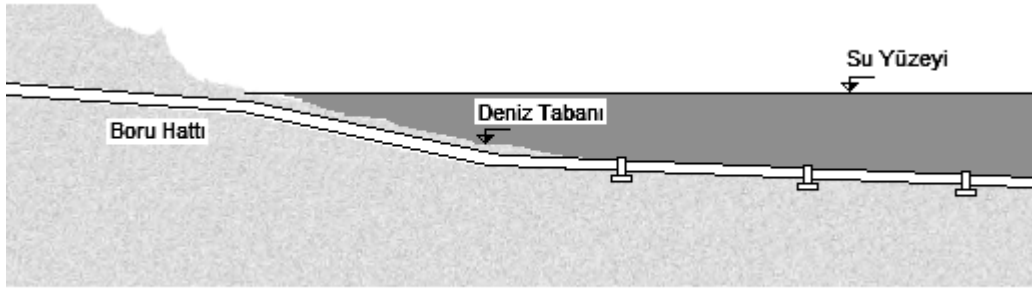
Çizelge 5.6. Yatay Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ($x=L/2$)

Kuvvet	TSDS (m)	SAP2000 (m)	Fark(TSDS&SAP2000)
F_I	$6,544 \times 10^{-4}$	$7,078 \times 10^{-4}$	%8
F_D	$6,168 \times 10^{-5}$	$6,624 \times 10^{-5}$	%7
Toplam	$7,1608 \times 10^{-4}$	$7,7404 \times 10^{-4}$	%7

Yukarıdaki Çizelge 5.6' da 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.

5.2. Deniz Tabanına Serbest Oturan Boruların Dinamik Analizi

Deniz ortamında boru hattının tabana serbest oturan şekilde tasarlanması durumunda deniz tabanının düzgün olması gerekmektedir. Taban yüzeyinin dalgalı veya kırıklı olması durumunda boru hattı tabana yer yer tabana oturması ve yer yer askıda kalması durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durum da tasarlanan sistemde hesap edilen veya etkimesi tahmin edilmeyen kuvvetler ortaya çıkmaktadır. Buda sistemin stabilitesini doğrudan etkilemektedir. Şekil 5.6. da görüldüğü gibi düzgün bir deniz tabanında tabana serbest oturan bir boru hattı inşa edilebilir.



5.6. Deniz Boru Hattı (Tabana Serbest Oturan)

5.2.1. Deniz Taban 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 $s = 0,5$ m dir. Serbest oturan borunun bulunduğu yerdeki su derinliği $d = 25$ m olduğu için boru eksenini ile su yüzeyi arası $z = -24,5$ 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,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

bağıntısı kullanılarak en uygun değerin $L=92,91$ m olduğu belirlenmiştir.

Dalga yayılma hızı ve frekansı ise,

$$c = \frac{L}{T} = \frac{92,91}{8} = 11,61$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{8} = 0,785$$

$$k = \frac{2\pi}{L} = \frac{2\pi}{92,91} = 0,0676$$

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,

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

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

$$\begin{aligned} U &= \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh(2\pi(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \cos(\Theta) \\ &= \frac{2,5}{2} \frac{9,81 \cdot 8}{92,91} \frac{\cosh(2\pi(0,2)/92,91)}{\cosh(2\pi \cdot 25/92,91)} \cos(-0,785 \cdot t) \\ &= 0,377 \cos(-0,785 t) \end{aligned}$$

İvme terimi ise

$$\begin{aligned}
\dot{U} &= \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh(2\pi(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)} \sin(\Theta) \\
&= \frac{9,81\pi \cdot 2,5}{92,91} \frac{\cosh(2\pi(0,2)/92,91)}{\cosh(2\pi 25/92,91)} \sin(-0,785 t) \\
&= 0,296 \sin(-0,785 t)
\end{aligned}$$

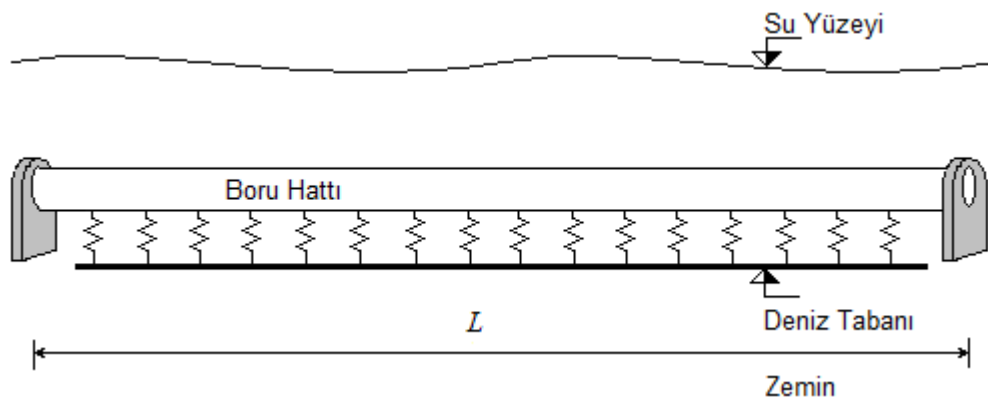
şeklinde ifade edilir.

Çizelge 5.7. Serbest Oturan Boruya Etkiyen Maksimum Hız ve ivme değerleri

	t=0	t=T/4	t=T/2	t=3T/4	t=T
Hız (m/s)	0,377	0	-0,377	0	0,377
İvme (m/s)	0	-0,296	0	0,296	0

5.2.2. Stabilité 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 ve hidrodinamik kaldırma kuvvetidir.



Şekil 5.7. Deniz Tabanına Serbest Oturan Boru Hattı.

a-) Serbest Oturan Boru Düşey Stabilité 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,

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_d D U^2 = \frac{1}{2} 1.1.029.1.(0,377)^2 = 0,073 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Hidrostatik kaldırma kuvveti,

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

Boru ağırlığı,

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

Zemin taşıma kapasitesi (Boru-Zemin arası temas yüzeyi B=0,3 m),

$$F_C = \left(N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_\gamma \gamma_s B \right) B = \left(0 + \frac{1}{2} 19,13.20.0,3 \right) 0,3 = 17,217 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

Buluna bu değerler aşağıda yerine yazılırsa,

$$\sum F_V = F_w - F_B - F_L \geq 0 \rightarrow 2,436 - 0,534 - 0,073 = 1,889 > 0 \text{ Uygunudur.}$$

Ayrıca,

$$F_B + F_L \leq \frac{F_w}{G_s} \rightarrow 0,534 + 0,073 = 0,607 < \frac{2,436}{1,5} = 1,624 \text{ Uygunudur.}$$

$$F_C \geq G_s F_V \rightarrow 17,217 > 1,5.1,889 = 2,833 \text{ Uygunudur.}$$

b-) Serbest Oturan Boru Yatay Stabilite Analizi:

Yatay yöndeki hidrodinamik dalga kuvvetleri,

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

$$F_I = \frac{\pi}{4} C_I \rho_d D^2 \dot{U} = \frac{\pi}{4} (3,3) (1,029) (1)^2 (0,296) = 0,790 \text{ kN/m}$$

Sürtünme kuvveti ise kohezyonsuz zeminler için,

$$F_s = F_v \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = 1,889 \tan(15) = 0,506 \text{ kN/m}$$

Yatay düzlemde stabilite şartı,

$$\sum F_H = F_D + F_I - F_s \leq 0 \rightarrow 0,073 + 0,790 - 0,506 = 0,357 \not\leq 0 \text{ uygun de\u011fil.}$$

Sürtünme kuvveti, yatay kuvvetlere karşı direnç gösterememektedir. Bunun için sürtünme kuvvetini artırmak gerekmektedir.

Minimum sürtünme kuvveti F'_s ise;

$$F'_s \geq (F_I + F_D) G_s = 0,863 \times 1,5 = 1,295 \text{ kN/m olmalıdır.}$$

$$F'_s = F'_v \tan(a) \Rightarrow F'_v = \frac{F'_s}{\tan(a)} = \frac{1,295}{0,267} = 4,850 \text{ kN/m olması gerekmektedir.}$$

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

$$F_{TK} = F'_v - F_v = 4,850 - 1,202 = 3,648 \text{ kN/m olarak bulunur.}$$

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

$$F_C \geq G_S F'_V \rightarrow 17,217 > 1,5 \times 4,850 = 7275 \text{ uygundur.}$$

Serbest döşenmiş boru hattının stabilitesi için birim boya $F_{TK} = 3,648$ kN/m lik bir ağırlık asılmalıdır. Veya her 15,0 m de bir $F_T = 55$ kN luk bir tesbit kitlesi konulabilir.

5.2.3. Düşey Düzlemde Dinamik Analiz

Borunun deniz tabanında birim boyuna etkiyen toplam düşey dış kuvvet, borunun kendi ağırlığı, hidrostatik kaldırma ve hidrodinamik kaldırma kuvvetinin tesiriyle zamanla değişen bir kuvvet olmaktadır. Pozitif yön kabulü olarak yukarı yönü pozitif kabul edersek ($\uparrow +$) toplam kuvvet,

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

Boru ve içindeki akışkanın salınımı aynı olacağından toplam kütle olarak alınır. Denklemi ise, $(m = \rho_b A_b + \rho_a A_a)$

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

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

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

Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Tanımlanması

Sistemin dış yük etkileri altında yapacağı deplasmanın başlangıç eğrisi (şekil fonksiyonu) Sap2000 programında ön yükleme yapıp elde edilen düşey deplasmandan yararlanılarak eğri uydurma metodu ile aşağıdaki gibi elde edilmiştir. $\{\psi(L/2) = 1\}$

$$\psi(x) = 1,04 \sin(0,213x - 0,026) + 0,04 \sin(0,511x + 0,879)$$

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

$$m^* = m \int_0^L \psi(x)^2 dx = 7,876 \text{ ton}$$

$$k^* = \int_0^L k_y(x) \psi(x)^2 dx + E_b I_b \int_0^L \psi''(x)^2 dx = 51965,19 \text{ kN}$$

olarak bulunur. Boru hattında aksel kuvvet dikkate alınmadığı için,

$$k_G^* = \int_0^L -N(x) \psi'(x)^2 dx = 0 \quad \text{ve}$$

$$\bar{k}^* = k^* - k_G^* = 51965,19 \text{ kN}$$

Sisteme etkiyen hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_B = \gamma_d \frac{1}{4} \pi D^2 - \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D - 2s)^2 = 0,538 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur.

Genelleştirilmiş hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_B^* = F_B \int_0^L \psi(x) dx = 5,286 \text{ kN olarak bulunur.}$$

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

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

Genelleştirilmiş hidrodinamik kaldırma kuvveti ise aşağıdaki bağıntıdan hesaplanırsa,

$$F_L^*(t) = F_L(t) \int_0^L \psi(x) dx = 0,720 \cos(-0,785t)^2 \text{ kN olarak bulunur}$$

Boru ağırlığından gelen kuvvet ise,

$$F_w = \gamma_b \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2s)^2) = 2,437 \text{ kN/m}$$

Genelleştirilmiş hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_w^* = F_w \int_0^L \psi(x) dx = 24,039 \text{ kN olarak bulunur.}$$

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

$$F_{Top}^*(t) = 5,286 + 0,710 \cos(-0,785t)^2 - 24,039 \text{ kN olarak bulunur.}$$

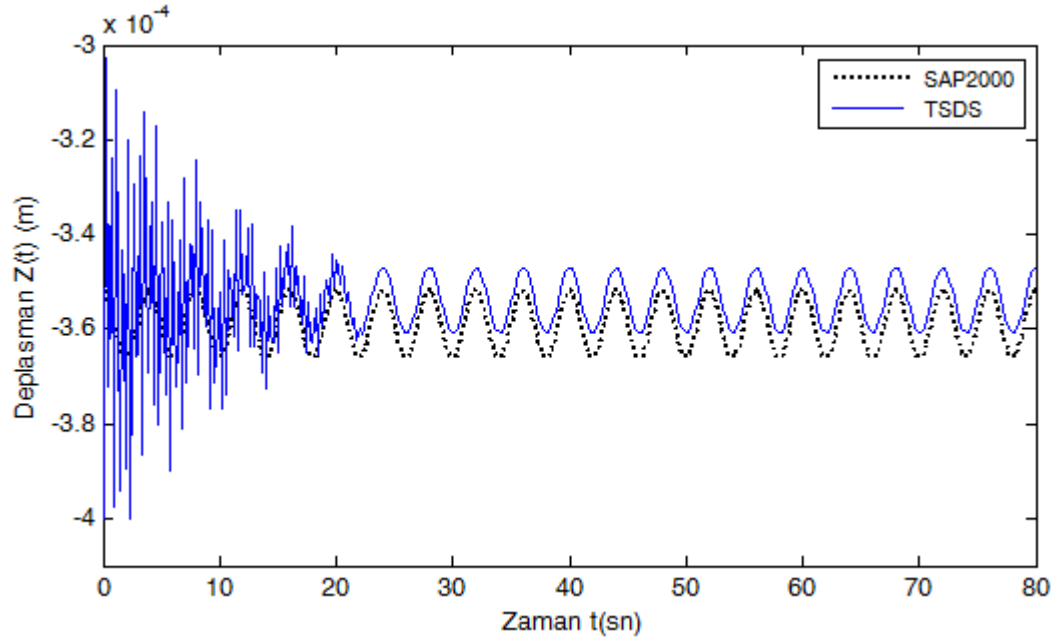
Bulunan bu değerler hareket denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$7,876 \ddot{Z}(t) + 51965,19 Z(t) = 0,720 \cos(-0,785t)^2 - 18,753$$

Bulunan bu homojen olmayan diferansiyel denklemini Ek1. 'de verilen bilgisayar programı ile başlangıç şartları olarak $t=0$ da deplasman ve hız sıfır olduğu,

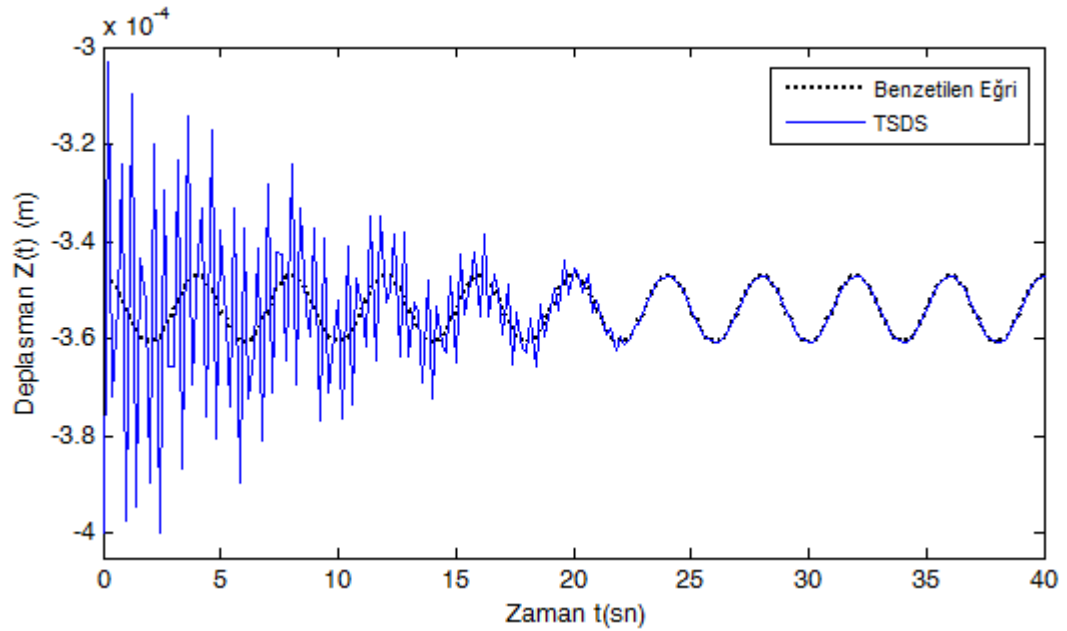
$$t=0 \Rightarrow Z(0)=0 \quad \text{ve} \quad t=0 \Rightarrow \dot{Z}(0)=0$$

kabul edilip çözüm yapılırsa aşağıdaki deplasman zaman grafiği elde edilir (Yiğit, 2010). (Şekil 5.8)



Şekil 5.8. TSD Sistem İle SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.

TSDS ile yapılan analiz ile SAP2000 programı ile Zaman tanım alanında Newmark- β metodu ile yapılan analiz karşılaştırılmış ve sonuçların uyumluluğu Şekil 5.9. te gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Deplasman Eğri Denklemi İle Uydurulan Eğrinin Karşılaştırılması

Sistemin salınım hareketi yaklaşık 20 sn den sonra belirli bir genliğe inerek devam etmektedir. Sistemin salınım denklemi belirlenirken 20. sn den sonraki genlik dikkate alınmış ve yukarıdaki grafikte de görüldüğü gibi Deplasman–Zaman eğri denklemi eğri uydurma metodu ile aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$Z(t) = -3,538 \times 10^{-4} + 0,68 \times 10^{-5} \sin\left(\frac{\pi}{2}t - \frac{3\pi}{2}\right)$$

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,

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

$$v(x, t) = (1,04 \sin(0,213x - 0,026) + 0,04 \sin(0,511x + 0,879)) \times \left(-3,538 \times 10^{-4} + 0,68 \times 10^{-5} \sin\left(\frac{\pi}{2}t - \frac{3\pi}{2}\right) \right)$$

Sisteme etkiyen 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 5.8. Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar (x=L/2 m)

Kuvvet	TSDS (m)	SAP2000 (m)	Fark (TSDS & SAP2000)
F_L	$1,384 \times 10^{-5}$	$1,407 \times 10^{-5}$	%1,6
F_B	$1,018 \times 10^{-4}$	$1,037 \times 10^{-4}$	%1,8
F_W	$-4,626 \times 10^{-4}$	$-4,696 \times 10^{-4}$	%1,5
Toplam	$-3,469 \times 10^{-4}$	$-3,554 \times 10^{-4}$	%2,3

Yukarıdaki Çizelge 5.8' 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.

5.2.4. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz

Sistemin yatay dış yük etkileri altında yapacağı deplasman-konum eğrisi (şekil fonksiyonu) iki ucu basit mesnetli boru için normalleştirilmiş halde aşağıdaki gibi alınmıştır. Burada hesaplanan ifadeler dikey düzlemde yapılan hesaplarla aynı yolu izlemektedir. Buna göre, $\{\psi(L/2) = 1\}$

$$\psi(x) = \sin\left(\pi \frac{x}{L}\right)$$

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

$$m^* = \bar{m} \int_0^L \psi(x)^2 dx = 7,705 \text{ ton}$$

$$k^* = E_b I_b \int_0^L \psi''(x)^2 dx = 11603,47 \text{ kN}$$

$$k_G^* = \int_0^L -N(x) \psi'(x)^2 dx = 0 \quad \text{ve}$$

$$\overline{k^*} = k^* - k_G^* = 11603,47 \text{ kN}$$

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

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

Bu değerlerden sürüklenme kuvveti,

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

$$F_D^*(t) = F_D \int_0^L \psi(x) dx = 0,710 \cos^2(-0,785 t) \text{ kN olur.}$$

Atalet kuvveti ise,

$$F_I(t) = \frac{\pi}{4} C_I \rho_d D^2 \dot{U} = 0,790 \sin(-0,785 t) \text{ kN/m olarak bulunur. Genelleştirilirse,}$$

$$F_I^*(t) = F_I(t) \int_0^L \psi(x) dx = 7,544 \sin(-0,785 t) \text{ kN olur.}$$

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

$$F_{Top}^*(t) = F_D^*(t) + F_I^*(t) = 0,710 \cos^2(-0,785 t) + 7,544 \sin(-0,785 t) \text{ kN olarak bulunur.}$$

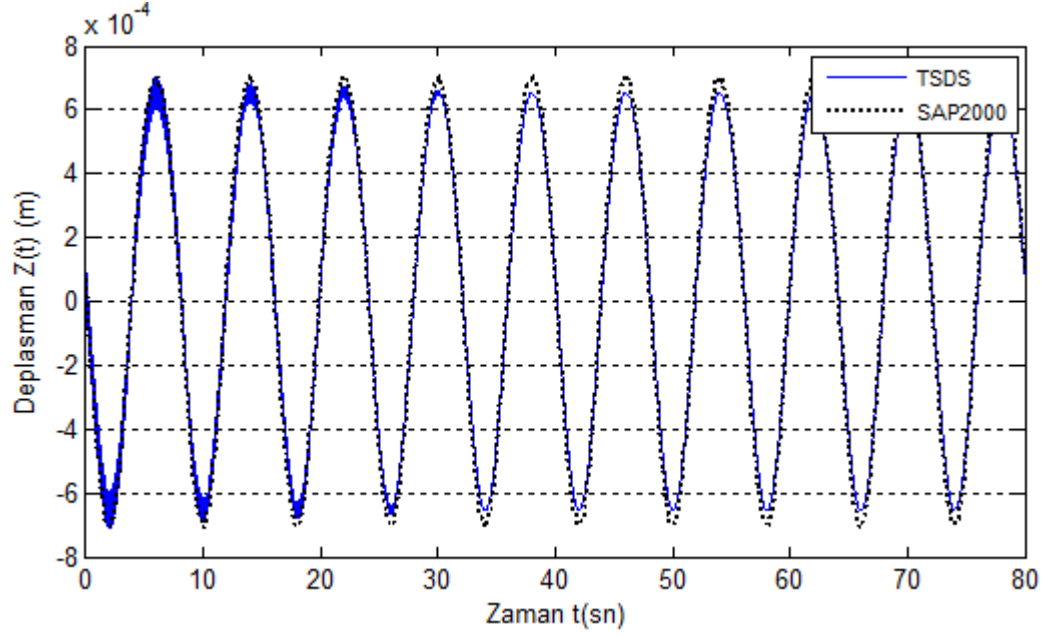
Bulunan bu değerler hareket denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$7,705 \ddot{Z}(t) + 11603,47 Z(t) = 0,710 \cos^2(-0,785 t) + 7,544 \sin(-0,785 t)$$

Bulunan bu homojen olmayan diferansiyel denklemin başlangıç şartları olarak $t=0$ da deplasman ve hız sıfır olduğu,

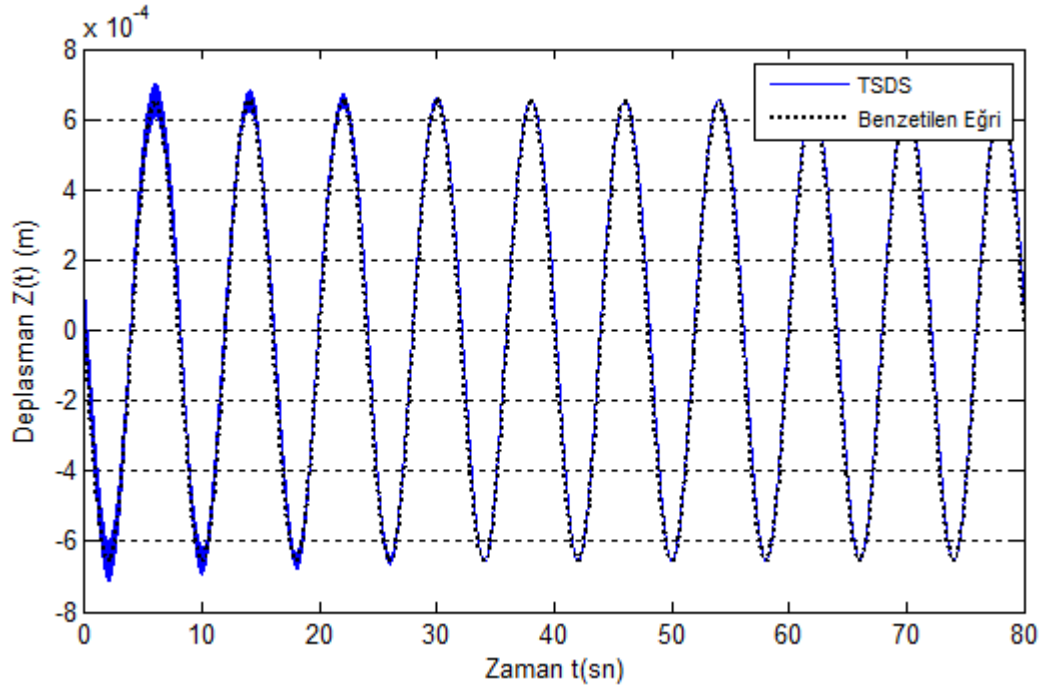
$$t=0 \Rightarrow Z(0)=0 \quad \text{ve} \quad t=0 \Rightarrow \dot{Z}(0)=0$$

kabul edilip Ek1. 'de verilen bilgisayar programı ile çözüm yapılırsa aşağıdaki deplasman zaman grafiği elde edilir (Yiğit, 2010). (Şekil 5.10)



Şekil 5.10. Dalga Kuvveti Etkisinde TSDS İle SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.

TSDS ile yapılan analiz ile SAP2000 programı ile Zaman Tanım alanında Newmark- β metodu ile yapılan analiz karşılaştırılmış ve sonuçların uyumluluğu Şekil 5.10' te gösterilmiştir. Sistemin salınım hareketi yaklaşık 30 sn den sonra belirli bir genliğe inerek devam etmektedir. Sistemin salınım denklemi belirlenirken 30 sn den sonraki genlik dikkate alınmış ve aşağıdaki grafikte de görüldüğü gibi Deplasman–Zaman eğri denklemi eğri uydurma metodu ile belirlenmiştir.(Şekil 5.11)



Şekil 5.11. Deplasman Eğri Denklemi İle Benzetilen Eğrinin Karşılaştırılması

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

$$Z(t) = 6,5 \times 10^{-4} \sin\left(\frac{\pi}{4}x - \pi\right)$$

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,

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

$$v(x, t) = \sin\left(\pi \frac{x}{L}\right) \times \left(6,5 \times 10^{-4} \sin\left(\frac{\pi}{4}x - \pi\right)\right)$$

Sonuç olarak sistemin deplasman zaman denklemi elde edilmiştir.

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

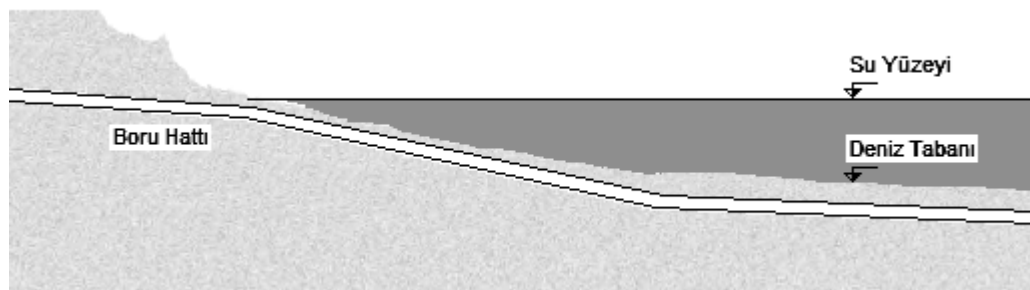
Çizelge 5.9. Yatay Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ($x=L/2$)

Kuvvet	TSDS (m)	SAP2000 (m)	Fark(TSDS&SAP2000)
F_I	$6,719 \times 10^{-4}$	$7,021 \times 10^{-4}$	%4,3
F_D	$6,385 \times 10^{-5}$	$6,455 \times 10^{-5}$	%1,1
Toplam	$7,3575 \times 10^{-4}$	$7,6665 \times 10^{-4}$	%4

Yukarıdaki Çizelge 5.9' da 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.

5.3. Zemine Gömülü Döşenmiş Boruların Dinamik Analizi

Deniz tabanında güçlü akıntı olması veya boru hattını tehdit eden çarpma gibi dış kuvvetlerden boru hattını bu etkilerden koruma için boru hattı zemine gömülü olarak tasarlanabilir. Bu modellemede karşılaşılan sorunlar ise boru hattının zemin yüzeyine çıkması veya zemin basıncı altında deforme olması durumlarıdır. Diğer sorunlar ise boru hattının deniz tabanında ki kazıların maliyetinin yüksek olması sebebiyle veya taban biyolojik dokusunun ciddi tahribata uğrama sorunlarıdır. Şekil 5.12. de deniz tabanına gömülü dizayn edilmiş bir boru hattı görülmektedir.



a-) Zemine Gömülü Boru Düşey Stabilite Analizi:

Hidrostatik kaldırma kuvveti,

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

Boru ağırlığı,

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

Boru üstündeki zeminin ağırlığı

$$F_Z = \gamma_s D z = 20,0 \times 1,0 \times 1,5 = 30,0 \text{ kN/m}$$

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

Zemin taşıma kapasitesi,

$$F_C = \left(N_q \gamma_s z + \frac{1}{2} N_\gamma \gamma_s B \right) B = \left(22,46 \times 20 \times 1,5 + \frac{1}{2} 19,13 \times 20 \times 1,0 \right) 1,0 = 865,1 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur.

Buluna bu değerler aşağıda yerine yazılırsa,

$$\sum F_V = F_W + F_Z - F_B \geq 0 \rightarrow 2,436 + 30,0 - 0,534 = 31,902 > 0 \text{ Uygundur.}$$

Ayrıca,

$$F_B \leq \frac{F_W + F_Z}{G_s} \rightarrow 0,534 < \frac{2,436 + 30,0}{1,5} = 21,624 \text{ Uygundur.}$$

$$F_C \geq G_s F_V \rightarrow 865,1 > 1,5 \cdot 31,902 = 47,853$$

Uygundur.

b-) Zemine Gömülü Boru 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,

$$F_s = F_v \tan(a) + \frac{1}{2} \gamma_s z^2 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = 31,902 \cdot \tan(15) + \frac{1}{2} 20 \cdot (1,5)^2 \tan^2(60)$$

$$F_s = 76,048 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur.

Bu şekilde zemine gömülü boru stabildir.

5.3.2. Düşey Düzlemde Analiz

Zemine gömülü borunun birim boyuna etkiyen toplam düşey dış kuvvet, borunun kendi ağırlığı ve hidrostatik kaldırma kuvveti olmaktadır. Pozitif yön kabulü olarak yukarı yönü pozitif kabul edersek ($\uparrow +$) toplam kuvvet,

$$F_{Top} = F_B - F_W \text{ olmaktadır.}$$

Boru ve içindeki akışkanın salınımı aynı olacağından toplam kütle olarak alınır. Denklemi ise, $(m = \rho_b A_b + \rho_a A_a)$

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

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

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

Tek Serbestlik Dereceli Sistemin Tanımlanması

Sistemin dış yük etkileri altında yapacağı deplasmanın başlangıç eğrisi (şekil fonksiyonu) Sap2000 programında ön yükleme yapıp elde edilen düşey deplasmandan yararlanılarak eğri uydurma metodu ile aşağıdaki gibi elde edilmiştir. $\{\psi(L/2)=1\}$

$$\psi(x) = 1,04 \sin(0,213x - 0,026) + 0,04 \sin(0,511x + 0,879)$$

Düşey dinamik dış yük ($F_V(x,t)$) teriminin varlığıyla homojen olmayan formdaki sönümsüz sistemde uygulama verileri yerine yazılarak bulunan, genel kütle (m^*) ve genel rijitlik ($\bar{k}^*$) terimleri; (burada boru hattı gömülü olduğu için zemin borunun alt ve üst tarafına temas halindedir. Bu nedenle yay katsayısı $k_{y,g} = 2k_y$ şeklinde hesaplanmıştır.)

$$m^* = m \int_0^L \psi(x)^2 dx = 7,876 \text{ ton}$$

$$k^* = \int_0^L k_{y,g}(x) \psi(x)^2 dx + E_b I_b \int_0^L \psi''(x)^2 dx = 92326,91 \text{ kN}$$

olarak bulunur. Boru hattında eksenel kuvvet dikkate alınmadığı için,

$$k_G^* = \int_0^L -N(x) \psi'(x)^2 dx = 0 \quad \text{ve}$$

$$\bar{k}^* = k^* - k_G^* = 92326,91 \text{ kN}$$

Sisteme etkiyen hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_B = \gamma_d \frac{1}{4} \pi D^2 - \gamma_0 \frac{1}{4} \pi (D - 2s)^2 = 0,538 \text{ kN/m}$$

olarak bulunur.

Genelleştirilmiş hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_B^* = F_B \int_0^L \psi(x) dx = 5,286 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Boru ağırlığından gelen kuvvet;

$$F_W = \gamma_b \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2s)^2) = 2,437 \text{ kN/m}$$

Genelleştirilmiş hidrostatik kaldırma kuvveti ise,

$$F_W^* = F_W \int_0^L \psi(x) dx = 24,039 \text{ kN olarak bulunur.}$$

Buna göre genelleştirilmiş düşey düzlemdeki toplam dış kuvvet,

$$F_{Top}^* (t) = 5,286 - 24,039 \text{ kN olarak bulunur.}$$

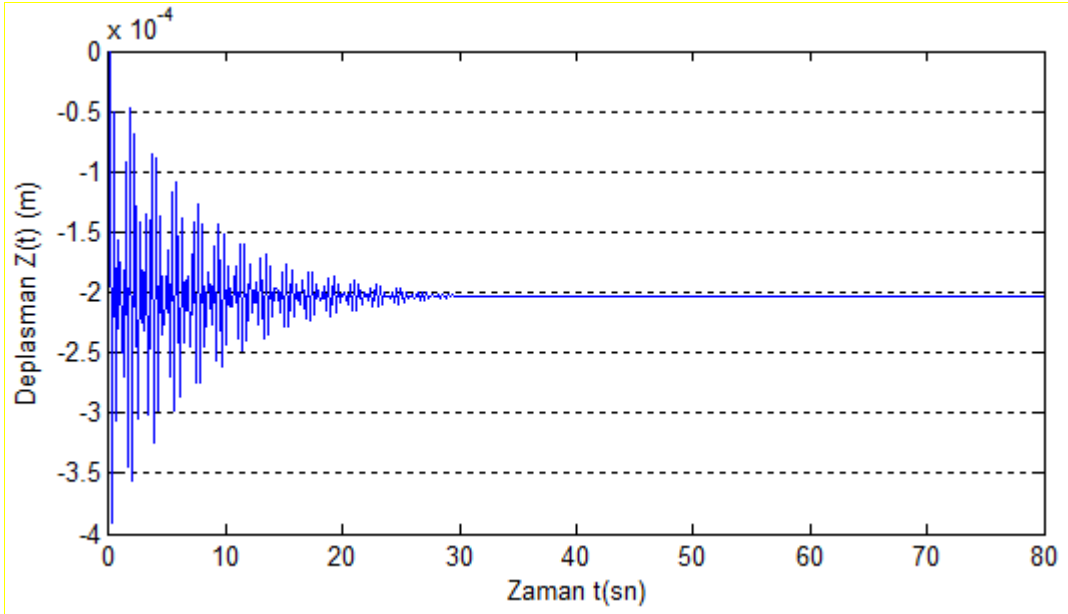
Bulunan bu değerler hareket denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$7,876 \ddot{Z}(t) + 92326,91 Z(t) = -18,753$$

Bulunan bu diferansiyel denklemi Ek1. '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 5.8)



Şekil 5.14. TSD Sistem ile Elde Edilen Deplasman–Zaman Grafiği.

Sistemin salınım hareketi yaklaşık 40 sn den sonra belirli bir genliğe inerek sabit durmaktadır.. Sistemine etkiyen yükler statik olduğu için sistemin salınım denklemi zamandan bağımsız olur. Salınım denklemi belirlenirken 40. sn den sonraki düzgün genlik bölgesi dikkate alınmış ve Deplasman–Zaman değeri sabit olarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$Z(t) = -2,031 \times 10^{-4}$$

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

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

$$v(x, t) = (1,04 \sin(0,213x - 0,026) + 0,04 \sin(0,511x + 0,879)) \times (-2,031 \times 10^{-4})$$

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

Çizelge 5.10. Düşey Düzlemde Maksimum Deplasmanlar ve Farklar ($x=L/2$ m)

Kuvvet	TSDS (m)	SAP2000 (m)	Fark (TSDS & SAP2000)
F_B	$5,725 \times 10^{-5}$	$5,831 \times 10^{-5}$	%1,8
F_W	$-2,604 \times 10^{-4}$	$-2,643 \times 10^{-4}$	%1,5
Toplam	$-2,031 \times 10^{-4}$	$-2,060 \times 10^{-4}$	%1,3

Yukarıdaki Çizelge 5.10' da 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.

5.3.3. Yatay Düzlemde Dinamik Analiz

Zemine gömülü boru hattına zemin içerisinde yatay doğrultuda etkiyen herhangi bir kuvvet dikkate alınmadığı için bu kısımda dinamik analiz yapılmamıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Uygulama kapsamında yapılan askıdaki boru hattı, tabana serbest oturan boru hattı ve zemine gömülü boru hattı olarak üç tipte tasarlanan deniz boru hatlarının dinamik analizi yapılmış ve elde edilen maksimum deplasmanlar aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Sonuçların Karşılaştırılması

		TSDS (m)	SAP2000 (m)	Fark (%)
Askıda Tasarlanmış Boru Hattı	Yatay	$7,1608 \times 10^{-4}$	$7,7404 \times 10^{-4}$	%7
	Düşey	$-1,595 \times 10^{-3}$	$-1,676 \times 10^{-3}$	%5
Deniz Tabanına Serbest Oturan Boru Hattı	Yatay	$7,3575 \times 10^{-4}$	$7,6665 \times 10^{-4}$	%4
	Düşey	$-3,469 \times 10^{-4}$	$-3,554 \times 10^{-4}$	%2,3
Zemine Gömülü Boru Hattı	Yatay	-	-	-
	Düşey	$-2,031 \times 10^{-4}$	$-2,060 \times 10^{-4}$	%1,3

Aynı kesit ve özelliklerde tasarlanan bu üç tip boru hattında en büyük deplasmanı askıdaki deniz boru hattının vermesinin nedeni boru hattı sadece iki ucundan mesnetlendiği ve orta kısmın serbest olmasıdır. Deniz tabanına serbest oturan boru hattında ise aynı şekilde iki ucundan mesnetlenmiştir. Fakat boru hattı elastik deniz tabanına kısmi olarak oturan boru olduğu için elastik zemin tarafından boru hattı boyunca bir elastik mesnetlenme durumu ortaya çıkmıştır. Bunun neticesinde elastik zemine oturan boru hattı askıdaki boru hattına nispeten daha küçük düşey deplasman değeri vermiştir. Yatay düzlemde ise askıdaki deniz boru hattı ile tabana serbest oturan boru hattının yaklaşık değerlerde deplasman yapmalarının nedeni deniz tabanında ve bir askı yüksekliğindeki dalga hız ve ivme değerlerinin birbirine yakın değerlerde olmasıdır. Temel farklılık nedeni ise askıdaki deniz borusunun tabandan yüksekliğinin (e), hidrodinamik kaldırma kuvvetinin oluşması için gereken ($e/D < 1/4$) oranından daha büyük olmasından doğmaktadır.

TSD sistem ile yapılan analizler bilgisayar destekli yapısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar arasındaki uyum yukarıdaki çizelgede gösterilmiştir. İki analiz yöntemi arasındaki fark ise bilgisayar programının sonlu elemanlar metodunu esas alarak analiz yapması olarak izah

edilebilir. Ayrıca genelleştirilmiş tek serbestlik dereceli sistem ile elde edilen sonuçların (Clough and Penzien,1993) e göre analitik sonuçlarda küçük orandaki farklılıklar olabileceğini söylemiştir.

Elde edilen sonuçlara göre boru hattında küçük deplasman değerleri görölmek istenirse boru hattı zemine gömülü dizayn edilebilir. Ancak bu durumda da deniz tabanındaki kazı dolgu işlemlerinin maliyeti yüksek olacağı unutulmamalıdır. Bir diğer taraftan boru hattının deniz tabanına serbest oturtulması için gereken taban kazı düzenleme işlemlerinin de maliyeti dikkate alınmalıdır.

Deniz boru hattı güzergahı boyunca değişik kısımlarında askıda, tabana serbest oturan veya zemine gömülü olarak inşa edilebilir. Boru hattının başlangıç kısmı gömülü devamında serbest oturan ve derinliğin arttığı veya taban yer şekillerinin gömülmeye uygunsuz olduğu durumlarda askıda dizayn edilebilir. Yapılan bu uygulama kapsamında her üç durumda da karşılaşılabilecek tasarımlar modellenmiş ve çözüm yolu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- (1) 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.
- (2) Bowles, J. E., 1996. Foundation Analysis and Design: McGraw-Hill Companies, Inc., New York, USA.
- (3) Chakrabarti, S., K. 1987, Hydrodynamics of Offshore Structures, Springer Verlag, Berlin
- (4) Celep, Z ve Kumbasar N. (2001). Yapı Dinamiği (üçüncü baskı). İstanbul: İTÜ, Rehber Matbaacılık.
- (5) Celep, Z ve Kumbasar N. (2004). Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarım (üçüncü baskı). Beta Dağıtım, İstanbul.
- (6) Clough, R.W. ve Penzien, J. (1993). Dynamics of Structures (2nd edition).Singapore: Mc Graw–Hill, Inc.
- (7) Det Norske Veritas, 1981, Rules for Marine Pipeline Systems, Oslo
- (8) Grace, R.A., (1978). Marine Outfall Systems—Planning, Design and Construction. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice—hall, Inc. 600 p
- (9) Gökkuş, Ü., 1992, Deniz Boruhatlarının Teknik ve Ekonomik Optimizasyonu, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir
- (10) İnan M. (1967) Cisimlerin Mukavemeti, Birsen Yayınevi, İstanbul
- (11) Janson, L. E.(1990). Plastic Pipes of Water Supply and Sewage Disposal. Stokholm. Neste Chemical Publication.
- (12) Jeffrey, A., vd. (1980), Stabilization Requirements For Submarine Pipelines Subjected To Ocean Forces CH2M HILL NORTHWEST INC.,Bellevue, Washinton, 98004

- (13) Karal, K. (1977). Lateral Stability of Submarine Pipelines. Offshore Technology Conference. Houston, Texas. May 2—5, Paper No. OTC 2968, pp. 71 through 78.
- (14) Lambe, T.W. and Whitman R.W. (1969). Soil Mechanics. New York. John Wiley & Sons. 553 p.
- (15) 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.
- (16) Leylek, E.İ.,(2005). Yapı Dinamiği: Depreme Dayanıklı Yapılar, Çağlayan Kitabevi, İstanbul
- (17) 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.
- (18) Ölmez, İ.H., Yiğit, M.E., Solmaz, B., (2010). Düzenli Dalgalar Etkisinde Deniz Tabanına Serbest Oturan Boruların Dinamik Analizi, 5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 12-16 Eylül 2011, İstanbul
- (19) Öztürk İ.,(1996). Atıksu Ön Artıma ve Deniz Deşarj Sistemleri. İ.T.Ü, İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- (20) 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.

EKLER

Ek 1. Bilgisayar Programları

a-) Bilgisayar Ana Programı

```

clc, clear,
digits(7);
gamac=78.334;,
g=9.81;,
E=2.11*10^8;,
rod=1.029;,
roa=0.999;,
roc=gamac/g;,
gamaa=roa*g;,
gamad=rod*g;
s=0.01;
syms x
L=15;
D=1;
:
:
:
[t,z]=ode23('serbest_iho',0:0.1:80,[0 0])
hold on
grid on
plot(t,z(1:size(t),1),'b');
xlabel(' Zaman t(sn)')
ylabel(' Deplasman Z(t) (m) ')

```

b-) Bilgisayar Alt Programı (Yatay Dinamik Analiz)

```

function turevfidenk=serbest_iho(t,z)

Flx=7.794*sin(-.7850000*t);
FDx=0.739*(cos(.7850000*t))^2;
Ftop=FDx+Flx;

```

```

k =22853.47;
mx =7.875;
z(3)=((Ftop)-(k*z(1)))/mx;
turevfidenk=[z(2);z(3)];

```

b-) Bilgisayar Alt Programı (Düşey Dinamik Analiz)

```

function turevfidenk=serbest_iho(t,z)

```

```

FBx=5.286;
FWx=24.039;
FLx=0.720*cos(-.7850000*t)^2;

```

```

Ftop= FWx-FBx-FLx;
k =11603.48; % zemine gomulu ise k=92236.91; % serbest oturan ise k=51965,19
mx =7.875;
z(3)=((Ftop)-(k*z(1)))/mx;
turevfidenk=[z(2);z(3)];

```